



PROMOTION DE SOLUTIONS DE CHAUFFAGE UTILISANT
DES AGROCOMBUSTIBLES EN EUROPE

DES RÉSIDUS DE MAÏS À L'ÉNERGIE

UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Ce projet a été financé par le programme de recherche
et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne,
dans le cadre de la convention de subvention no 818369





UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Ce projet a été financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, dans le cadre de la convention de subvention no 818369

A PROPOS DE CETTE PUBLICATION

La publication "Des résidus de maïs à l'énergie", réalisée par l'Association ukrainienne de bioénergie et le Centre pour la recherche et la technologie Hellas (CERTH), fait partie d'une série de guides de référence rédigés dans le cadre du projet AgroBioHeat et visant à fournir une connaissance systématique de l'utilisation de différents types de ressources d'agrobiomasse. Il se concentre en particulier sur les résidus de la culture du maïs et sur la manière dont cette ressource - produite annuellement en grandes quantités et actuellement sous-utilisée - peut être efficacement récoltée et utilisée pour la production de bioénergie.

Le projet AgroBioHeat vise à déployer massivement des solutions de chauffage utilisant la biomasse agricole sur le marché européen. Les agro-combustibles représentent une ressource importante et sous-exploitée, qui peut venir en soutien de l'actuelle stratégie de planification européenne pour l'énergie et le climat tout en favorisant le développement rural, l'économie circulaire et l'emploi local. Le projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 818369.

Pour plus d'informations sur le projet, veuillez consulter:
www.agrobioheat.eu

Ce document ne reflète que le point de vue des auteurs. L'Agence exécutive européenne pour le Climat, les Infrastructures et l'Environnement (CINEA) n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.

Traduction par le partenaire français AILE.



PRINCIPAUX AUTEURS:

Georgii Geletukha (UABIO)
Semen Drahnev (UABIO)
Tetiana Zheliezna (UABIO)
Manolis Karampinis (CERTH)

CONTRIBUTIONS:

Thomas Brunner (BIOS)

ABRÉVIATIONS

Abréviation	Explication
CB	Epi
CCM	Mélange d'épis de maïs
CHP	Production combinée de chaleur et d'électricité
d.b.	Base sèche
DM	Matière sèche
E	Epi
ESP	Dépoussiéreur électrostatique
EW	Enveloppe
GHG	Gaz vert
GR	Grain
LV	Feuille
Mgy	Millions de gallons par an
MY	Année de commercialisation
OGC	Composés organiques gazeux
PTO	Prise de force
ST	Tiges
TSP	Matières particulaires totales
VS	Matières solides volatiles
W	Teneur en eau
w.b.	Base humide

SOMMAIRE

Introduction	7
Les résidus de maïs comme source d'énergie	8
Le maïs dans la production agricole	8
Les résidus de maïs	9
Propriétés énergétiques des résidus de maïs	15
Récolte des résidus de maïs	17
Technologies de récolte des grains de maïs	17
Méthodes de récolte pour les résidus de maïs	19
La chaîne d'approvisionnement en cannes de maïs DuPont	22
Transport de balles de canne de maïs	23
Récolte de la canne de maïs en balles rondes	24
Récolte de la canne de maïs déchetée	24
Systèmes de récolte des rafles de maïs	25
Stockage des cannes de maïs	25
Densification des résidus de maïs	27
Production de chaleur à partir de résidus de maïs	28
Production de chaleur à partir de paille de maïs	28
Production de chaleur à partir de rafles de maïs	29
Résidus de maïs pour la production d'électricité	31
Résidus de maïs pour la production de bioéthanol	33
Résidus de maïs pour le biogaz	35
Aspects durables de l'utilisation des résidus de maïs	38
Élimination durable des résidus de maïs	38
Émissions de GES de la logistique dans l'utilisation des résidus de maïs	39
Annexe I : Principaux types de machines pour la récolte, la logistique des résidus de maïs et leur transformation en granulés/briquettes	40
Annexe II : Systèmes énergétiques pour produire de la chaleur à partir de résidus de maïs	44
Le consortium "AgroBioHeat"	45

LISTE DES TABLEAUX

Table 1: Principaux producteurs de maïs dans le monde au cours des 5 dernières années (par MY)	8
Table 2: Comparaison des propriétés indicatives du combustible des fractions de résidus de maïs avec différents assemblages de biomasse	15
Table 3: Production de méthane à partir de résidus de maïs et d'ensilage de maïs	35

LISTE DES IMAGES ET GRAPHIQUES

Figure 1: Rendement du maïs aux USA de 1866 to 2019	10
Figure 2: Production et rendement du maïs-grain et du mélange maïs-épi dans certains pays de l'UE de 2015 à 2019	10
Figure 3: Les différentes parties aériennes de la plante de maïs et leur rapport de matière sèche	11
Figure 4: Modèle empirique calculé pour la prédiction du rendement en résidus pour le maïs en fonction du rendement économique en grains	11
Figure 5: Cannes de maïs laissées dans un champ après le passage de la moissonneuse-batteuse	12
Figure 6: Potentiel énergétique des résidus de maïs en Europe (2019)	13
Figure 7: Différentes utilisations finales des parties de la récolte de maïs	14
Figure 8: Pouvoir calorifique net en fonction de la teneur en eau (E.M.) des cannes de maïs	16
Figure 9: Technologies de récolte du maïs en grain avec des flux de résidus de maïs	17
Figure 10: Récolte du maïs avec la moissonneuse-batteuse équipée d'une barre de coupe	18
Figure 11: Formation de résidus de maïs derrière la moissonneuse-batteuse	19
Figure 12: Schémas technologiques pour la récolte des cannes de maïs	20
Figure 13: Modèles de machines agricoles pour la récolte des sous-produits du maïs	21

Figure 14: Chaîne d'approvisionnement en canne de maïs de l'usine d'éthanol cellulosique de DuPont	22	Figure 21: Balles de résidus de maïs dans l'installation de stockage de la biomasse de la centrale électrique de Miajadas	32
Figure 15: Programme d'exploitation de l'usine de bioéthanol cellulosique de DuPont	23	Figure 22: Procédé de production de bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique	33
Figure 16: Chaînes d'approvisionnement en cannes de maïs déchiquetées	24	Figure 23: Schéma du prétraitement de la matière lignocellulosique pour la production de biogaz	36
Figure 17: Récolteuses de rafles de maïs	25	Figure 24: Dépendance du taux d'enlèvement des résidus de maïs par rapport à l'économie, aux facteurs limitants et aux stratégies agronomiques	38
Figure 18: Stockage en plein air de balles de cannes de maïs en Espagne.....	26	Figure 25: Réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce à l'utilisation alternative de la canne de maïs par rapport à la moyenne du réseau américain	39
Figure 19: Chargement de cannes de maïs dans le village de Krynichnoe	28		
Figure 20: Miajadas-Centrale Biomasse 15 MW	32		

INTRODUCTION

Le maïs est l'une des cultures les plus importantes au monde. C'est une plante d'origine tropicale, très productive et de fixation du carbone en C4. Elle est originaire de la région andine d'Amérique centrale, ce qui explique le besoin de chaleur pour sa croissance et son développement. En peu de temps, le maïs produit plus de matière organique que les autres cultures. Cette céréale est cultivée pour le grain et le fourrage (ensilage ou directement consommé par les animaux sans ensilage). Le terme maïs est souvent utilisé dans le sens de "grain de maïs", dont la production mon-

diale était de 972 à 1123 Mt par an en 2015-2019. Au cours de la campagne de commercialisation (CC) 2019/2020, l'UE a produit 65 Mt de maïs, soit près de 6 % de la production mondiale. En Ukraine, la production de maïs a dépassé la production de blé, et le maïs est devenu une culture principale dans le pays par la récolte brute. Les importantes propriétés du maïs sont à l'origine de sa demande élevée et constante sur le marché mondial et européen. Le rendement moyen du maïs a été supérieur à 7 t/ha dans l'UE et en Ukraine ces dernières années.

En plus des grains, une quantité considérable de résidus de maïs (tiges, feuilles, épis, cosses, etc.) se forme. Ils peuvent être récoltés et utilisés à différentes fins comme agrobiomasse, y compris la bioénergie. Collectés et prélevés dans les champs, les résidus de maïs sont considérés comme des sous-produits du maïs.

Par exemple, ils peuvent être utilisés comme matière première pour la production de biocombustibles solides, de biogaz et de biocarburants liquides de deuxième génération. Aujourd'hui, les résidus de maïs constituent une ressource renouvelable importante, sous-utilisée et locale, qui pourrait contribuer à la réalisation des objectifs européens en matière d'énergie et de climat tout en favorisant le développement rural et l'économie circulaire.



Les résidus de maïs ont des propriétés combustibles spécifiques qui nécessitent l'utilisation de chaudières spécialement conçues pour brûler ce type d'agrocombustibles. L'utilisation économiquement viable de cette biomasse dépend également de la chaîne de valeur appropriée "récolte - logistique - stockage". Ces

questions et le potentiel énergétique des résidus de maïs dans l'UE et en Ukraine, la possibilité de transformer cette agrobiomasse en pellets/briquettes, biogaz et biocarburant liquide de deuxième génération, ainsi que les aspects de durabilité sont décrits dans ce guide.

LES RÉSIDUS DE MAÏS COMME SOURCE D'ÉNERGIE

LE MAÏS DANS LA PRODUCTION AGRICOLE

Le maïs domine la production agricole mondiale en raison de la possibilité de le cultiver en de nombreux endroits avec des rendements élevés, et également de la demande croissante pour la production d'une large gamme de produits, y compris les biocarburants. Dans le monde, environ 60 % du bioéthanol est produit à partir du maïs¹. En 2019, aux États-Unis, près de 30 % du maïs (105,6 Mt) a été utilisé pour la production de la première génération de bioéthanol².

Les États-Unis sont le leader mondial de la production et des rendements de maïs (tableau 1). L'UE est le 4^{ème} producteur mondial de maïs, et l'Ukraine se classe au 6^{ème} rang. Selon les données préliminaires, la production de maïs aux États-Unis en 2020/2021

MY était de 358,5 Mt (32% de la production mondiale) et le rendement moyen était de 10,8 t/ha. Dans les autres pays, la production de maïs en 2020/2021 MY était la suivante : Chine - environ 260,7 Mt, Brésil - 87 Mt, UE - 67,1 Mt, Argentine - 50,5 Mt, Inde - 31,5 Mt et Ukraine - 30,3 Mt. Les prévisions de l'USDA³ pour la campagne 2021/2022 sont plus importantes que l'année précédente : 70,4 Mt pour l'UE et de 40,0 pour l'Ukraine. Il convient de noter que dans l'UE, le maïs vert, cultivé principalement pour l'ensilage, occupe une grande superficie. Ainsi, en 2019, la superficie de maïs vert récolté était de 6,4 millions d'hectares, tandis que la superficie de maïs grain et de maïs-mix était de 8,9 millions d'hectares⁴. La superficie totale consacrée au maïs représentait près de 14,5 % des terres arables dans l'UE28, et plus de 18,5 % en Ukraine.

TABLE 1:

Principaux producteurs de maïs dans le monde au cours des 5 dernières années (par MY)⁶

N°	Pays / Region	Surface, Mha					Rendement, t/ha					Production, Mt				
		2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
1	USA	33.5	32.9	32.9	33.3	34.4	11.1	11.1	10.5	10.8	11.1	371.1	364.3	346.0	358.5	382.6
2	Chine	42.4	42.1	41.3	41.3	43.3	6.1	6.1	6.3	6.3	6.5	259.1	257.2	260.8	260.7	272.6
3	Brésil	16.6	17.5	18.5	19.9	20.8	4.9	5.8	5.5	4.4	5.7	82.0	101.0	102.0	87.0	118.0
4	UE	8.3	8.3	8.9	9.3	9.4	7.5	7.8	7.5	7.2	7.5	62.0	64.4	66.7	67.1	70.4
5	Argentine	5.2	6.1	6.3	6.4	6.8	6.2	8.4	8.1	7.9	8.0	32.0	51.0	51.0	50.5	54.5
6	Ukraine	4.4	4.6	5.0	5.4	5.4	5.4	7.8	7.2	5.6	7.4	24.1	35.8	35.9	30.3	40.0
7	Inde	9.4	9.0	9.6	9.9	9.7	3.1	3.1	3.0	3.2	3.1	28.8	27.7	28.8	31.5	30.0
8	Mexique	7.3	7.2	6.6	7.1	7.3	3.8	3.8	4.0	3.8	3.8	27.6	27.6	26.7	27.4	28.0
	Monde	192.2	192.1	193.6	198.8	203.0	5.6	5.9	5.8	5.7	6.0	1080	1123	1120	1123	1209

NOTES: 2020/2021 MY : Données prévisionnelles – Projection (December 2021).

¹ OECD FAO Agricultural Outlook 2019 2028. <http://www.fao.org/3/ca4076en/ca4076en.pdf>

² World of corn 2020. <http://www.worldofcorn.com/pdf/WOC-2020.pdf>

³ World Agricultural Production, USDA Reports <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>

⁴ Eurostat <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>

L'augmentation des rendements du maïs au cours des dernières décennies (Fig. 1) est liée au développement de la science agricole et à l'utilisation de la biotechnologie pour la formation d'hybrides. Lors de tests comparatifs, les agriculteurs américains ont réussi à atteindre des rendements de maïs au niveau de plus de 25,0 t/ha. En 2019, l'Association nationale des producteurs de maïs des États-Unis a annoncé le record mondial en Virginie près de 38,7 t/ha (616,2 boisseaux/acre) de maïs grain⁵. La croissance du rendement mondial moyen du maïs (2016-2018) de 14 % est prévue jusqu'en 2028⁴.

La répartition du rendement réel et de la production récoltée de maïs grain et de mélange-maïs-épis dans les pays de l'UE28 est présentée à la figure 2, le maïs grain prédomine. Les principaux producteurs de maïs étaient la Roumanie (17,3 Mt en 2019), la France (13,0 Mt en 2019) et la Hongrie (8,3 Mt en 2019). De 2015 à 2019, le rendement moyen le plus élevé du maïs grain et du mélange maïs-épi a été atteint en Espagne (11,6 t/ha), en Grèce (10,3 t/ha), en Autriche et en Italie (10,1 t/ha).

LES RÉSIDUS DE MAÏS

Le principal produit de la culture du maïs grain est le grain, qui constitue la raison économique de l'activité des agriculteurs. En outre, la plante de maïs est constituée de différentes parties souterraines et aériennes (Fig. 3), qui forment les résidus de maïs. Il est important de noter que pour le maïs, la ration résidu/grain est nettement plus élevée que pour les autres céréales. Selon les données expérimentales, la formation de bio-

masse dans les feuilles et les tiges du maïs peut être élevée même dans des conditions de stress hydrique modéré, ce qui fait de cette culture une source importante de biomasse de résidus agricoles⁷. Le rapport entre le rendement en résidus (R) et le rendement en grains (Y) du maïs (R/Y) dépend de nombreux facteurs, principalement de la variété de la plante, des pratiques agricoles, du climat et des conditions de terrain⁸. En général, ce rapport (R/Y) diminue avec l'augmentation du rendement en maïs (Fig. 4), mais la relation entre le rendement en résidus et le rendement en maïs est faible. Il est pratique d'utiliser le ratio standard R/Y. Par exemple, en Ukraine, le R/Y typique est de 1,3. Pendant la récolte, la teneur en eau du grain de maïs et des résidus de maïs peut être différente, et l'approche décrite n'en tient pas compte. On utilise souvent un indice de récolte (IR) pour évaluer le rendement des résidus : le rapport entre le grain et la biomasse totale se réfère toujours au poids de la matière sèche. Aux États-Unis, l'indice de récolte fluctue généralement autour de 0,50⁹ ce qui correspond à R/Y = 1.

Différentes corrélations pour l'estimation du rapport R/Y basé sur le rendement en grains sont proposées dans la littérature scientifique. Dans ce guide, l'équation donnée par Bentsen et al.¹⁰ est utilisée pour l'évaluation du potentiel de biomasse des résidus de maïs, car elle est considérée comme fournissant une bonne correspondance avec les observations expérimentales :

$$R/Y = 2.656 \cdot \exp(-0.103 \cdot Y),$$

où R/Y et Y sont tous deux exprimés en t/ha de matière sèche.

⁵ <https://www.ocj.com/2019/12/2019-national-corn-yield-contest-hits-new-yield-record/>

⁶ https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/croprtr18.pdf

⁷ Camia A., Robert N., Jonsson R., Pilli R., García-Condado S., López-Lozano R., van der Velde M., Ronzon T., Gurria P., M'Barek R., Tamosiunas S., Fiore G., Araujo R., Hoepffner N., Marelli L., Giuntoli J., Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment, EUR 28993 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN978-92-79-77237-5, doi:10.2760/539520, JRC109869

⁸ Maximising the yield of biomass from residues of agricultural crops and biomass from forestry. Final report of Ecofys project. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Ecofys%20-%20Final_%20report_%20EC_max%20yield%20bio-mass%20residues%2020151214.pdf

⁹ https://www.canr.msu.edu/news/harvest_index_a_predictor_of_corn_stover_yield

¹⁰ Bentsen NS, Felby C, Thorsen BJ. Agricultural residue production and potentials for energy and materials services. *Progr Energy Combustion Sci* 2014;40:59–73. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.09.003>

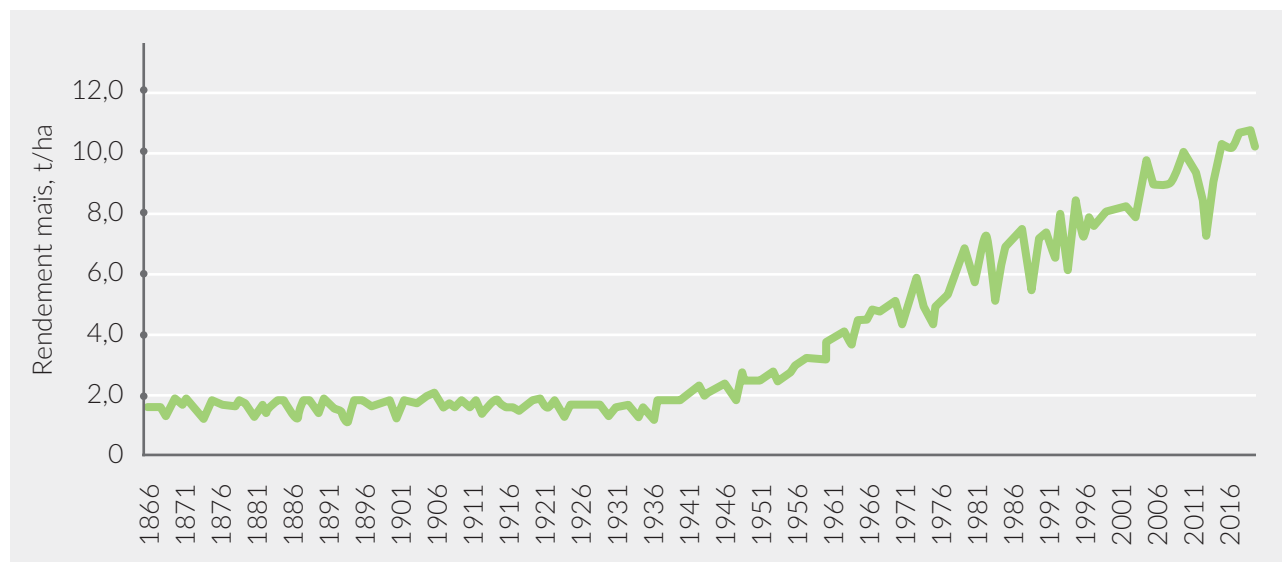


FIGURE 1:
Rendement du maïs aux USA de 1866 to 2019⁶

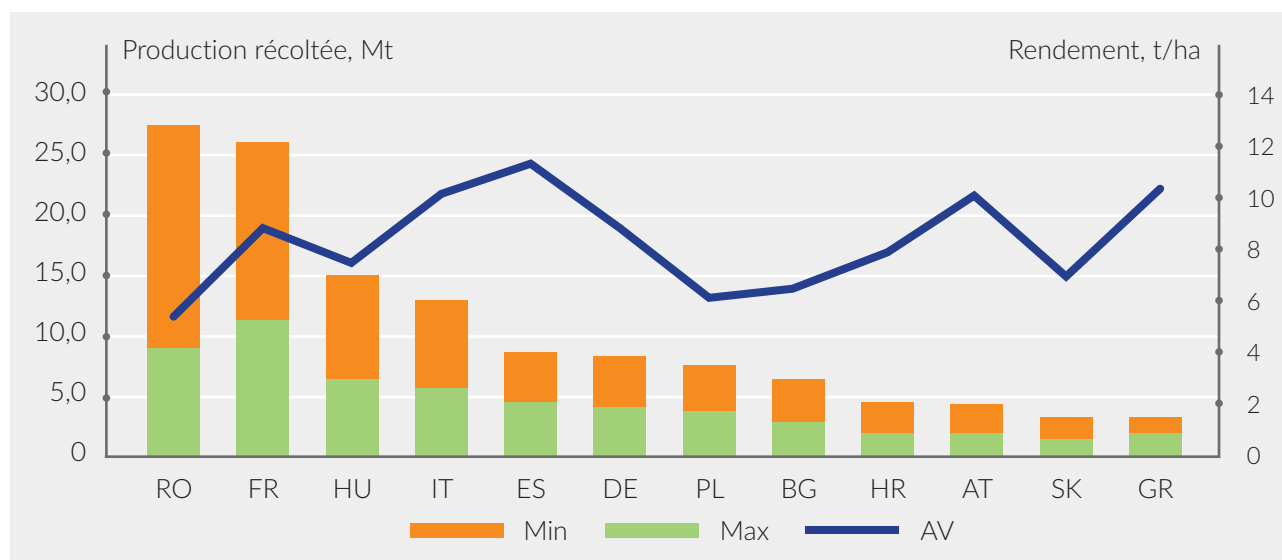


FIGURE 2:
Production et rendement du maïs-grain et du mélange maïs-épi dans certains pays de l'UE de 2015 à 2019.
(Source: Eurostat online data code: TAG00093, UABIO elaboration).

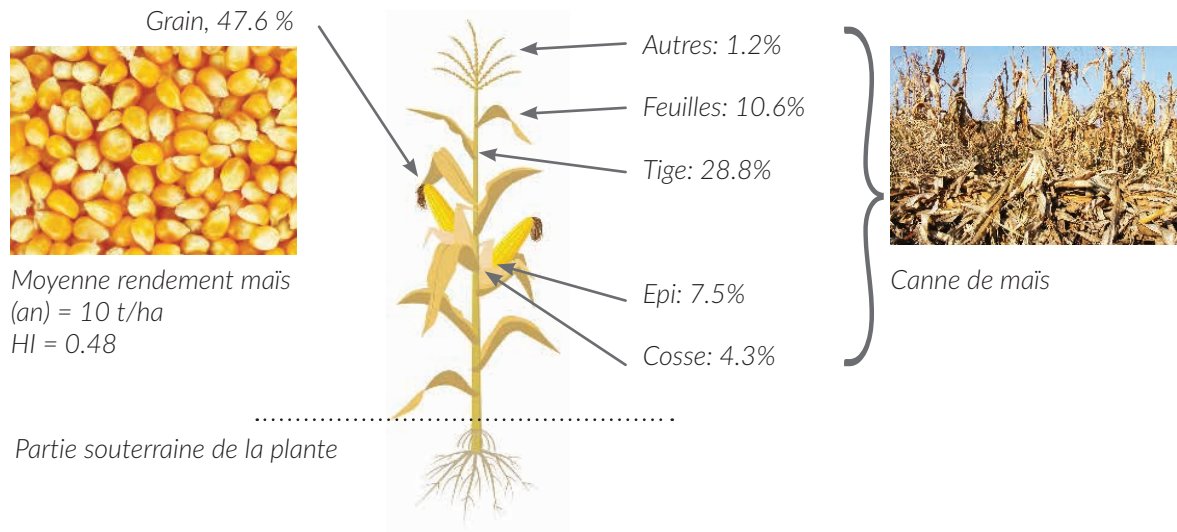


FIGURE 3:
Les différentes parties aériennes de la plante de maïs et leur rapport de matière sèche¹¹

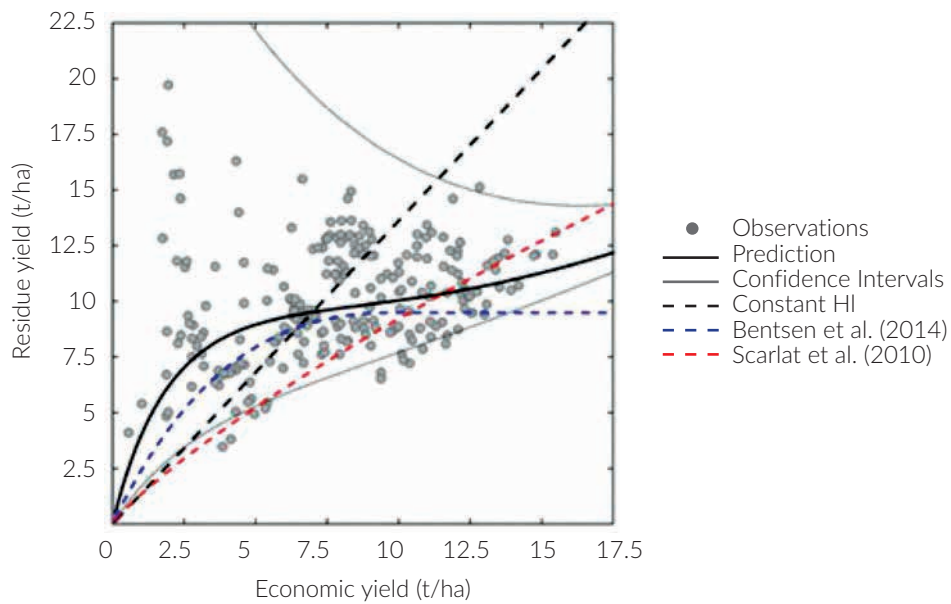


FIGURE 4:
Modèle empirique calculé pour la prédiction du rendement en résidus pour le maïs en fonction du rendement économique en grains¹²

¹¹ David Ertl Sustainable corn stover harvest / Iowa Corn Promotion Board, 2013. – 18 p.
https://www.researchgate.net/publication/319493290_Sustainable_Corn_Stover_Harvest_A_publication_of_the_Iowa_Corn_Promotion_Board

¹² García-Condado S, López-Lozano R, Panarello L, et al. Assessing lignocellulosic biomass production from crop residues in the European Union: modelling, analysis of the current scenario and drivers of interannual variability. GCB Bioenergy. 2019;00:1–23. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12604>



FIGURE 5:

Cannes de maïs laissées dans un champ après le passage de la moissonneuse-batteuse

Les résidus aériens (cannes de maïs) peuvent être partiellement collectés en tant que sous-produits du maïs ayant une valeur commerciale (Fig. 5). Le reste des parties aériennes et des parties souterraines du maïs sont laissées dans le champ comme résidus de culture, qui jouent le rôle d'engrais organiques. Les bonnes pratiques de gestion des résidus sont essentielles pour la qualité du sol. Les taux appropriés d'enlèvement des résidus de culture doivent être basés sur le niveau minimum de résidus de culture qui doit être conservé sur la terre pour maintenir la qualité du sol, la matière organique du sol, et réduire le risque d'érosion¹³. Les aspects de durabilité pour la récolte des sous-produits du maïs sont décrits dans le chapitre "Aspects de durabilité de l'utilisation des résidus de maïs" de ce guide. Les données rapportées dans la littérature sur les taux d'élimination durable des résidus de maïs vont de 25% à 70%. Dans cette évaluation du potentiel énergétique de la biomasse, le taux d'élimination de 40% pour les résidus de maïs est considéré.

La production de résidus agricoles, dont les résidus de maïs, est saisonnière et dépend des périodes de récolte. Le maïs grain est récolté à différentes périodes, en fonction de la variété, du lieu de culture et de la date de semis. En général, la période de récolte du maïs est déterminée par le niveau d'humidité du grain, donc avant la récolte, les agriculteurs déterminent le taux d'humidité du grain et sa maturité, en tenant compte des conditions de semis et du groupe de maturité de l'hybride. La teneur en eau des différentes parties du maïs n'est pas homogène et diminue rapidement après 120 jours à compter de la date de semis¹⁴. En Europe, la période typique de récolte des grains de maïs se situe entre septembre et novembre. Il convient de noter que certains agriculteurs récoltent le maïs en décembre, janvier, voire plus tard. Toutefois, cela n'est pas dû à des exigences agro-techniques mais à certains besoins de production et à la faisabilité économique. Pendant la période de récolte, les cannes de maïs sont souvent plus humides ($W > 30\%$) que

¹³ Nicolae Scarlat, Milan Martinov, Jean-François Dallemand Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use / Waste Management, Volume 30, Issue 10, October 2010, Pages 1889-1897. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.016>

¹⁴ C. Igathinathane, Alvin R.Womac, Shahab Sokhansanj, Lester O.Pordesimo. Vertical Mass and Moisture Distribution in in Standing Corn Stalks // 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting (Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 August, 2004). – 20 p.

les grains (l'humidité standard de l'UE est de W14%), mais après la récolte des grains, l'humidité des résidus s'évapore intensivement, par exemple lié au vent. En outre, la teneur en humidité des résidus de maïs dépend fortement des conditions météorologiques lors de la récolte, et des pluies intenses peuvent entraîner des conditions très défavorables pour la récolte de la biomasse destinée à des applications énergétiques.

Le pouvoir calorifique net (base sèche) de 17.5 MJ/kg¹⁵ a été utilisé pour le calcul du potentiel énergétique des résidus de maïs. (Fig. 6). La répartition du potentiel énergétique des résidus de maïs en Europe n'est pas uniforme. En 2019, la plus grande concentration de résidus de maïs, avec l'équivalent énergétique de 302,5 PJ, se trouvait en Ukraine. Dans l'UE, les leaders étaient la Roumanie (155,2 PJ), la France (97,5 PJ) et la Hongrie (64,8 PJ). Le potentiel énergétique total des résidus de maïs dans l'UE28 était de 557,9 PJ en 2019. Il existe également un potentiel important dans des pays comme l'Espagne, la Grèce, la Belgique, l'Autriche et la Turquie.

Le potentiel énergétique des résidus de maïs est en fait déterminé par les agriculteurs. Ils assureront une

récolte durable des cannes de maïs s'ils y trouvent un intérêt économique. Le coût des sous-produits du maïs sur le marché dépend des caractéristiques de l'agro-biomasse, qui sont importantes pour les utilisateurs finaux. Les différentes parties des sous-produits du maïs ont des caractéristiques physico-chimiques différentes, mais en général, il s'agit de biomasse lignocellulosique. Les principaux modes d'utilisation des grains et résidus de maïs sont présentés à la figure 7. Les cannes de maïs ont une valeur nutritive relativement faible, en particulier les tiges de maïs, qui sont considérées comme du fourrage de faible qualité¹⁶. La valeur nutritive des feuilles et de la cosse de maïs est plus élevée que celle des tiges et des épis de maïs, mais elles ne sont pas encore utilisées en grande quantité. Actuellement, les cannes de maïs sont principalement laissées sur le terrain, labourées et incorporées au sol. Il est à noter que dans certains territoires, les résidus de culture, y compris les résidus de maïs, sont brûlés dans les champs, ce qui entraîne de nombreuses conséquences négatives pour l'environnement¹⁷. Ainsi, les ressources existantes de sous-produits du maïs pourraient être utilisées comme agrobiomasse pour la production de biocombustibles solides, de bioéthanol de 2^{ème} génération et de biogaz.



FIGURE 6:
Potentiel énergétique des résidus de maïs en Europe (2019)

¹⁵ Caroline Schneider, Hanz Hartmann Maize as energy crop for combustion. Agricultural optimization of fuel supply. TFZ, 2006. http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/09_bericht.pdf

¹⁶ Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products. Report of the AgroCycle project. 2016. http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

¹⁷ Vladislav Zekić, Vesna Rodić, Milenko Jovanović Potentials and economic viability of small grain residue use as a source of energy in Serbia. Biomass and Bioenergy, 2010. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.07.012

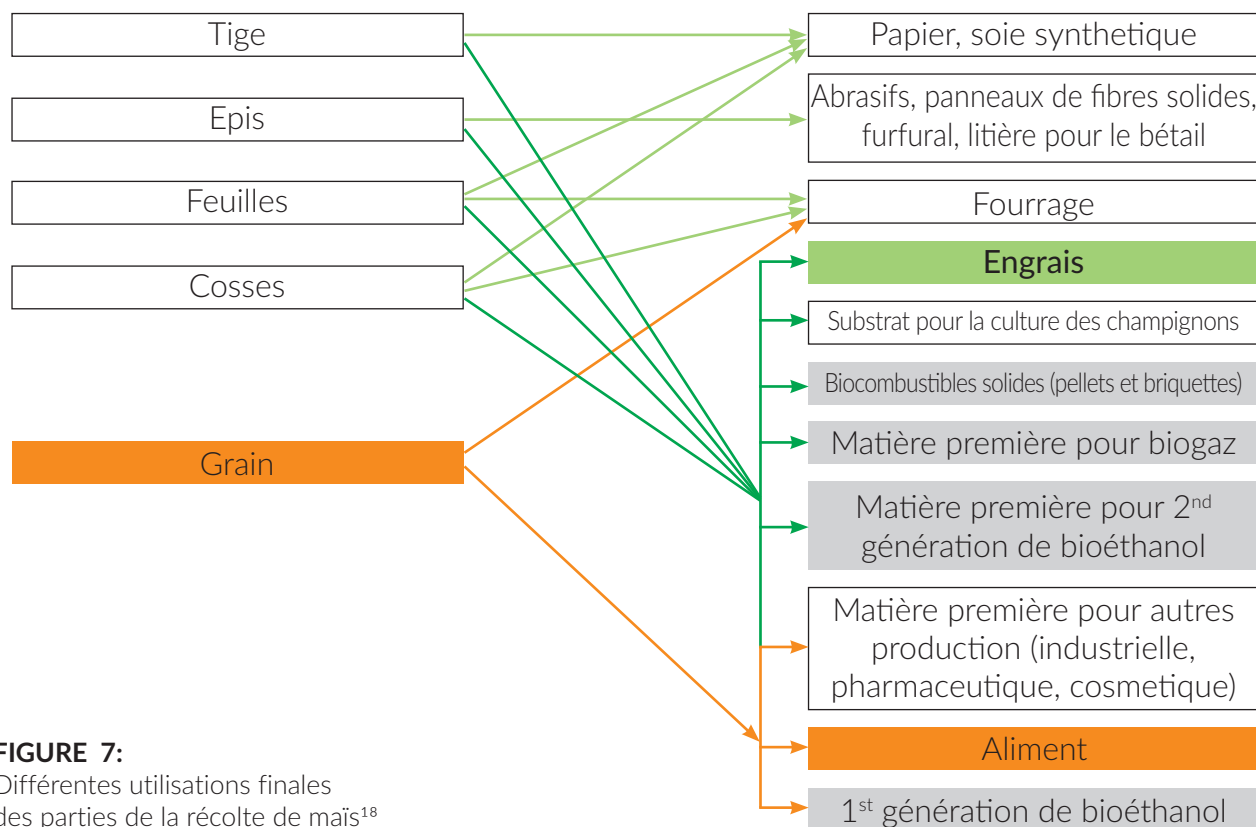


FIGURE 7:
Différentes utilisations finales
des parties de la récolte de maïs¹⁸



¹⁸ Position paper UABIO N 23 (2020) "Analysis of pellets and briquettes production from corn residues"
<https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/05/position-paper-uabio-20-en.pdf>

PROPRIÉTÉS ÉNERGÉTIQUES DES RÉSIDUS DE MAÏS

D'une manière générale, les résidus de maïs ont des propriétés combustibles délicates pour la combustion, qui sont toutefois meilleures que celles de la paille de céréales. Dans tous les cas, lors du choix d'une chaudière pour les résidus de maïs, il faut tenir compte des caractéristiques réelles du combustible des résidus de maïs fournis et des exigences des fabricants de chaudières. Une comparaison des propriétés du combustible des résidus de maïs avec celles des autres résidus agricoles et des copeaux de bois est présentée dans le tableau 2.

TABLE 2:

Comparaison des propriétés indicatives du combustible des fractions de résidus de maïs avec différents assemblages de biomasse

Paramètres	Unités	Paille jau ^{e1}	Paille grise ¹	Rafle de maïs ²	Tige de maïs ³	Copeaux de bois ¹
Teneur en humidité	%	10-20	10-20	12.5	10-18	40-50
Valeur calorifique nette	MJ/kg	14.4	15	15.2	15-17	10.4
Teneur en cendres	%wt	4	3	2.2	5-6.5	1
Carbone	%wt	42	43	41.3	41	50
Hydrogène	%wt	5	5	5.2	5.1	6
Oxygène	%wt	37	38	38.8	38	38
Chlore	%wt	0.75	0.2	0.14	0.13	0.02
Nitrogène	%wt	0.35	0.41	0.5	0.84	0.3
Souffre	%wt	0.16	0.13	0.08	0.09	0.05
Potassium (métaux acalins)	%wt dry	1.03*	0.61**	0.48-1.02	0.61	0.14***
Température de déformation des cendres	°C	930*	905**	790-1200 (1033 mean value)	820-1160 (1070 mean value)	1270***

¹ De la paille à l'énergie. Technologies, politique et innovation au Danemark. Deuxième édition (https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2021/02/AgroBioHeat_Paille_%C3%A0_%C3%A9nergie_FR_highres.pdf).

² Données agrégées de la base de données Phyllis (<https://phyllis.nl/>); Brunner et al., 2011¹⁹; Brunner et al., 2021²⁰; Antonenko et al., 2018²¹; AgroCycle. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf.

³ Données agrégées de la base de données (<https://phyllis.nl/>); Antonenko et al., 2018²¹; AgroCycle. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

* Valeur moyenne pour la paille de blé (Danemark) Base de données Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

** Valeur moyenne pour la paille de blé (Danish, météo) Base de données Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

*** Valeur moyenne pour le bois non traité- Base de données Phyllis (<https://phyllis.nl/>).

¹⁹ Brunner, T., Kanzian, W., Obernberger, I., & Theissl, A. (2011). Combustion properties of maize cobs – results from lab and pilot-scale tests. In *Proceedings of the 19th European Biomass Conference & Exhibition* (pp. 944-951).

²⁰ Brunner, T., Nowak, P., Mandl, C., Obernberger, I. (2021). Assessment of agrobiomass performance in state-of-the-art residential boilers. In *Proceedings of the 29th European Biomass Conference & Exhibition* (pp. 379-388).

²¹ V.O. Antonenko, V.I. Zubenko, O.V. Epik Fuel properties of Ukrainian corn stover. DOI <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.11>

La composition élémentaire des résidus de maïs est presque la même que celle de la paille des cultures céréalières en épi, de sorte qu'ils ont un pouvoir calorifique comparable. Les propriétés de la paille dépendent fortement du lieu de culture, de la période et du temps de récolte, du sol et des engrais²².

La teneur en cendres des cannes de maïs est un facteur de qualité important pour la production ultérieure de biocombustibles. La teneur en cendres dépend du type de technologie de récolte, car la quantité de cendres augmente lorsque la biomasse entre en contact avec le sol. Pour cette raison, il existe deux types de cendres: les cendres structurales et les cendres non structurales²³. Les cendres structurales sont constituées de substances inorganiques contenues dans la biomasse végétale. La teneur habituelle en cendres structurales des cannes de maïs est de 3,5 %. Les cendres non structurales sont des substances inorganiques (principalement de la terre) qui pénètrent dans la paille pendant la récolte, en particulier lors de la formation des andains et du pressage. La teneur en cendres totales habituelle lors des passages multiples des machines agricoles lors de la récolte est de 8 à 10 %.

En ce qui concerne le comportement de fusion des cendres, certains échantillons de résidus de maïs sont plus proches de la biomasse ligneuse, ce qui offre de meilleures conditions de combustion par rapport à la paille des cultures céréalières en épi. À titre de comparaison, la température de déformation des cendres pour le bois est d'environ 1270 C, alors qu'elle est de 790-1200 C pour les épis/rafles de maïs et de 820-1160 C pour les tiges de maïs (voir le tableau 2). En outre, les tiges de maïs contiennent moins de chlore (0,13 %) que la paille fraîche ("jaune") des cultures céréalières dopées (0,75 %). C'est un facteur positif pour les résidus de maïs comme combustible car les composés chlorés provoquent la corrosion des éléments en acier des équipements énergétiques.

La teneur en humidité a une influence cruciale sur le pouvoir calorifique des résidus de maïs. Le diagramme de la dépendance du pouvoir calorifique net de la teneur en eau des cannes de maïs, qui est basé sur l'équation (2.2) du manuel²⁴, est présenté à la figure 8.

Pour obtenir une teneur en eau relativement faible des sous-produits du maïs, il est essentiel de choisir une stratégie de récolte et de logistique appropriée.

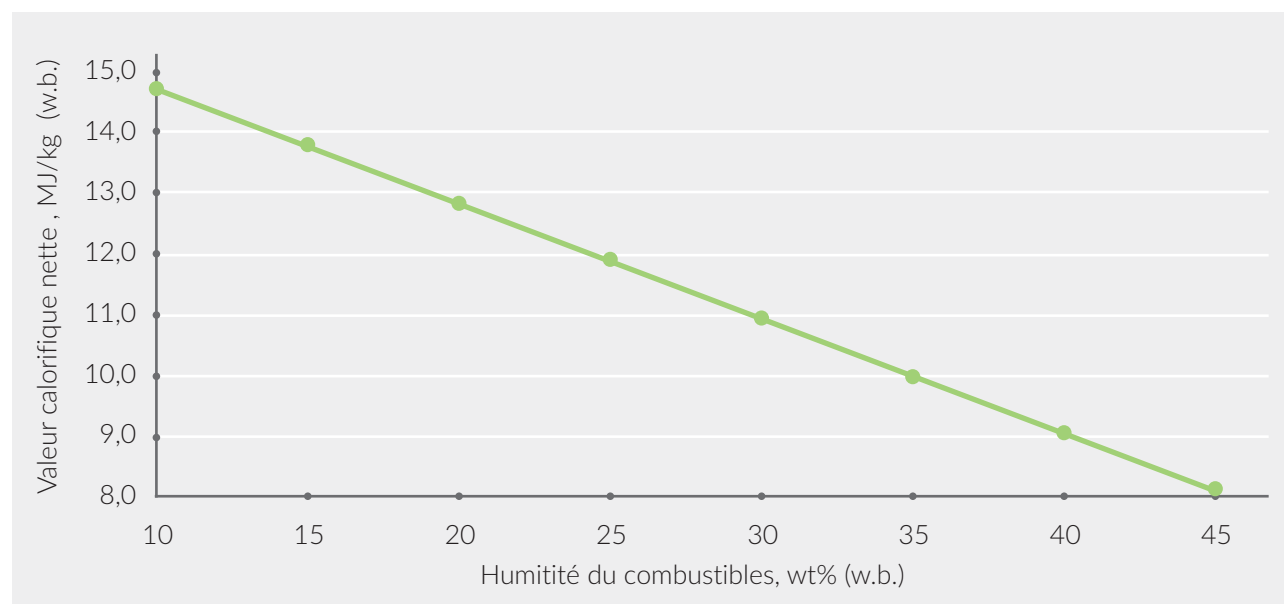


FIGURE 8:
Pouvoir calorifique net en fonction de la teneur en eau (E.M.) des cannes de maïs

²² Vyll Varesa. *Handbook for biofuel consumer* // Tallinn: Tallinn Technology University, 2005 – 183 p.

²³ Brittany Schon, Matt Darr. *Corn Stover Ash*. <https://store.extension.iastate.edu/Product/Corn-Stover-Ash>

²⁴ Van Loo, S.; Koppejan, J. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*; Earthscan: London, UK, 2008. – 465 p.

RÉCOLTE DES RÉSIDUS DE MAÏS

TECHNOLOGIES DE RÉCOLTE DES GRAINS DE MAÏS

La technologie de récolte du maïs grain a un impact direct sur les types de résidus de maïs qui peuvent être obtenus et sur la manière dont ils peuvent être collectés. Il existe trois principaux schémas technologiques pour la récolte du maïs grain (Fig.9):

1. Récolte du maïs grain avec moissonneuses-batteuses à maïs sans cueilleur :
 - 1.1. avec épluchage simultané des épis (séparation de l'enveloppe).
 - 1.2. sans épluchage des épis
2. Récolte du maïs grain avec des moissonneuses-batteuses équipées de cueilleurs ;
3. Collecte d'un mélange de grains et d'épis avec des moissonneuses-batteuses.

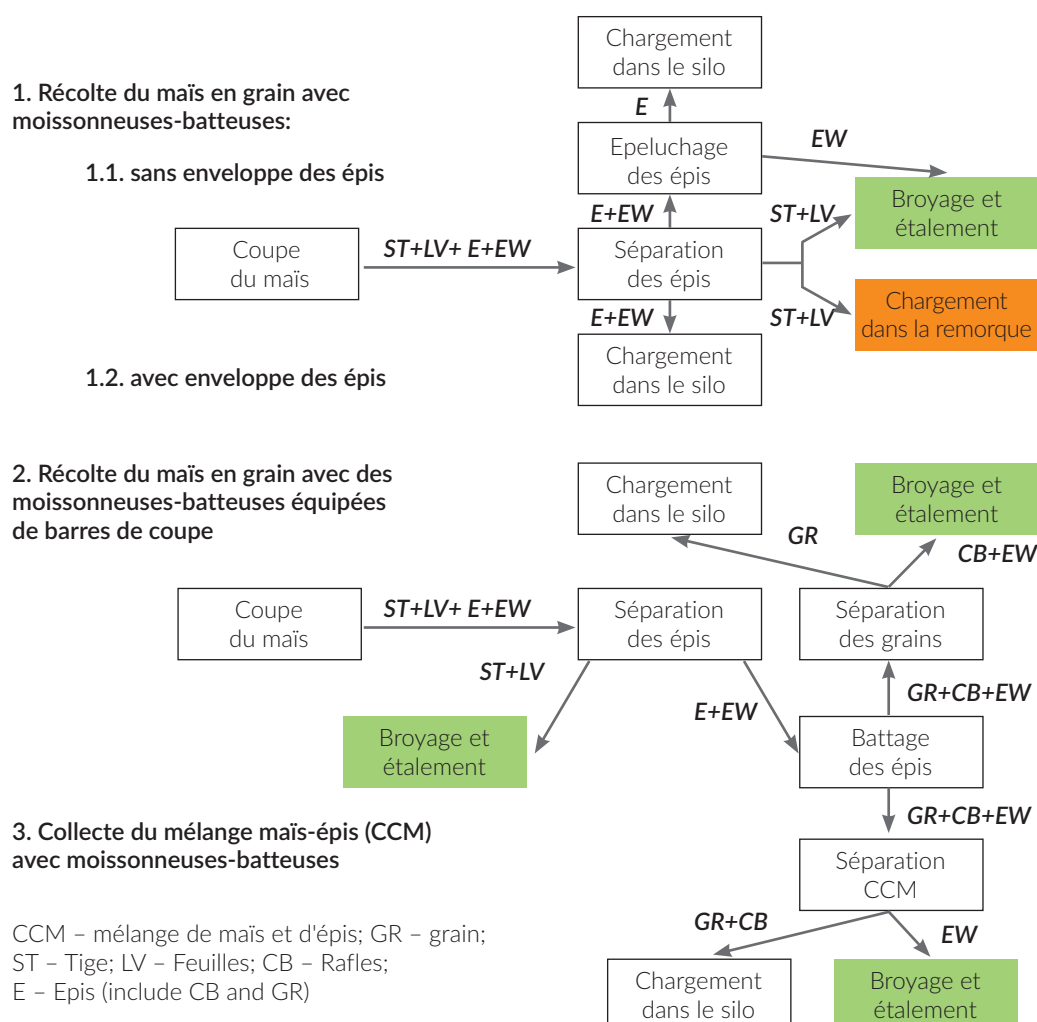


FIGURE 9:

Technologies de récolte du maïs en grain avec des flux de résidus de maïs²⁵

²⁵ UABio's Position Paper N 16 (2016) "Opportunities for harvesting by-products of grain corn for energy production in Ukraine"
<http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-16-en.pdf>



FIGURE 10:
Récolte du maïs avec la moissonneuse-batteuse équipée d'une barre de coupe

Le grain de maïs doit être récolté avec un taux d'humidité de 20 à 35-40%, tandis que le mélange maïs-épis doit être récolté avec un taux d'humidité de 40-50%. La récolte du maïs sans battage des épis commence lorsque l'humidité du grain est inférieure à 40%, avec battage des épis - avec moins de 30%. Avec un taux d'humidité plus élevé, le battage s'aggrave, le maïs s'abîme et la productivité des moissonneuses diminue. La meilleure qualité de battage a lieu lorsque l'humidité du grain est de 20-22%²⁶.

En Ukraine, dans les années 1980-1990, la technologie de récolte des grains de maïs était répandue, ce qui comprenait la collecte de tout le rendement biologique de la culture par l'utilisation de moissonneuses-batteuses SK-5M, Enisei-1200, Don-1500, et KZS-9-1 avec des collecteurs spéciaux PPK-4, KMD-6, PZKS-6 produits par l'usine "Khersonmash". Ces collecteurs transmettent les cannes de maïs broyées à la remorque.

Actuellement, la principale méthode de récolte du maïs grain commercial est le battage des épis dans le champ, le déchiquetage et l'épandage de la biomasse coupée à l'aide de moissonneuses-batteuses équipées de cueilleurs de maïs (Fig. 10). Cette méthode de récolte du maïs grain est la plus économiquement réalisable. Par rapport à la récolte des épis, elle permet de réduire de 1,8 à 2 fois les coûts de main-d'œuvre et de 20 à 25 % la consommation de carburant²⁷. Seuls certains agriculteurs (principalement les usines de semences) récoltent le maïs sous forme d'épis non battus avec le battage stationnaire suivant, ce qui permet de récolter les épis. Les usines de semences cultivent le maïs pour obtenir des semences de maïs (hybride) comme matériel de plantation. Par rapport à l'UE, la collecte du mélange maïs-épis avec des moissonneuses-batteuses n'est pas encore très répandue en Ukraine.

²⁶ V.D. Hrechkosii, M.D. Dmytryshak, R.V. Shatrov and other. *Complex mechanization of grain production: Textbook* // K: Ltd. "Nilan-Ltd", 2012 – 288 p.

²⁷ Cherenkov A.V., Tsykov V.S., Dziubetskyi B.V., Shevchenko M.S. et al. *Intensification of corn technologies – a guarantee for yield stabilization at 90-100 m.c./ha level (practical recommendations)* // Dnepropetrovsk: NU Institute of Steppe zone agriculture NAASU, 2012 – 31 p.

MÉTHODES DE RÉCOLTE POUR LES RÉSIDUS DE MAÏS

Lors de la récolte des céréales avec une moissonneuse-batteuse équipée d'un bec à maïs, les restes de plantes sont redistribués comme suit (figure 11) : restes de chaume (10% du poids des céréales), restes derrière le bec à maïs (96% du poids des céréales) et

derrière la moissonneuse-batteuse (24% du poids des céréales). Il convient de noter que les cueilleurs de maïs nécessitent beaucoup plus de puissance que les cueilleurs de grains. En général, elle est de 7,5 kW (10 CV) par rangée et une puissance supplémentaire de 2,3 kW (3 CV) par rangée est requise au niveau du cueilleur si des accessoires de broyage des tiges sont installés²⁸.

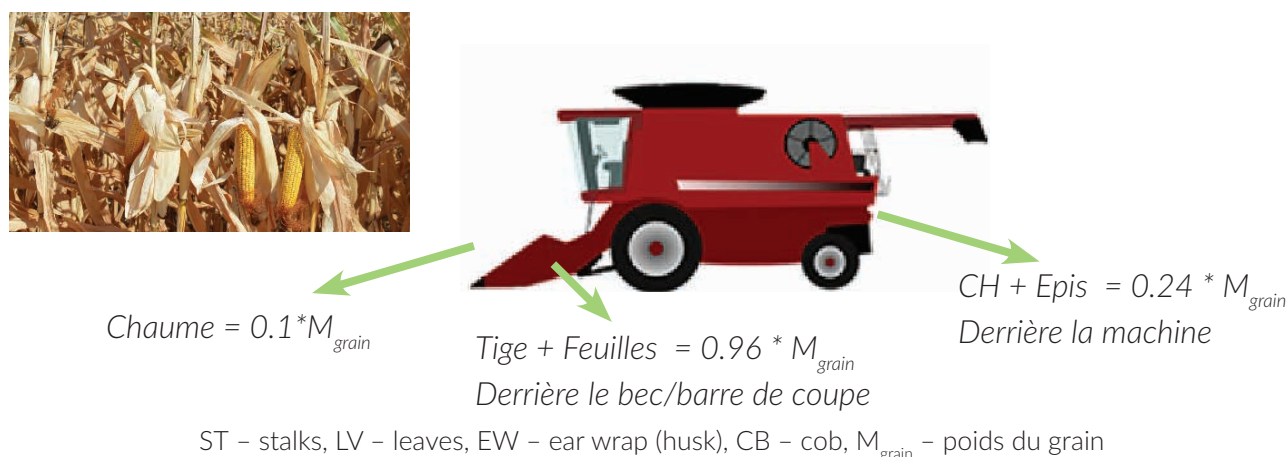


FIGURE 11:

Formation de résidus de maïs derrière la moissonneuse-batteuse

Le pressage de la biomasse en balles, du fait que les matières premières se compactent plus de 4 fois (de 40 kg/m³ à plus de 160 kg/m³), contribue à accroître l'efficacité logistique et à réduire la surface de stockage nécessaire. Les schémas technologiques pour la récolte des résidus de maïs peuvent être divisés en 4 types principaux pour les balles:

1. Système de récolte en un seul passage: une presse à balles est attachée à une moissonneuse-batteuse qui permet de former des balles de sous-produits du maïs en même temps que le battage des grains (Fig. 12a).
2. Système à deux passages: une moissonneuse-batteuse équipée d'un cueilleur de maïs qui forme un andain de maïs, lequel est ensuite mis en balles avec une presse à balles attachée à un tracteur (Fig. 12b).
3. Système à trois passages: moissonneuse-batteuse + tracteur avec andaineur déchiqueteur de tiges + tracteur avec presse à grosses balles carrées (balles rondes) (Fig. 12c).
4. Système à plusieurs passages : moissonneuse-batteuse + tracteur avec broyeur + tracteur avec râteau +

tracteur avec presse à balles (Fig. 12d).

La teneur en cendres d'une canne de maïs typique récoltée selon une méthode à passages multiples se situe entre 8 et 12 % selon l'année et les conditions de culture, et se compose principalement de la dégradation du sol recueillie pendant le processus de mise en balles. La récolte en un seul passage produit une matière première de canne de maïs dont la teneur en cendres est inférieure à 4 % et ne permet jamais à la matière première d'atteindre le sol avant la formation d'une balle (figure 12a). Les moissonneuses-batteuses à passage unique subissent une perte de productivité de la récolte en raison du flux supplémentaire de biomasse qui les traverse. Les moissonneuses-batteuses conçues pour traiter des taux plus élevés de biomasse présentent une réduction de 30 % de la productivité à des taux de collecte de biomasse de 3,4 Mg/ha²⁹. La société AGCO produit le système de récolte Challenger à passage unique, qui est disponible sur le marché de certains pays, dont les États-Unis.

²⁸ Corn: Chemistry and Technology, Third Edition. Edited by Sergio O. Serna-Saldivar Woodhead Publishing and AACC International Press, 2018. – 690 p.

²⁹ J. Darr, K. Webster, A. Shah Machinery Innovations to Meet Industrial Biomass Harvesting Demands in Expanding United States Markets / Land.Technik AgEng 2013. Conference Proceedings, 2013. – 399-406 p.



a) Récolte en un seul passage avec presse à balle



b) Moissonneuse avec tête d'andaineur + tracteur avec presse à balles



c) Moissonneuse-batteuse + tracteur avec andaineur de tiges + tracteur avec balle



d) Moissonneuse-batteuse + tracteur avec broyeur de tiges + tracteur avec râteau + tracteur avec presse à balles

FIGURE 12:

Schémas technologiques pour la récolte des cannes de maïs³⁰

Pour une collecte et un pressage efficaces des sous-produits du maïs, il est important de former un andain à partir des résidus de maïs. Dans le système à deux passages, on utilise une moissonneuse-batteuse équipée d'un collecteur de maïs spécial qui forme un andain de résidus de maïs (Fig. 12b). Le cueilleur à maïs Geringhoff Mais Star Collect peut déchiqueter et répandre les feuilles et les tiges de maïs sur un champ ou les mettre dans l'andain. Au sommet de l'andain, on peut également ajouter les épis et les cosses broyés qui se forment après le broyage de la moissonneuse-batteuse. La société New Holland produit des

dispositifs - Cornrower™ pour former des andains, qui peuvent être fixés à la moissonneuse-batteuse. Des essais comparatifs sur le terrain de la récolte de la canne de maïs en un et deux passages ont montré que la productivité de la récolte des grains³¹ des systèmes à deux passages était inférieure de 9 % à celle de la configuration classique de la moissonneuse-batteuse. En outre, pour ces deux technologies de récolte, les agriculteurs doivent investir dans des équipements spéciaux (système de récolte à passage unique ou cueilleurs de grain), ce qui réduit la productivité de la récolte du grain de maïs.

³⁰ Report on "Analysis of utilisation of corn straw as an energy source" (2018). Prepared by SEC Biomass for EBRD under the Contract C38842/1018/5362.

³¹ K. J. Shinnars, R. G. Bennett, D. S. Hoffman Single- and two-pass corn grain and stover harvesting Transactions of the ASABE. 55(2): 341-350. (doi: 10.13031/2013.41372) @2012 <https://elibrary.asabe.org/login.asp?search=0&JID=3&AID=41372&CID=t2012&v=55&i=2&T=2>

En général, les agriculteurs ne disposent pas des ressources nécessaires pour assurer la récolte de la biomasse, car leur objectif est de produire du maïs grain. Les agriculteurs ont tendance à récolter le grain de maïs avec des moissonneuses-batteuses et des cueilleurs de maïs standard sans augmenter la durée de la campagne de récolte. Pour une récolte efficace des résidus de maïs, il est préférable d'engager une entreprise particulière, qui dispose de machines spéciales efficaces et qui collecte l'agrobiomasse de bonne qualité. Cela peut être réalisé dans des systèmes à trois passages et à plusieurs passages.

Dans le système à trois passages, le broyeur spécial, l'andaineur déchiqueteur de tiges (figure 12c), est utilisé pour le broyage et l'andainage des résidus de maïs. Dans ce cas, la moissonneuse-batteuse peut augmenter ses performances lors de la récolte du maïs grain. La société américaine Hiniker produit des machines de la série 5600 avec une largeur de 15, 20 et 30 pieds pour le déchiquetage et la mise en andains des résidus de culture. Pour garantir le poids linéaire élevé de l'andaineur et pour réduire le nombre de passages de la machine, les Hiniker 5610 et 5620 sont reliés par deux passages en un seul andaineur. Le broyeur avec une largeur de 30 pieds doit être attaché à un tracteur avec une puissance moteur de 200 CV.

Dans un système à passages multiples, on utilise un broyeur attaché à un tracteur pour broyer les résidus de maïs, qui sont ratissés par un râteau attaché au tracteur dans des andaineurs à l'étape suivante (Fig. 9d). Pour fonctionner avec des tiges de maïs, le râteau doit être équipé de dents plus solides par rapport à un râteau à foin. Comme pour les râteaux, le rendement de récolte des broyeurs de tiges peut être ajusté en modifiant la distance entre les couteaux de broyage et le sol. Étant donné que les déchiqueteurs de tiges ont moins l'occasion d'entrer en contact avec le sol, la contamination du sol ou le niveau de cendres de la canne de maïs produite avec un andaineur de déchiquetage de tiges est généralement inférieur à celui d'un andaineur à râteau³².

Pour éviter les pertes de matière sèche et la détérioration de la qualité de la biomasse, les balles doivent

être rapidement retirées d'un champ et mises en tas pour le stockage. Par exemple, une remorque auto-chargeuse 16K Plus Bale Runner ramasse 12 grandes balles de 1,2 m de largeur et 0,9 m de hauteur en un seul passage et est montée sur un tracteur de 180 ch. Aux États-Unis, on utilise également des empileurs automoteurs spéciaux. La machine Stinger Stacker 6500 a un moteur de 305 ch, une transmission automatique à 6 vitesses et peut, en une heure, ramasser, sortir et empiler 80-120 grandes balles rectangulaires.

Parmi ces technologies, le système à trois passages (Fig. 12c) est plus applicable aux conditions européennes en raison de la possibilité d'utiliser des machines standard disponibles pour les producteurs agricoles et d'un moindre contact de la biomasse avec le sol. À différentes étapes du processus de récolte, différents modèles d'équipement peuvent être utilisés. Quelques exemples de ces machines sont présentés à la figure 13. L'annexe I contient de plus amples informations sur les machines destinées à la récolte, à la logistique des résidus de maïs et à leur transformation en pellets/briquettes.

LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT EN CANNES DE MAÏS DUPONT

La figure 14 présente un exemple de la chaîne d'approvisionnement complète des résidus de maïs (biomasse en balles). Il s'agit de la chaîne d'approvisionnement mise en œuvre et utilisée par la société DuPont (États-Unis) pour approvisionner son usine d'éthanol cellulosique en matière première. Le 30 octobre 2015, la grande bioraffinerie DuPont a été inaugurée à Nevada city, dans l'État de l'Iowa. La capacité de l'usine était de plus de 110 millions de litres d'éthanol cellulosique par an. Le maïs était récolté par les agriculteurs locaux tandis que les autres opérations étaient effectuées par le personnel de l'usine. En 2018, Verbio North America Corp. a acheté la société DuPont Cellulosic Ethanol LLC au Nevada. Le nouveau propriétaire a prévu de produire du gaz naturel renouvelable (GNR) sur le site, mais il devra d'abord apporter quelques modifications à l'installation³³.

³² Matt Darr *Industrial harvesting of corn stover as a biomass* (2012). *Proceedings of the Integrated Crop Management Conference*. 9. <https://lib.dr.iastate.edu/icm/2012/proceedings/9>

³³ <http://ethanolproducer.com/articles/15885/burgeoning-biomethane>

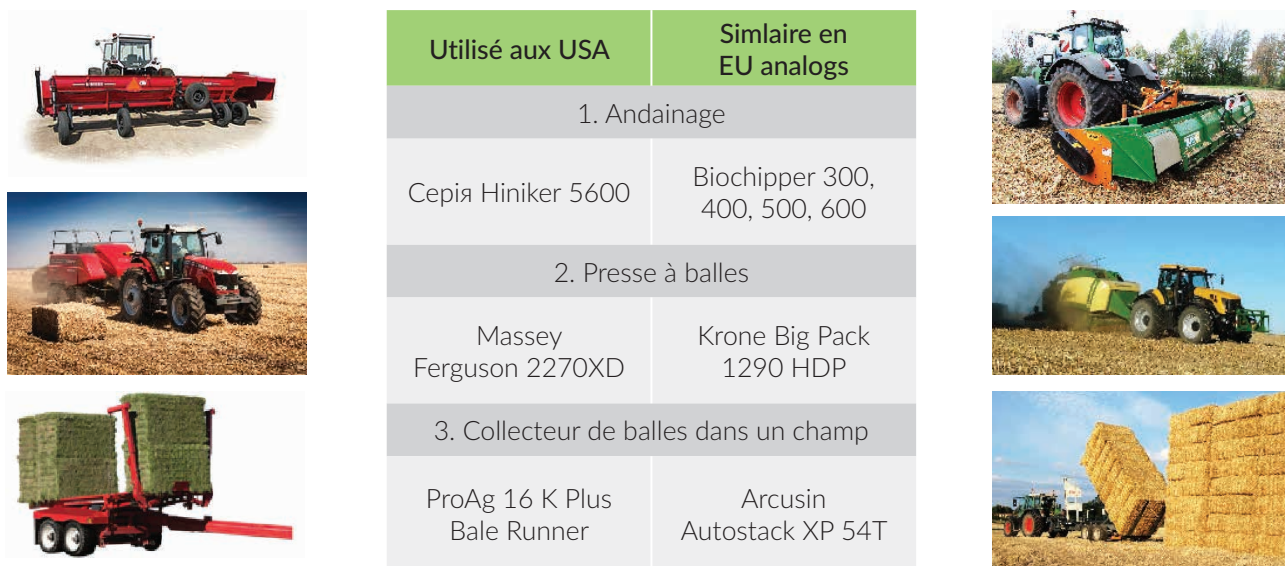


FIGURE 13:
Modèles de machines agricoles pour la récolte des sous-produits du maïs.

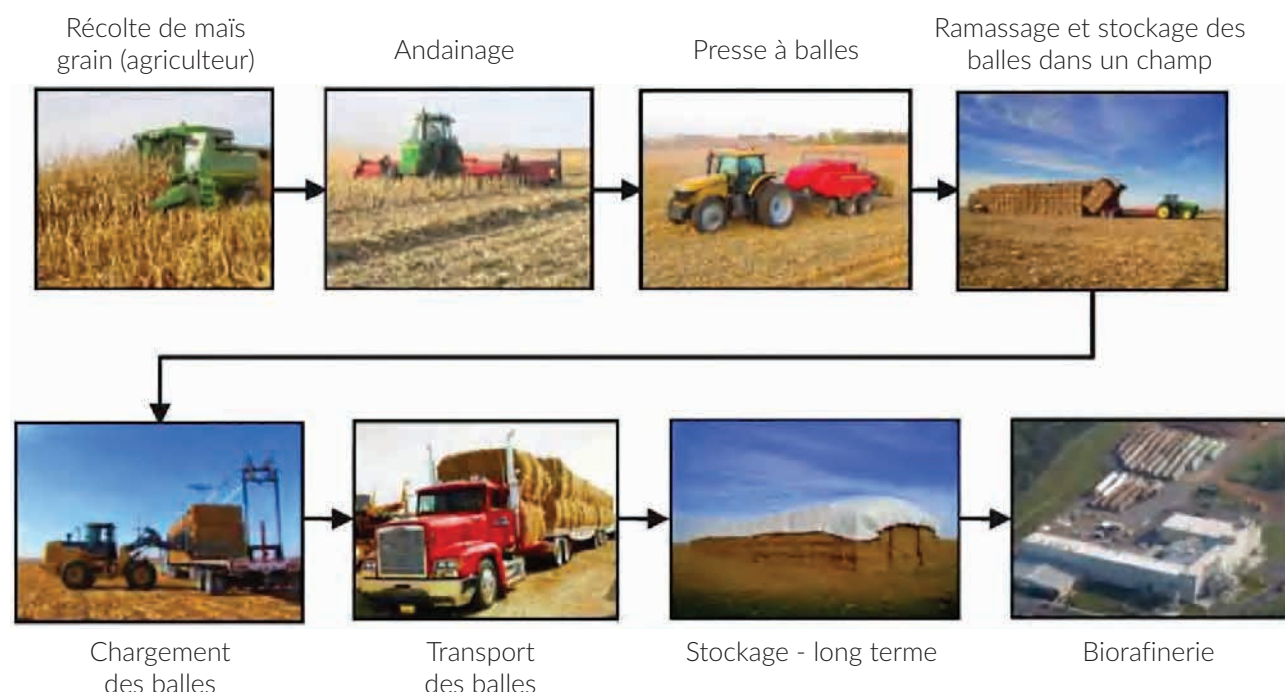
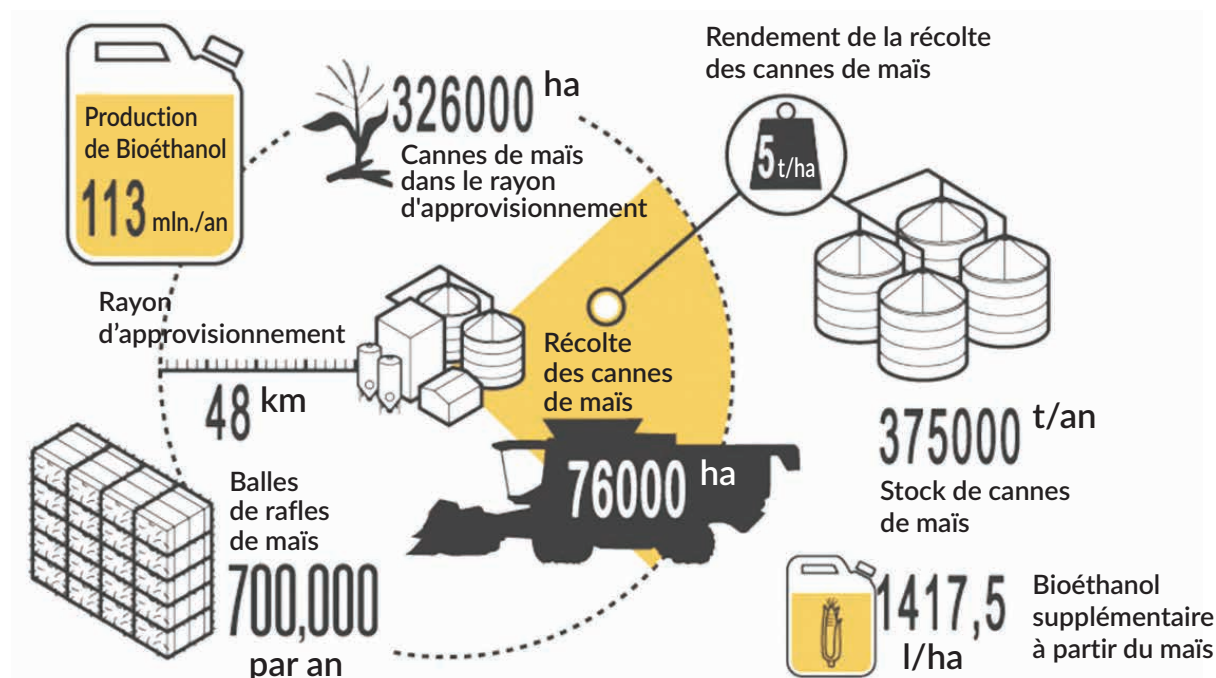


FIGURE 14:
Chaîne d'approvisionnement en canne de maïs de l'usine d'éthanol cellulosique de DuPont³⁴

³⁴ DuPont Nevada Site Cellulosic Ethanol Facility Feedstock Collection Program
http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/industrial-biotechnology/documents/IB-PDF-04-Feedstock_Collection_Program_2015.pdf

**FIGURE 15:**Programme d'exploitation de l'usine de bioéthanol cellulosique de DuPont³⁵

Le déroulement de l'opération est présenté à la figure 15. L'usine DuPont payait les cultivateurs pour l'autorisation de récolter les cannes de maïs et gérait les coûts de récolte, de stockage et de transport. Les producteurs étaient rémunérés pour l'accès au champ et pour les quantités de matière qui étaient retirées avec les sous-produits du maïs. Les cannes de maïs étaient récoltées dans les 500 fermes les plus proches. Il y avait 85 emplois permanents à l'usine, et 150 personnes étaient impliquées dans la collecte, le transport et le stockage des matières premières saisonnières.

Dans la cadre de ce programme de récolte des cannes de maïs pour l'éthanol cellulosique, DuPont a passé un contrat avec des producteurs pour récolter, stocker et livrer les cannes de maïs à l'usine d'éthanol cellulosique. Les cultivateurs qualifiés devaient répondre aux critères suivants:

- Être situés dans un rayon de 48 km de Nevada, dans l'Iowa;
- Les acres de maïs doivent être cultivés dans un système de travail du sol sans labour ou de conservation;
- Rendement de 12,2 tonnes par ha ou plus;
- Terres relativement plates (avec une pente de 4 % ou moins).

TRANSPORT DE BALLES DE CANNE DE MAÏS

Comme décrit ci-dessus, le système de récolte des sous-produits du maïs en grandes balles carrées est utilisé par d'autres entreprises. Après avoir été empilées dans les entrepôts opérationnels situés près des champs, les balles doivent être transportées vers l'entrepôt principal. Pour les opérations de chargement dans les entrepôts, des chargeurs frontaux et des téléscopiques sont utilisés. Pour le transport de l'entrepôt local à l'entrepôt central, on utilise des camions avec des plateformes de semi-remorques. Ces équipements sont traditionnellement utilisés pour les opérations logistiques avec des balles de paille et de foin. Mais les balles de sous-produits du maïs ont généralement un taux d'humidité plus élevé et sont donc plus lourdes que les balles de paille de céréales et de colza, ce qui doit être pris en compte lors du choix des machines de ramassage et d'empilage des balles. Il est essentiel d'arrimer correctement la cargaison à l'aide de sangles d'arrimage ou de cliquet sur les remorques à plateau ou sans côtés³⁶. Jusqu'à 36 grandes balles carrées d'un poids sec moyen de 0,43 t peuvent être transportées sur une semi-remorque américaine standard de 48

³⁵ <http://www.dupont.com/products-and-services/industrial-biotechnology/advanced-biofuels/articles/nevada-cellulosic-ethanol-by-the-numbers.html>

³⁶ Justin McGill, Matt Darr *Transporting Biomass on Iowa Roadways*. PM 3051G (2014) <https://store.extension.iastate.edu/product/Transporting-Biomass-on-Iowa-Roadways>

pieds. Il faut viser une densité de balles sèches de 196 kg/m³ pour maximiser l'efficacité du transport du poids des semi-remorques standard. Les charges de biomasse doivent être correctement arrimées pour éviter qu'elles ne se déplacent pendant le transport.

RÉCOLTE DE LA CANNE DE MAÏS EN BALLES RONDES

La biomasse peut être mise en balles rondes à l'aide d'une presse à balles rondes plutôt que d'une grande presse à balles carrées. L'utilisation de presses à balles rondes est également possible et offrent l'avantage d'être plus simples à utiliser et de présenter moins de problèmes de maintenance³⁷. Les presses à balles rondes peuvent nécessiter jusqu'à 75 chevaux à la prise de force. Pour une puissance de traction adéquate et pour maximiser la productivité de la presse, il est recommandé d'utiliser un tracteur de plus de 120 chevaux pour les opérations de pressage industriel. Les presses à balles rondes à haute densité avec prétraitement par hachage peuvent atteindre des densités de 160 kg/m³. Les grandes presses à balles carrées nécessitent beaucoup plus de puissance que les presses à balles rondes. La documentation du fabricant indique

généralement que les presses à balles carrées de haute densité et de grande capacité doivent avoir une puissance minimale de 180+ chevaux. Une puissance supplémentaire peut être nécessaire si des presses à haute densité sont utilisées. Ces presses peuvent produire des balles d'une densité supérieure à 184 kg/m³. Mais en général, les presses à balles rondes sont moins productives que les grosses presses à balles carrées. Compte tenu de la moindre efficacité du volume de transport et de stockage, des opérations logistiques des balles rondes par rapport aux balles carrées, les balles rondes sont plus complexes et plus coûteuses.

RÉCOLTE DE LA CANNE DE MAÏS DÉCHIQUETÉE

En plus des technologies de mise en balles, les cannes de maïs peuvent être récoltées sous forme déchiquetée en tant que mélange de différentes fractions de sous-produits du maïs ou séparées, comme les épis. Les schémas de la récolte des résidus de maïs déchiquetés à l'aide d'une ensileuse ou d'une autochargeuse, qui sont utilisées pour la récolte du maïs d'ensilage, sont présentés figure 16. Les expériences de terrain menées au Centre de recherche agricole de l'État de Bavière en 2014 et 2015 montrent que la teneur en



a) Système de récolte fourragère : moissonneuse-batteuse + tracteur avec andaineur de tiges + récolteuse + tracteur avec remorque



b) Système d'autochargeuse : moissonneuse-batteuse + tracteur avec andaineur déchiqueteur + tracteur avec autochargeuse

FIGURE 16:

Chaînes d'approvisionnement en cannes de maïs déchiquetées

³⁷ Matt Darr, Keith Webster *Corn Stover Harvesting Machinery*. PM3051A (2014)

<https://store.extension.iastate.edu/product/Corn-Stover-Harvesting-Machinery>

³⁸ Monika Fleschhut, Kurt-Jurgen Hulsbergen, Stefan Thurner, Joachim Eder *Analysis of different corn stover harvest systems / LANDTECHNIK*, 71 (6), 2016. – 252-270 p.

cendres des cannes de maïs était de 7,0 % en MS $\pm$ 1,9 pour l'ensileuse et de 6,9 % en MS $\pm$ 2,0 pour l'auto-chargeuse de fourrage³⁸.

SYSTÈMES DE RÉCOLTE DES RAFLES DE MAÏS

Une autre option pour la récolte des résidus de maïs consiste à en collecter une partie après le battage des grains dans une moissonneuse-batteuse. En 2018, des chercheurs du CREA-IT italien (Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria) ont réalisé des essais sur le terrain dans le cadre du projet BECOOL pour évaluer les performances d'un système mécanisé innovant, appelé Harcob, pour collecter les rafles de maïs³⁹ (Fig. 17a). En utilisant la moissonneuse-batteuse avec le système Harcob, il a été possible de récolter 2 t/ha d'épis en moyenne (4,1 t/heure)⁴⁰. La société Vermeer a mis sur le marché une récolteuse d'épis CCX770 (Fig. 17b), qui est disponible sur le marché⁴¹. La récolteuse d'épis

CCX770 de Vermeer est une remorque de collecte d'épis à traction attachée à une moissonneuse-batteuse. Cette machine permet aux agriculteurs de récolter le maïs et les rafles - séparément et simultanément - en un seul passage.

En Ukraine, certains agriculteurs ajustent le système de séparation des moissonneuses-batteuses pour réduire la séparation du grain de maïs des rafles. Ainsi, le grain avec les épis est transféré dans la trémie à grains. Ensuite, ce mélange est séparé sur des unités de séparation stationnaires, et les rafles sont utilisés comme biomasse pour les séchoirs à grains de maïs. La technologie décrite est basée sur des machines existantes et ne nécessite pas de dépenses d'investissement pour des équipements supplémentaires. Mais elle est utilisée uniquement pour couvrir les besoins propres des agriculteurs et ne s'applique pas à la collecte à grande échelle de ce type de biomasse pour le secteur de la bioénergie.



a)



b)

FIGURE 17:

Récolteuses de rafles de maïs - a) Harcob system; b) Vermeer CCX770

STOCKAGE DES CANNES DE MAÏS

Les cannes de maïs doivent être stockées dans des conditions permettant de maintenir leur taux d'humidité normal en raison des pluies et de l'humidité du sol, d'éviter la pourriture et d'assurer une protection contre le feu. Le choix d'un type de stockage dépend de son emplacement et des conditions locales. Les cannes de maïs peuvent être stockées dans un entrepôt ouvert, un entrepôt bâché, un

entrepôt à structure permanente ou un entrepôt anaérobie⁴². Plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors de la sélection des systèmes de stockage appropriés: la stabilité de la matière première pendant le stockage, le coût de l'infrastructure de stockage, l'accessibilité de la matière première pendant toute la durée du stockage, l'intégration de la plate-forme de stockage avec une usine de transformation. Il est important de garantir le libre accès des chargeurs à la biomasse.

³⁹ <https://www.becoolproject.eu/2018/10/22/recovering-maize-cob-converting-untapped-biomass-resource-into-valuable-feed-stock/>

⁴⁰ <http://www.etaflorence.it/proceedings/?detail=15215>

⁴¹ https://www.vermeer.com/NA/en/N/equipment/cob_harvester

⁴² Matt Darr, Ajay Shah, Kevin Peyton, Keith Webster Corn Stover Storage Methods <https://store.extension.iastate.edu/product/14077>



FIGURE 18:
Stockage en plein air de balles de cannes de maïs en Espagne

Le stockage de la biomasse dans des structures permanentes présente de nombreux avantages par rapport aux autres systèmes. Cependant, en raison de la densité relativement faible des cannes de maïs, y compris les balles, et des coûts d'investissement élevés pour la construction de nouveaux entrepôts, les entrepôts permanents sont économiquement irréalisables. Dans ce cas, si un acteur dispose de stockages permanents, il peut les utiliser pour les cannes de maïs.

Le stockage en plein air peut être utilisé pour des stockages locaux temporaires de cannes de maïs lorsque la couche supérieure de biomasse sert de couverture (Fig. 18). Il peut également être utilisé pour le stockage principal dans certaines régions, mais il faut le faire avec beaucoup de précautions en raison des pertes de matière sèche de la biomasse.

Le stockage anaérobie ou l'ensilage est une méthode de stockage très répandue pour les matières premières humides dans l'industrie de l'élevage. Le stockage

anaérobie reste économiquement viable pour les matières premières à forte teneur en humidité, en particulier pour le stockage des balles en début de saison ou pour le stockage d'urgence pendant les saisons de récolte extrêmement humides.

Le stockage sous bâche des cannes de maïs offre un équilibre optimal entre coût et préservation de la qualité. L'agrofibre peut être utilisée comme matériau de bâche, qui offre une protection contre la pluie et la neige. Il donne la possibilité à l'air de sortir à travers lui, ce qui empêche la formation de champignons et de moisissures. L'agrofibre est utilisée pour le séchage des copeaux de bois. L'agrofibre peut être utilisée pendant plus de 5 ans⁴³.

Les installations de stockage de la canne de maïs doivent être aménagées conformément à la réglementation en matière de sécurité incendie. Par exemple, en Ukraine⁴⁴, la surface d'une pile de bottes de paille doit être inférieure à 500 m², et la paille broyée doit être

⁴³ <http://zavod-kobzarenko.derevo.ua/catalog/details/6019>

⁴⁴ <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0313-07>

inférieure à 300 m². Il est permis de disposer les balles (paille broyée) en piles doubles avec une distance d'au moins 6 m entre les piles par paire et d'au moins 30 m entre les piles doubles adjacentes.

DENSIFICATION DES RÉSIDUS DE MAÏS

Une transformation plus poussée des sous-produits du maïs en briquettes et en granulés augmentera la valeur ajoutée de la biomasse. Les briquettes de biomasse sont des matériaux pressés de forme cylindrique, rectangulaire ou autre, dont la dimension transversale n'est pas inférieure à 25 mm et dont la longueur est comprise entre 100 et 400 mm. Le diamètre typique d'une briquette est de 60-75 mm, et sa longueur est généralement de cinq centimètres. Il n'existe pas de dimensions standard pour ce produit. Les briquettes peuvent avoir des formes très différentes, mais dans l'ensemble, on peut distinguer trois types: NESTRO, RUF et Pini&Kay (ces noms sont basés sur les noms des entreprises qui fabriquent des presses pour la production de briquettes de ces types). Un processus typique de production de briquettes de biomasse comprend sept étapes: réception de la matière première, déchiquetage, calibrage, séchage, pressage de la matière première en briquettes (briquetage), refroidissement et emballage des briquettes. L'obtention d'une briquette solide à partir de la masse végétale broyée est assurée par les propriétés physiques et mécaniques du matériau et les conditions du processus de briquetage lui-même. Pour cela, certains niveaux de qualité doivent être atteints. Il s'agit de la densité de la briquette (0,8-1,3 t/m³), de la teneur en humidité, des dimensions (diamètre, longueur) et de la forme régulière. La densité est le principal facteur qui détermine la résistance mécanique et la résistance à l'eau d'une briquette. Un avantage important des briquettes comme combustible est la température constante pendant la combustion -plusieurs heures. Les briquettes de biomasse peuvent être brûlées dans des chaudières domestiques et des petites chaudières pour combustibles solides à chargement manuel (jusqu'à ~100-150 kW), qui sont souvent déjà disponibles dans les ménages, les institutions financées par l'État ou les institutions de la sphère sociale. Sur le marché, il existe également des chaudières automatisées avec trémie (jusqu'à ~240 kW) conçues pour les briquettes de biomasse. Les briquettes de plus faible densité (c'est-à-dire plus "molles" en raison du pressage de matières premières

plus humides) peuvent être utilisées dans les grandes chaudières à vis. On s'attend à ce que la vis fabriquée en métal résistant soit capable d'écraser les briquettes et d'assurer leur alimentation ininterrompue dans le fourneau.

La biomasse agricole est granulée afin d'augmenter l'efficacité des opérations logistiques et d'élargir les possibilités d'utilisation énergétique. Les pellets issus de résidus de maïs sont appelés pellets non ligneux, et le processus technique de leur production est similaire à celui du briquetage de la biomasse, en fonction des caractéristiques de la matière première. Les pellets non ligneux sont des biocombustibles densifiés fabriqués à partir de biomasse broyée ou moulue, avec ou sans additifs. Ils ont une forme de cylindres de diamètre < 25 mm, de longueur aléatoire (typiquement 3,15 à 40 mm), avec des extrémités cassées, obtenus par compression mécanique⁴⁵. Les principales caractéristiques qui influent sur le processus de production de la granulation sont l'état initial de la biomasse (taille des particules, réduction du volume initial, présence d'impuretés, teneur en eau). Lors du traitement des résidus de récolte, des coques de tournesol, des roseaux, etc., il est possible d'utiliser un schéma typique conçu pour la production de granulés de paille.

En résumé, de nombreuses technologies basées sur des machines différentes peuvent être appliquées à la récolte des sous-produits du maïs. Pour la récolte à grande échelle, il est raisonnable d'utiliser des machines spéciales à haute productivité, y compris des andaineurs déchiqueteurs, des presses à balles, des remorques, etc. Mais, pour la récolte à petite échelle, il est possible de procéder de différentes manières en fonction de l'équipement existant. Il est important de réduire la contamination de la biomasse par le sol et de prévenir la forte teneur en humidité des sous-produits du maïs. Les principaux éléments de coût du stockage sous bâche des cannes de maïs sont les coûts de location du terrain, les coûts de préparation du sol, le matériel de bâche, les coûts de chargement/déchargement, les coûts de gardiennage et les coûts liés aux pertes de matières premières en raison de la perte de matière sèche de la biomasse. La transformation de la canne de maïs en briquettes et en granulés augmente la densité énergétique du volume de biomasse, ce qui est particulièrement important lors du transport de la biomasse sur de longues distances.

⁴⁵ ISO 17225-6:2014 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Graded non-woody pellets

PRODUCTION DE CHALEUR À PARTIR DE RÉSIDUS DE MAÏS

PRODUCTION DE CHALEUR À PARTIR DE PAILLE DE MAÏS

Les résidus de maïs, comme d'autres types de résidus de culture, étaient utilisés pour le chauffage dans les zones rurales où l'hiver est rude, en particulier sur les territoires dépourvus de forêts. Par exemple, dans les villages du sud de la région d'Odesa en Ukraine, les habitants ont recours depuis des décennies à une pratique consistant à louer des parcelles de champs de maïs à des entreprises agricoles ou à des agriculteurs. À l'époque, les habitants cultivaient et récoltaient le maïs manuellement, aujourd'hui ils utilisent des machines, notamment des presses à balles pour les cannes de maïs. Ils collectent les résidus de maïs et les déposent près de leurs maisons (Fig. 19). Pendant la période froide, les habitants utilisent les résidus de maïs comme fourrage et biomasse pour le chauffage. Ils brûlent les cannes de maïs dans des poêles traditionnels, dont l'utilisation a diminué ces dernières années.

La canne de maïs déchetée est une biomasse difficile à utiliser pour le chauffage domestique à petite échelle en raison de sa faible densité. En outre, la

manipulation de grosses balles peut poser problème. Dans ce cas, la production de briquettes et de granulés à partir de cette biomasse peut être une option pour les chaudières modernes. Cependant, pour l'instant, la production à grande échelle de biocombustibles solides à partir de résidus de maïs n'est pas lancée en Ukraine et en Europe. Il n'existe que quelques cas de générateurs de chaleur sur des balles de cannes de maïs, qui sont utilisées pour le chauffage et le séchage des céréales. La principale raison est le problème de la récolte de la biomasse par temps de pluie et de sa contamination par le sol lors de la mise en andains.

Comme indiqué plus haut, les résidus de maïs peuvent être considérés comme une meilleure biomasse à brûler que la paille de céréales, mais les caractéristiques des combustibles de l'agrobiomasse dépendent de nombreuses conditions locales et des pratiques de récolte. Dans tous les cas, les chaudières doivent être adaptées à la combustion des résidus de maïs. Il peut s'agir d'une chaudière améliorée pour la combustion de la biomasse ligneuse ou d'une chaudière spécialement conçue. En général, les chaudières à paille de céréales peuvent être considérées comme adaptées à



FIGURE 19:
Chargement de cannes de maïs dans le village de Krynychnoe

la canne de maïs, à condition qu'elle ait une teneur en humidité suffisamment faible lors de la combustion. En outre des solutions de chauffage utilisant un mélange de combustible biomasse, par exemple, du bois avec des résidus de maïs peuvent être mises en oeuvre.

Deux expériences de combustion de petites balles de canne de maïs ont été réalisées : la première dans une chaudière de 146 kW à double foyer conçue pour les bûches de bois sans aucune modification et la seconde dans la chaudière équipée d'une trémie d'alimentation en balle ronde de canne de maïs de marque Farm 2000 et d'une puissance nominale de 176 kW sont décrites dans les articles^{46,47}. Ces deux chaudières avaient montré un bon potentiel de production de chaleur à partir de balles de canne de maïs, mais elles devaient être améliorées pour une combustion plus efficace. Ainsi, dans la chaudière de 146 kW, les balles de canne de maïs produisaient en moyenne 7,5 % de cendres, dont environ 2 % de résidus non brûlés, tandis que le bois produisait 1,7 % de cendres. Les émissions de gaz de combustion étaient en moyenne de 1 324 mg/m³ de CO et 99,1 NOx pour la canne de maïs (118 mg/m³ de CO et 50,6 NOx pour le bois). Le rendement global pour les cannes de maïs était inférieure à celle du bois (57 % contre 77 %). Dans la chaudière à biomasse alimentée à trémie de 176kW, les émissions moyennes de la canne de maïs étaient de 2725 mg/m³ de CO, 9,8 mg/m³ de NOx et 2,1 mg/m³ de SO₂, ce qui était inférieur pour les NOx et supérieur pour le CO et le SO₂ aux émissions de la paille de blé (CO 2210 mg/m³, NOx 40,4 mg/m³ et SO₂ 3,7 mg/m³).

Il convient de noter que les deux chaudières utilisent des systèmes de combustion à grille fixe, qui présentent souvent de faibles rendements et des émissions élevées de polluants imbrûlés pour la combustion d'agrobiomasse à forte teneur en cendres. Les systèmes à grille mobile peuvent atteindre une vitesse et une efficacité de combustion plus élevées que les systèmes à grille fixe, car le combustible solide se déplace tout au long de la grille de combustion, ce qui permet un meilleur mélange entre l'air et le combustible et facilite la distribution de matière, qui brûle alors plus rapidement⁴⁸.

L'intérêt pour l'utilisation de la paille de maïs pour des applications de chauffage peut être trouvée dans les territoires qui ont l'intention de supprimer progressi-

vement le charbon pour le chauffage et qui ont un fort potentiel de cette ressource. En Grèce, la société municipale de chauffage urbain d'Amyntaio (DETEPA), en Macédoine occidentale, a inauguré à l'automne 2020 une nouvelle centrale de chauffage à la biomasse (2 x 15 MW) pour remplacer la chaleur fournie par une centrale électrique au lignite désormais arrêtée. Au cours de sa première année d'existence, la centrale s'appuyait davantage sur des matières premières de biomasse qui pouvaient être obtenues auprès de producteurs établis (copeaux de bois et granulés de coques de tournesol), mais DETEPA a un vif intérêt pour le développement de chaînes d'approvisionnement locales en agrobiomasse, visant à se procurer environ 5 000 tonnes de cannes de maïs et de sarments de vigne au cours de la saison de chauffage 2021-2022⁴⁹. En Chine, il existe un énorme potentiel de résidus agricoles, dont la paille de maïs. La société Great Resources a développé différents projets d'utilisation de la canne de maïs, depuis les installations de séchage du grain utilisant des briquettes de paille de maïs jusqu'aux installations multigénérationnelles produisant du froid, de la chaleur, de la vapeur, de l'électricité et des engrais à partir de la paille de maïs⁵⁰.

PRODUCTION DE CHALEUR À PARTIR DE RAFLES DE MAÏS

À première vue, les propriétés du combustible des rafles de maïs semblent assez prometteuses : une teneur en cendres et en azote plus faible que celle de nombreux autres combustibles issus de l'agrobiomasse. Le principal problème de la combustion des rafles de maïs est la forte teneur en potassium du combustible, qui abaisse la température de fusion des cendres. Des scories fondues peuvent se former sur la grille du four, obstruant les passages d'air. En outre, les dépôts de cendres sur les surfaces d'échange thermique sont très isolants et peuvent entraîner des pertes d'efficacité considérables en raison de la diminution du transfert de chaleur. Enfin, les rafles de maïs présentent généralement une forte teneur en chlore qui, combinée au potassium et à d'autres composés, peut entraîner la formation de substances corrosives. Les résultats de la combustion des rafles de maïs dans le réacteur à l'échelle du laboratoire et dans l'installation pilote de combustion de biomasse à grille en Autriche sont décrits dans l'article NDBP22. La densité énergétique

⁴⁶ R.Morissette, P.Savoie, J.Villeneuve *Combustion of Corn Stover Bales in a Small 146-kW Boiler* // *Energies*, 2011, 4. – 1102-1111 p.

⁴⁷ R.Morissette, P. Savoie, J. Villeneuve. *Corn Stover and Wheat Straw Combustion in a 176-kW Boiler Adapted for Round Bales* // *Energies*, 2013, 6. – 5760-5774 p.

⁴⁸ https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/10/AgroBioHeat_D4.2_agrobiomass-fuels-and-utilization-systems_v1.0.pdf

⁴⁹ www.ot.gr/2021/10/05/english-edition/kozani-green-heating-from-corn-and-vine-residues/

⁵⁰ Hong Hao *Unlock the huge potential of agro residue. Presentation*. 9.12.2021

<https://www.worldbioenergy.org/news/574/50/WBA-Webinar-1-Agricultural-residues-to-energy/>

des rafles de maïs s'élève à 518 kWh/m³ (environ 55% de la densité énergétique des copeaux de bois avec une teneur en humidité comparable). En raison de la teneur en azote plus élevée des rafles de maïs par rapport aux copeaux de bois non traités chimiquement, il faut s'attendre à une augmentation des émissions de NOx. Pendant les essais à l'échelle pilote, l'installation de combustion a été exploitée de 70 à 85% de sa capacité nominale (350 kWth). La formation de petits morceaux de scories dans les cendres de grille a pu être observée, ce qui était principalement dû à la formation de silicates enrichis en K et en Na avec des températures de fusion de l'ordre de 1050°C. En ce qui concerne les émissions gazeuses, on peut affirmer qu'avec des émissions de CO et d'COV (Composés Organiques Volatils) de 15,6 et 1,3 mg/Nm³ en moyenne (gaz de combustion sec, 13 % vol. d'O₂), une très bonne combustion en phase gazeuse a pu être obtenue. Les émissions moyennes de NOx s'élevaient à 247 mg/Nm³, mais un potentiel supplémentaire de réduction des émissions de NOx d'environ 30% pourrait être atteint par une application optimisée. Comme le laissait prévoir l'évaluation des analyses chimiques humides des combustibles, les émissions élevées de HCl et de SOx ont pu être relevées, s'élevant en moyenne à 34 mg/Nm³ respectivement 30 mg/Nm³. Les émissions de particules totales en suspension (PTS) (en aval du multicyclone) étaient clairement dominées par les émissions de particules fines, qui s'élevaient en moyenne à 91 mg/Nm³. Par conséquent, surtout pour les applications à plus grande échelle, l'installation d'un filtre à manches ou d'un électrofiltre pour le contrôle des émissions de particules fines sera nécessaire. Les analyses des cendres volantes du foyer et du multicyclone ont montré que l'ensemble des éléments nutritifs pertinents pour les plantes (à l'exception de l'azote) étaient retrouvés si les cendres sous foyer ou un mélange de cendres volantes foyer et multicyclone étaient épandues dans les champs de maïs.

L'impact potentiel de la teneur élevée en potassium des rafles de maïs a été démontré dans une série de tests réalisés dans le cadre du projet AgroBioHeat²³. Deux systèmes de combustion de pointe (chaudière à grille mobile couplée à un électrofiltre pour le contrôle des particules et chaudière avec un concept innovant de combustion étagée), adaptés aux applications résidentielles et à divers agrocombustibles (noyaux d'olive, granulés de coques de tournesol, miscanthus, peuplier, agropellets et rafles de maïs) ont été testés. Les rafles de maïs testées présentaient une teneur en potassium particulièrement élevée - plus de 1 % de la masse sèche - ce qui a entraîné des émissions de particules exceptionnellement élevées par rapport aux autres combustibles à base d'agrobiomasse testés, ainsi qu'une augmentation des températures des gaz de combustion et des pertes d'efficacité correspondantes.

Les particularités de la combustion des rafles de maïs peuvent être traitées dans des applications à moyenne échelle, grâce à l'utilisation de technologies et de savoir-faire appropriés. Le fabricant français de chaudières Compte-R a développé plusieurs chaudières de ce type depuis 2012. Les principales caractéristiques de ces systèmes sont l'utilisation de grilles refroidies par eau qui maintiennent les températures en dessous de 850 °C, la conception et la construction appropriées de la chambre de combustion et des surfaces de l'échangeur de chaleur afin d'abaisser la température des gaz de combustion à l'entrée des plaques tubulaires en dessous de 650 °C, et l'utilisation de systèmes appropriés d'épuration des gaz de combustion pour éviter le rejet de particules fines dans l'atmosphère⁵¹. Les chaudières à rafles de maïs de Compte-R ont été installées dans des entreprises de transformation du grain, mais aussi dans des centrales de chauffage urbain.

Le réseau de chauffage urbain Eco2Wacken à Strasbourg

Depuis 2016, plusieurs bâtiments clés du quartier Wacken de Strasbourg sont chauffés par une chaufferie comprenant deux chaudières Compte-R, une de 3,2 MW à bois et une de 2 MW à maïs. Le réseau Eco2Wacken fournit 30 GWh/an de chaleur et utilise 8 000 t de plaquettes forestières et 3 000 t de rafles de maïs par an, avec un rendement moyen de 87 %. Les combustibles sont livrés par camions (moins de trois fois par jour) et déchargés dans deux zones distinctes. Le stockage du bois a une capacité de 300 m³, suffisante pour quatre jours de fonc-

tionnement, tandis que le stockage des rafles de maïs est un silo de 180 m³, garantissant deux jours de fonctionnement. Les rafles de maïs sont destinées à une entreprise agricole voisine ; leurs cendres de combustion, riches en potassium, sont recyclées dans les fermes pour la fertilisation. Des filtres à manches sont utilisés pour maintenir les émissions de poussières à des niveaux très bas (inférieurs à 10 mg/Nm³). L'appoint est assuré par deux chaudières à gaz de 6 MW, tandis qu'une hydroaccumulation de 95 m³ offre des possibilités de stockage thermique. On calcule que plus de 7 000 t de CO₂ sont économisées chaque année grâce au fonctionnement de ce système de chauffage urbain.

⁵¹ <https://www.bioenergie-promotion.fr/51630/compte-r-confirme-son-expertise-en-combustion-des-agrocombustibles-solides/>

RÉSIDUS DE MAÏS POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Les résidus de maïs peuvent être utilisés par les centrales de cogénération (chaleur et électricité combinées) et les centrales électriques, qui fonctionnent avec de la paille. Dans certains cas, ils peuvent être utilisés comme biomasse supplémentaire pour la co-combustion avec le bois. La centrale électrique typique alimentée par la biomasse utilise la combustion directe pour brûler la biomasse dans une chaudière afin de produire de la vapeur à haute pression, qui entraîne une turbine et produit de l'électricité. Une centrale de cogénération capte en plus la chaleur et fournit ainsi de la chaleur et de l'électricité.

De nombreux projets de centrales électriques utilisant des résidus de maïs comme combustible ont été développés par DP CleanTech. En 2007, l'entreprise a livré la centrale électrique à base de paille de Liaoyuan, d'une capacité de 30 MWe, dans la province chinoise de Jilin. Elle fonctionne avec des combustibles d'origine locale provenant principalement de résidus agricoles tels que la paille de maïs. La chaudière à paille est conçue pour traiter des combustibles durs tels que les copeaux de bois, qui peuvent être alimentés par le silo auxiliaire contribuant jusqu'à 35 % de l'apport total de combustible. L'usine consomme plus de 160 000 tonnes de paille par an et atteint une disponibilité de 7 800 h/an. La chaudière à vapeur alimentée en paille fonctionne avec des paramètres de vapeur élevés à 92 bars et 540 °C, ce qui permet d'obtenir un rendement net global de l'usine de plus de 32 % et un rendement de la chaudière de plus de 93 %. La paille est acheminée vers la chaudière puis brûlée sur un foyer à grille vibrante refroidie par eau dans des conditions soigneusement contrôlées; les mouvements vibratoires régulent les étapes de la combustion⁵².

La centrale biomasse de 15 MWe de Miajadas en Espagne (Fig. 20, 21), en service depuis 2010, consomme 110 000 tonnes de biomasse herbacée (paille de cé-

réales, canne de maïs) et ligneuse (déchets d'élagage et forestiers) par an. Elle a été développée dans le cadre d'un projet de R&D avec des entreprises et des centres technologiques d'Espagne, de Finlande et du Danemark, avec le soutien du 7e programme-cadre de soutien à la recherche de l'Union européenne. L'exploitant est Acciona Energía. La production annuelle moyenne de la centrale est de 128 GWh, soit l'équivalent de la demande en électricité de 40 000 foyers. Elle permet d'éviter 123 000 tonnes métriques de CO₂ par an⁵³. La centrale utilise une chaudière à vapeur à grille vibrante d'une capacité de vapeur de 71 t/h, à cycle de Rankine sans régénération et un système de double alimentation en balles et en copeaux de bois⁵⁴.

La société danoise Babcock & Wilcox Vølund a fourni la technologie nécessaire à une centrale énergétique alimentée à la biomasse dans l'usine de papier Bulleh Shah Packaging Limited au Pakistan⁵⁶. L'usine peut utiliser plusieurs résidus agricoles différents (paille de blé, cannes de maïs, tiges de riz, bâtons de coton, et autres) provenant des agriculteurs locaux pour produire de la vapeur avec un débit de 150 t/h. La capacité nominale du combustible est de 37,7 t/h. La chaudière est équipée de la grille vibrante Vølund de B&W refroidie par eau pour une combustion efficace de la biomasse. Les cendres produites par cette chaudière sont offertes gratuitement. Elles peuvent être utilisées comme engrais pour les cultures au moment de la récolte, dans le processus de fabrication de briques et peuvent remplacer le sable lors de la pose de pavés au sol⁵⁷.

Vous trouverez de plus amples informations sur les centrales thermiques et électriques à base de paille dans le guide AgroBioHeat "De la paille à l'énergie" Technologies, politique de soutien et innovation au Danemark. Deuxième édition" (https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2021/02/AgroBioHeat_Paille_%C3%A0_%C3%A9nergie_FR_highres.pdf).

⁵² <https://www.dpcleantech.com/waste-and-biomass-clean-energy-technologies/combustion-technology/dp-wcv-grate/download/994/30/22>

⁵³ https://www.acciona.com/projects/miajadas-biomass-plant/?_adin=01010174103

⁵⁴ http://ghesa.com/en/portfolio_page/miajadas/

⁵⁵ https://www.acciona-energia.com/es/areas-de-actividad/?_adin=0744759730

⁵⁶ <https://www.babcock.com/-/media/documents/case-profiles/renewables/pch201-130-packages.ashx?la=ru-ru&hash=-F11E957E430907C7A937EE06E6AA6FAA852EB0A2>

⁵⁷ <https://www.packages.com.pk/wp-content/uploads/2020/09/Packages-Group-Sustainability-Report-2019.pdf>



FIGURE 20:
Miajadas - Centrale Biomasse 15 MW



FIGURE 21:
Balles de résidus de maïs dans l'installation de stockage de la biomasse de la centrale électrique de Miajadas⁵⁵

RÉSIDUS DE MAÏS POUR LA PRODUCTION DE BIOÉTHANOL

Le maïs joue un rôle crucial en tant que matière première pour la production d'éthanol. Selon les rapports de l'association européenne de l'éthanol renouvelable (ePURE), l'industrie européenne de l'éthanol renouvelable continue de se développer. La capacité de production installée (UE27 + Royaume-Uni) en 2020 était de 9 992 millions de litres, alors qu'elle était de 9 893 millions de litres en 2019. Les membres d'ePURE ont utilisé 6,67 millions de tonnes de maïs à cette fin en 2020, soit 49,5 % du volume total de bioéthanol produit (respectivement 6,56 millions de tonnes et 48,6 % en 2019), ce qui montre l'importance du maïs dans la production de bioéthanol de première génération dans l'UE⁵⁸.

On s'attend à ce que les résidus de maïs puissent constituer une importante matière première pour le bioéthanol de deuxième génération, qui est un biocarburant avancé issu de la biomasse lignocellulosique. La part des biocarburants avancés et du biogaz produit à partir des matières premières énumérées à l'annexe IX, partie A, de la directive RED II dans la consommation finale d'énergie du secteur des transports doit être d'au moins

0,2 % en 2022, d'au moins 1 % en 2025 et d'au moins 3,5 % en 2030. Il convient de noter que les biocarburants avancés issus de ces matières premières peuvent être considérés comme ayant un contenu énergétique double dans la contribution aux parts minimales.

La production de bioéthanol à partir de résidus de maïs nécessite une étape de prétraitement pour détruire la structure lignocellulosique, ce qui facilite l'accès des enzymes aux chaînes de cellulose ou oriente l'utilisation de leurs fractions lignocellulosiques. La figure 22 présente un schéma typique de production de bioéthanol à partir de matières premières lignocellulosiques. A partir d'une tonne sèche de cannes de maïs, le rendement potentiel en éthanol est de 428 litres. Selon les données de DuPont Nevada Site Cellulosic Ethanol Facility, 283,5 l de bioéthanol peuvent être produits à partir d'une tonne de cannes de maïs récoltées (Fig. 15). De plus, le maïs pourrait aussi fournir du maïs pour la production de bioéthanol de première génération. Au total, 140,8 GJ peuvent être obtenus par la combustion de résidus et de biocarburants à partir d'un hectare de maïs⁵⁹.

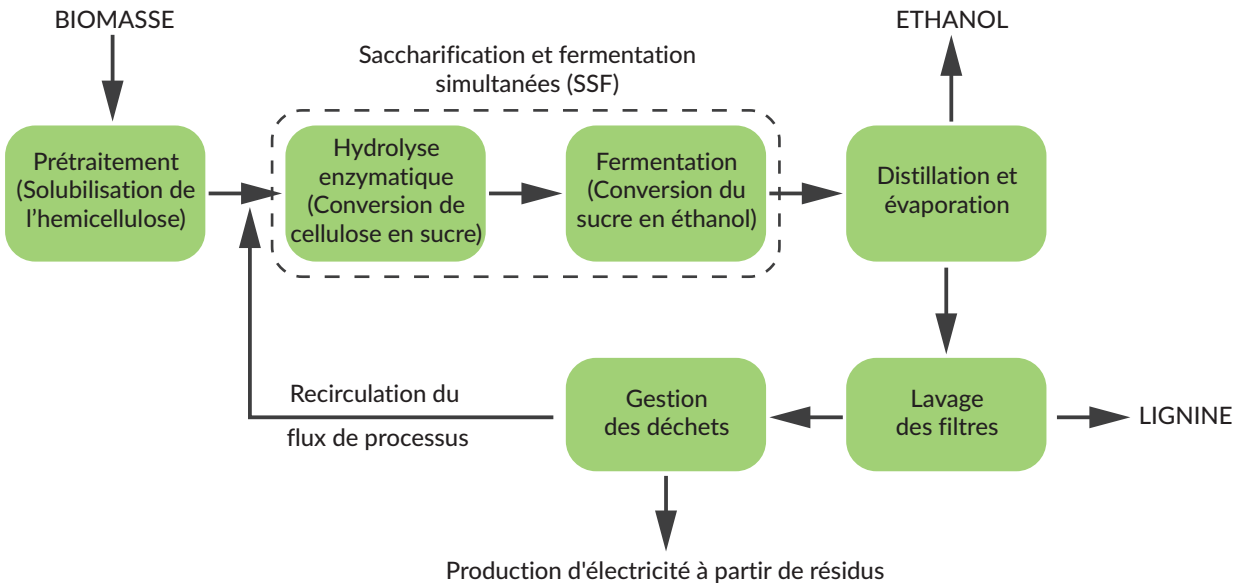


FIGURE 22: Procédé de production de bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique⁶⁰.

⁵⁸ <https://www.epure.org/wp-content/uploads/2021/09/210823-DEF-PR-European-renewable-ethanol-Key-figures-2020-web.pdf>

⁵⁸ *Second-Generation Biofuel Markets: State of Play, Trade and Developing Country Perspectives*. United Nations conference on trade and development – 69 p.

⁶⁰ M. N. A. M. Yusoff, N. W. M. Zulkifli, B. M. Masum and H. H. Masjuki *Feasibility of bioethanol and biobutanol as transportation fuel in spark-ignition engine: a review*. RSC Adv., 2015, 5, 100184–100211.

Seul un petit nombre d'installations produisant de l'éthanol à partir de matières celluloses fonctionnait avec succès dans le monde à la fin de 2020⁶¹. Les activités visant à lancer le bioéthanol lignocellulosique sur le marché ont récemment eu lieu principalement aux États-Unis et au Brésil⁶². En outre, certaines installations de bioéthanol de deuxième génération ont été lancées dans l'UE et en Chine, mais seules quelques unes d'entre elles sont des usines commerciales capables de produire du bioéthanol à partir de résidus de maïs.

Aux États-Unis, la capacité totale installée de production de bioéthanol était de 66 000 millions de litres par an en 2020, contre 52 239 millions de litres⁶³ l'année dernière. 4,1 % des capacités de production de bioéthanol aux États-Unis peuvent utiliser la biomasse cellulosique comme matière première, dont 0,4 % fonctionne uniquement avec de la biomasse cellulosique. Certaines d'entre elles produisent du bioéthanol à partir de résidus de maïs. Les plus grandes installations sont actuellement VERBIO North America Corp au Nevada avec une capacité de production de 113,5 mln l par an (30 mGy⁶⁴) qui a été achetée à DuPont, Project LIBERTY à Emmetsburg - 75,7 mln l par an (20 mGy), Seaboard Energy Kansas à Hugoton - 94,6 mln l par an (25 mGy).

Au Brésil, la bagasse est la principale matière première du bioéthanol cellulosique. Il est prévu que 178 000 tonnes de cette biomasse soient utilisées pour la production de 32 millions de litres en 2020⁶⁵. Les usines n'ont pas atteint leur pleine capacité en raison de problèmes opérationnels/mécaniques. En Chine, Longlive Bio-technology Co. Ltd a démarré une usine d'éthanol cellulosique d'une capacité de 60 000 tonnes par an à Shandong en 2012⁶⁶.

L'USDA prévoit une production d'éthanol cellulosique de 25 millions de litres dans l'UE en 2020⁶⁷. L'une des plus grandes installations de production d'éthanol cellulosique au monde, l'usine de Beta Renewables, a officiellement ouvert à Crescentino (Italie) en 2013, mais elle est fermée depuis 2017 en raison d'un effort de

restructuration de la société chimique mère Mossi & Ghisolfi. L'usine avait une capacité annuelle de 40 kt d'éthanol produit à partir de paille de blé, de paille de riz et de roseau géant (*Arundo donax*)⁶⁸. L'usine a été acquise par Versalis, la filiale chimique d'Eni, en novembre 2018. Le nouvel exploitant prévoyait de mettre en service l'installation en 2020.

Le projet COMETHA, soutenu par le septième programme-cadre de la Communauté européenne de 2014 à 2018, portait sur la construction et l'exploitation d'une installation industrielle précommerciale intégrée pour la production de 80 000 t/an de bioéthanol de deuxième génération à partir de biomasse lignocellulosique à Porto Marghera (Italie)⁶⁹. Le projet portait sur le développement d'une chaîne d'approvisionnement durable en biomasse basée sur 360 000 tonnes de biomasse lignocellulosique par an provenant de la région de Vénétie, comme des cultures pérennes dédiées (*Arundo donax*) et des résidus agricoles (canne de maïs, la matière première la plus appropriée pour la production de bioéthanol dans le scénario géographique considéré).

En 2021, la première usine de production d'éthanol cellulosique à l'échelle commerciale en Europe sera achevée par la société suisse Clariant dans le sud-ouest de la Roumanie. La solution innovante développée par l'entreprise est la technologie sunliquid® qui crée de la valeur en convertissant les résidus agricoles, par exemple la paille de céréales, les cannes de maïs, la paille de riz ou la bagasse de canne à sucre, en éthanol cellulosique. L'usine sunliquid® de Roumanie produira 50 000 tonnes d'éthanol cellulosique en transformant 250 000 tonnes de paille de blé durable d'origine locale. Plus de 400 emplois verts seront créés de manière permanente par la construction de l'usine dans une zone essentiellement rurale - 100 d'entre eux dans l'usine elle-même et 300 dans les zones adjacentes, par exemple dans la chaîne d'approvisionnement en matières premières. Par ailleurs, des projets d'éthanol cellulosique sont également en cours dans trois autres pays européens - Slovaquie, Pologne et Bulgarie - avec la technologie de Clariant⁷⁰.

⁶¹ *Renewables 2021 Global Status Report*. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

⁶² *Technical options for retrofitting industries with bioenergy*. *BioFitHandbook* <https://www.biofit-h2020.eu/publications-reports/BioFitHandbook-2020-03-18.pdf>

⁶³ *Essential energy*. 2021. *Ethanol industry outlook*. *Renewable fuels association report*. https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2021/02/RFA_Outlook_2021_fin_low.pdf

⁶⁴ Million gallons per year

⁶⁵ *Biofuels Annual*. Brazil. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_08-03-2020

⁶⁶ <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/advanced-technologies/sugar-to-alcohols>

⁶⁷ *Biofuels Annual*. European Union. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_The%20Hague_European%20Union_06-29-2020

⁶⁸ Monica Padella, Adrian O'Connell, Matteo Prussi. What is still Limiting the Deployment of Cellulosic Ethanol? Analysis of the Current Status of the Sector Appl. Sci. 2019, 9, 4523; doi:10.3390/app9214523

⁶⁹ <https://cordis.europa.eu/project/id/322406>

⁷⁰ <https://www.euractiv.com/section/alternative-renewable-fuels/opinion/making-european-sustainable-mobility-a-reality-with-cellulosic-ethanol/>

RÉSIDUS DE MAÏS POUR LE BIOGAZ

L'ensilage de maïs est l'un des substrats les plus fréquents utilisés pour alimenter les usines de biogaz agricoles. Cependant, en raison de l'augmentation des prix de l'ensilage de maïs, de nombreux exploitants d'installations de biogaz ont commencé à chercher des substrats alternatifs faciles à obtenir, peu coûteux et ayant une bonne productivité en méthane⁷¹. Les résidus de maïs peuvent être l'un de ces substrats.

L'un des avantages de l'utilisation des résidus de maïs pour la digestion anaérobie est que le processus n'est pas affecté par leur teneur en humidité potentiellement élevée après la récolte - ce qui peut être pro-

blématique pour les processus de combustion directe. Le substrat fermenté de l'installation de biogaz peut être utilisé comme bio-engrais pour faire recirculer les nutriments vers les terres agricoles, ainsi qu'une partie du carbone.

Par rapport à l'ensilage de maïs, la digestion anaérobie des résidus de maïs (paille) a un potentiel de biogaz plus faible (tableau 3). Elle nécessite également un temps de rétention plus élevé que l'ensilage de maïs, mais on considère qu'une telle différence pourrait être prise en compte par les exploitants d'installations de biogaz.

TABLE 3:
Production de méthane à partir de résidus de maïs⁷² et d'ensilage de maïs⁷³.

	MS, % poids humide	Biogaz, I _N /kg MV	CH ₄ , I _N /kg MV	MS dégradée
1. Résidus de maïs	%			
• Tiges	25.5 ± 0.8	424.3	233.8	53.9
• Feuilles	63.3 ± 0.8	442.9	244.5	57.0
• balle de maïs	58.2 ± 0.6	544.4	307.0	70.4
• Epis	43.5 ± 0.2	379.8	206.6	51.3
2. Maïs ensilage	27.7	673	345	77.9

MS – Matière sèche; MV – Matière volatile

⁷¹ Mazurkiewicz, J.; Marczuk, A.; Pochwatka, P.; Kujawa, S. Maize Straw as a Valuable Energetic Material for Biogas Plant Feeding. *Materials* 2019, 12, 3848. <https://doi.org/10.3390/ma12233848>

⁷² Simona Menardo, Gianfranco Airolti, Vincenzo Cacciatore, Paolo Balsari Potential biogas and methane yield of maize stover fractions and evaluation of some possible stover harvest chains, *Biosystems Engineering*, Volume 129, 2015, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.010>.

⁷³ Bauer, A., Leonhartsberger, C., Bösch, P., Amon, B., Friedl, A., & Amon, T. (2009). Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12(2), 153–161. doi:10.1007/s10098-009-0236-1.

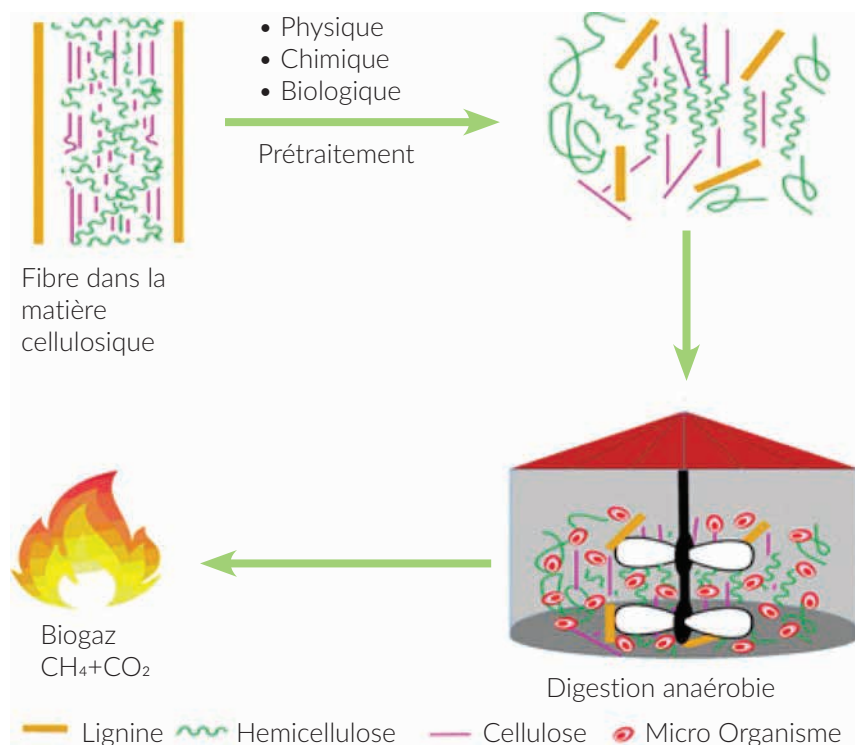


FIGURE 23:

Schéma du prétraitement de la matière lignocellulosique pour la production de biogaz⁷⁶

En raison de la teneur élevée en composés chimiques lignocellulosiques des résidus de maïs (Tableau 2), ceux-ci doivent être prétraités pour une destruction mécanique, physique, biologique ou chimique avant la fermentation (Fig. 23). Ces procédés améliorent le rendement en biogaz et diminuent le temps de rétention du substrat dans un digesteur anaérobie, mais nécessitent de l'énergie et des coûts supplémentaires. D'un point de vue énergétique, seul le prétraitement chimique semble être durable⁷⁴. L'analyse de sept prétraitements chimiques de la paille de maïs montre

que la paille prétraitée avec 3 % de H₂O₂ et 8 % de Ca(OH)₂ a donné les rendements les plus élevés en méthane, soit 216,7 et 206,6 ml CH₄/g de solides volatiles (VS), ce qui est supérieur de 115,4 % et 105,3 % à celui de la paille non traitée, respectivement⁷⁵. Ces deux procédés sont économiquement et efficacement supérieurs aux autres prétraitements comparés. Le prétraitement biologique est également prometteur. La paille de maïs prétraitée a produit 131,6 % de méthane total de plus que le témoin non traité.

⁷⁴ Croce, S., Wei, Q., D'Imporzano, G., Dong, R., & Adani, F. (2016). Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*, 34(8), 1289–1304. doi:10.1016/j.biotechadv.2016.09.004

⁷⁵ Song Z, GaiheYang, Liu X, Yan Z, Yuan Y, et al. (2014) Comparison of Seven Chemical Pretreatments of Corn Straw for Improving Methane Yield by Anaerobic Digestion. *PLoS ONE* 9(4): e93801. doi:10.1371/journal.pone.0093801

⁷⁶ Amin, F.R., Khalid, H., Zhang, H. et al. Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Expr* 7, 72 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>

En 2013, une usine pilote de mono-digestion de paille de maïs d'une capacité électrique de 50 kW a été mise en service à Renqiu en Chine⁷⁷. L'usine de biogaz se compose d'une hydrolyse de 40 m³ alimentée en continu pour l'étape de prétraitement et de deux digesteurs de 476 m³.

En décembre 2019, la société espagnole AB Energy SPA a lancé la production de biométhane avec un débit de 606 Nm³/h à partir de matières premières agricoles, notamment des tiges de maïs, à Milan. Le biométhane a alimenté le réseau gazier italien⁷⁸.

Les technologies de biogaz industriel utilisant les résidus de maïs et d'autres cultures comme matière première se développent. Le nouveau projet d'EnviTec Biogas (Allemagne) sera construit près de la ville de Qin Xian, dans la province chinoise de Shaanxi. Une fois achevés, les quatre digesteurs de l'usine de bio-

gaz produiront quotidiennement environ 37 000 Nm³ de biogaz à partir de résidus agricoles tels que les tiges de maïs⁷⁹. La procédure de valorisation du gaz par membrane en trois étapes, brevetée par Evonik, permet de raffiner le biogaz en biométhane avec de faibles niveaux de perte de méthane⁸⁰.

Dans la région de Khmelnytsky en Ukraine, une usine de biogaz est construite par la Teofipol Energy Company avec une capacité électrique de 10,5 MW, qui utilisera des résidus de culture, dont un grand volume de résidus de maïs.

Verbio (Allemagne) a annoncé l'installation d'un digesteur anaérobie dans l'ancienne usine d'éthanol cellulosique de DuPont dans le Nevada aux États-Unis, qui utilisera 100 000 tonnes de cannes de maïs par an pour produire du biométhane avec l'équivalent énergétique de 80 millions de litres d'essence⁸¹.

⁷⁷ Bionova Biogas GmbH. Map with references Semi-aerobic Hydrolysis Facilities in Germany and around the world https://bionova-biogas.de/en/pdf/2014_References_Bionova.pdf

⁷⁸ Biogas success stories 2020. European Biogas Association. https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/11/EBA_catalogue2020_WEB-1.pdf

⁷⁹ Biogas barometer 2020. EurObserv'ER <https://www.eurobserv-er.org/pdf/biogas-barometer-2020/>

⁸⁰ <https://www.bioenergy-news.com/news/construction-underway-on-two-envitec-biogas-projects-in-china/>

⁸¹ Renewables 2021 Global Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

ASPECTS DURABLES DE L'UTILISATION DES RÉSIDUS DE MAÏS

ELIMINATION DURABLE DES RÉSIDUS DE MAÏS

HLa récolte sans discernement des résidus de culture peut avoir des effets délétères sur le fonctionnement du sol, la croissance des plantes et d'autres éléments écosystémiques⁸². La réduction de l'apport de résidus organiques dans le sol implique une réduction directe des stocks de carbone, ce qui a un effet négatif sur la vie du sol. Cependant, les impacts de la gestion des résidus de culture sur les émissions de gaz à effet de serre du sol ne sont pas encore totalement compris et nécessitent 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 une augmentation des émissions de N₂O dans les zones où les résidus sont récoltés. La réaction des plantes à la gestion des résidus de culture est spécifique au site, et pour une production durable de bioénergie, différentes pratiques de gestion peuvent être appliquées (par exemple, le travail de conservation du sol, la rotation des cultures et les

couverts végétaux, la gestion des nutriments et/ou les résidus organiques).

De la même manière, la stratégie de récolte des résidus de maïs dépend des conditions locales. Une illustration conceptuelle de la manière dont les leviers économiques doivent être équilibrés par rapport aux facteurs limitants représentés par la protection des sols et la fourniture de services écosystémiques est présentée à la figure 24.

Pour aider les agriculteurs à prendre une décision rationnelle, les directives spécifiques pour la récolte des résidus ont été développées par l'USDA-Natural Resource Conservation Service dans le but de prévenir la dégradation du sol résultant d'une récolte excessive des résidus de maïs⁸⁴. Selon le document, les taux d'exportation durables des résidus de culture pour la production de biocarburants varieront en fonction de facteurs tels que la gestion, le rendement et le type de sol. Des outils comme RUSLE, WEQ et l'Indice de Conditionnement du Sol sont probablement les moyens les plus pratiques pour précauniser des niveaux de prélèvement acceptables. Ces taux ne se déterminent pas seulement par la nécessité de maintenir une couverture du sol: cela variera

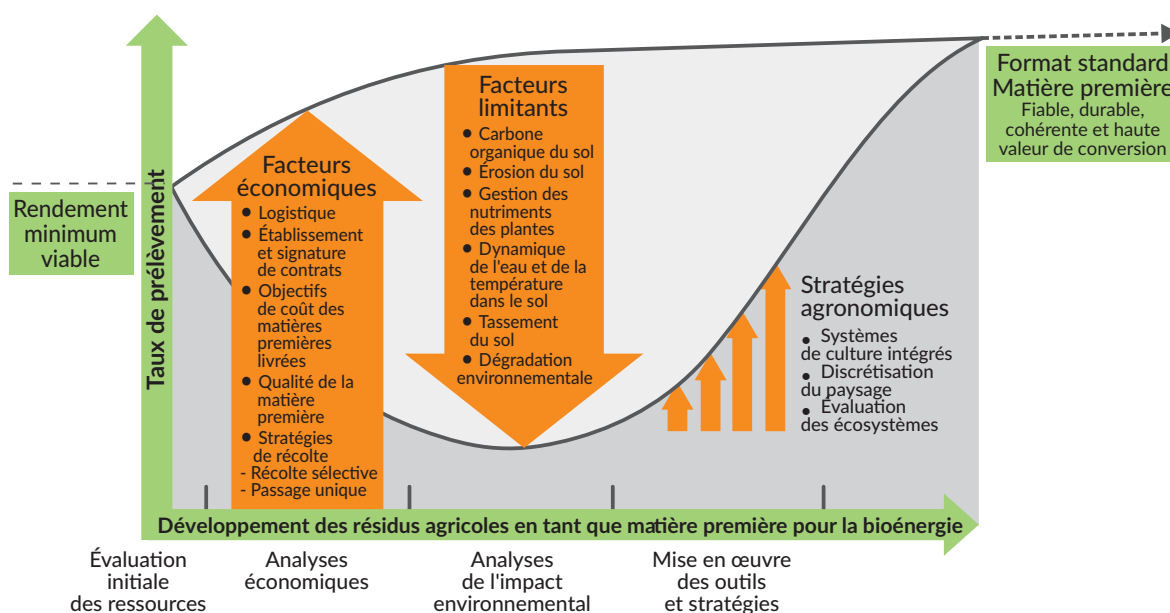


FIGURE 24:

Dépendance du taux d'enlèvement des résidus de maïs par rapport à l'économie, aux facteurs limitants et aux stratégies agronomiques⁸³. Les barres à droite illustrent diverses pratiques de gestion des sols et des cultures qui peuvent être mises en œuvre pour contribuer à assurer le développement et la disponibilité d'un approvisionnement durable en matières premières.

⁸² Cherubin Mauricio et al. (2018). Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Scientia Agricola*, v.75, n.3, 55-272. 75. doi:10.1590/1678-992X-2016-0459

⁸³ <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2442&context=usdaarsfacpub>

⁸⁴ Susan S. Andrews. White paper. Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations // USDA-Natural Resource Conservation Service – February 22, 2006.

selon la culture et la région. Les zones à faible pente et à rendement élevé peuvent permettre la récolte de résidus, mais dans de nombreuses régions, les quantités de résidus nécessaires pour maintenir la qualité du sol seront supérieures aux pratiques actuelles de couverture du sol. Certaines entreprises proposent une récolte durable des résidus. Par exemple, Pacific Ag⁸⁵ détermine avec chaque cultivateur, champ par champ, la bonne quantité de résidus à récolter pour garantir que les besoins en humidité et en protection du sol sont satisfaits tout en optimisant l'efficacité du labour, des intrants et de la levée.

ÉMISSIONS DE GES DE LA LOGISTIQUE DANS L'UTILISATION DES RÉSIDUS DE MAÏS

Les résidus de maïs devraient répondre aux critères de réduction des émissions de gaz à effet de serre de la RED II et aux critères de durabilité non liés aux GES (par exemple, la qualité du sol et le carbone du sol, la biodiversité et les stocks de carbone) lorsqu'ils sont utilisés dans de grandes centrales (≥ 20 MW). L'évaluation durable de la chaîne d'approvisionnement de la cogénération de canne de maïs en Roumanie est présentée dans le rapport du projet de recherche européen Smart CHP⁸⁶. Cette filière d'approvisionnement est évaluée sur les valeurs d'émission totales pour l'approvisionnement en biomasse, le processus de production de bio-huile de pyrolyse rapide (FPBO) et le transport de la FPBO de l'emplacement de l'usine à l'utilisateur final. Le processus produit non seulement de l'huile de pyrolyse, mais aussi de la vapeur et de l'électricité en tant que coproduits. Les résultats montrent que les valeurs de réduction des émissions de la filière d'approvisionnement Smart CHP de la canne de maïs sont de 95% pour l'électricité et de 96%

pour la chaleur dans le cas d'une distance minimale de transport du FPBO de 50 km et de 94% et 96% respectivement pour 150 km. Les émissions totales de GES de l'approvisionnement en canne de maïs sont de $2,0 \text{ gCO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}$ de biomasse, y compris l'émission de la collecte de canne de maïs $0,88 \text{ gCO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}$ de biomasse.

Aux États-Unis, l'électricité et les carburants dérivés de la canne de maïs réduisent les émissions de GES de 21 à 92 % par rapport à leurs homologues conventionnels. L'avantage environnemental est le plus important pour la production combinée de chaleur et d'électricité dans le scénario de référence qui consiste à remplacer le réseau moyen américain et le gaz naturel ($1,4 \text{ tCO}_{2\text{e}}$ par tonne de canne de maïs)⁸⁷, comme le montre la figure 25. L'étude de cas dans la province de Jilin en Chine⁸⁸ indique que l'utilisation de granulés de paille de maïs peut éliminer 90,46% des émissions de GES sur le cycle de vie en remplaçant la combustion du charbon. Cependant, les résidus de maïs, tout comme les autres types de résidus de culture récoltés dans les champs, suscitent différentes craintes.

Ainsi, la production d'énergie à partir de résidus de maïs émet des émissions de GES relativement faibles, qui peuvent être calculées en utilisant la méthode de calcul de la réduction des émissions approuvée pour une chaîne de valeur spécifique. Dans le cas de la biomasse solide, seules les installations produisant de l'électricité, du chauffage et de la climatisation ou des combustibles d'une puissance thermique nominale totale égale ou supérieure à 20 MW doivent satisfaire aux critères de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre conformément à la directive européenne sur les énergies renouvelables (REDII).

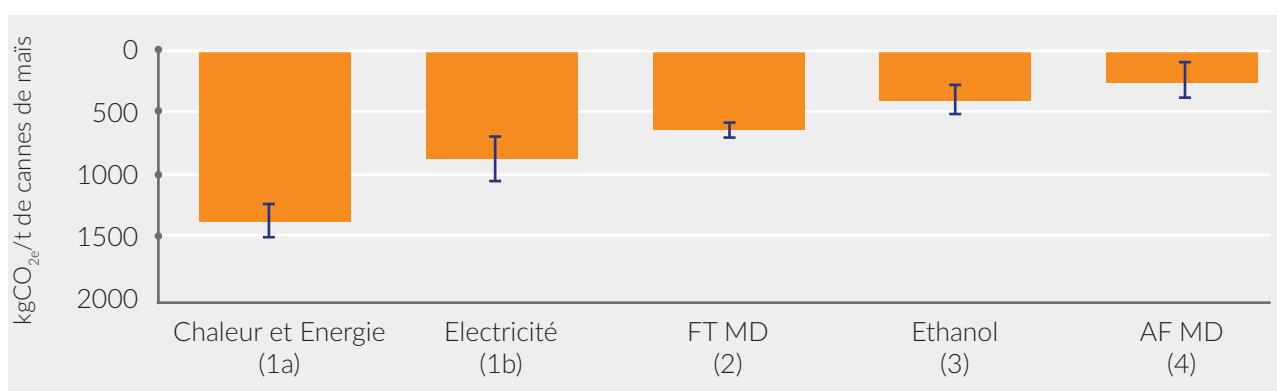


FIGURE 25:

Réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce à l'utilisation alternative de la canne de maïs par rapport à la moyenne du réseau américain. FT signifie Fischer-Tropsch ; DM signifie distillat moyen ; FA signifie fermentation avancée

⁸⁵ <https://pacificag.com/harvesting/>

⁸⁶ D5.1 SUSTAINABILITY ASSESSMENT_ BTG_ JUNE 2020 https://www.smartchp.eu/?jet_download=1799

⁸⁷ Trivedi, P., Malina, R., & Barrett, S. R. H. (2015). Environmental and economic tradeoffs of using corn stover for liquid fuels and power production. *Energy & Environmental Science*, 8(5), 1428–1437. doi:10.1039/c5ee00153f

⁸⁸ Shizhong Song, Pei Liu, Jing Xu, Chinhao Chong, Xianzheng Huang, Linwei Ma, Zheng Li, Weidou Ni, Life cycle assessment and economic evaluation of pellet fuel from corn straw in China: A case study in Jilin Province, *Energy* (2017), doi: 10.1016/j.energy.2017.04.068

ANNEXE I: PRINCIPAUX TYPES DE MACHINES POUR LA RÉCOLTE, LA LOGISTIQUE DES RÉSIDUS DE MAÏS ET LEUR TRANSFORMATION EN GRANULÉS/BRIQUETTES

Vous trouverez de plus amples informations auprès des constructeurs de machines et des concessionnaires dans le tableau en ligne au lien ci-dessous:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1o-u1S0B5IXwjQW72b7C_G5kNAwmxE6-l6VcyEd6myog/edit#gid=0

Logo	Contact	Description	Broyage/ Essaimage	Mise en balles	Collecte/ Chargement	Transport	Pelletisation/ Briquettage
	BioG GmbH Weilbolden 18, 4972 Utzenaich Austria +43 (0) 7751/50149-0 office@biog.at https://biog.at	Le BioChipper développé par BioG, un concept de paillage avec consolidation des andains, permet de récolter les résidus des champs tels que la paille de maïs, la paille de colza, paille de céréales, cultures dérobées et les matériaux d'aménagement paysager. Les opérations de l'aspiration, du broyage et de l'andainage sont réalisées en une seule étape.	●				
	HINIKER COMPANY 58766 240th Street Mankato, MN 56002 USA (507)-625-6621 (800)-433-5620 https://www.hiniker.com	L'andaineuse à fléaux Hiniker 5600 Series peut réduire considérablement votre temps au champ en déchiquetant et en mettant en andain les tiges en un seul passage.	●				
	LOFTNESS COMPANY 650 South Main Street PO Box 337 Hector, MN 55342 USA 320-848-6266 info@loftness.com https://www.loftness.com	Le broyeur à andain est le dernier exemple de Loftness transformant un défi en une opportunité. L'imprévisible marché et la demande de biomasse transforment les résidus de récolte en un centre de profit.	●				
	CLAAS https://www.claas-group.com/	Claas est le producteur mondial d'ensileuses et de moissonneuses-batteuses. CLAAS est également performant dans le domaine de l'ingénierie agricole tracteurs, les presses agricoles et machines de récolte machines.		●	●		

Logo	Contact	Description	Broyage/ Essaimage	Mise en balles	Collecte/ Chargement	Transport	Pelletisation/ Briquetage
	Maschinenfabrik Bernard KRONE GmbH & Co. KG Zentrale: Heinrich- Krone-Straße 10 D-48480 Spelle Tel.: +49 (0)5977/935-0 Fax: +49 (0)5977-935- 339 Info.Idm@krone.de https://landmaschinen.krone.de/	En tant que spécialiste du fourrage, KRONE fabrique des faucheuses à disques, des faneuses, des andaineurs, des autochargeuses, des ensileuses, des presses à balles rondes et carrées ainsi que des faucheuses-conditionneuses automotrices de grande capacité BiG M et ensileuses BiG X.		●	●	●	
	Kuhn Group KUHNSAS 4 Impasse des Fabriques BP 50060 F-67706 Saverne CEDEX +33(0)3 88 01 81 00 Fax: +33(0)3 88 01 81 01 https://www.kuhn.com/	Le groupe Kuhn est le producteur mondial de machines de récolte de foin et de fourrage. Kuhn produit des déchiqueteuses, des andaineurs et des presses à balles.	●	●			
	AGCO Corporation https://www.agcocorp.com	Grâce à des marques bien connues comme Challenger®, Fendt®, GSI®, Massey Ferguson® et Valtra®, AGCO Corporation fournit des solutions agricoles aux agriculteurs du monde entier grâce à une gamme complète de tracteurs, de moissonneuses-batteuses, d'équipements pour le foin et le fourrage, d'outils de semis et de travail du sol, de systèmes de stockage des céréales et de systèmes de production de protéines. Les solutions pour le foin et le fourrage d'AGCO vont des faucheuses et des presses à balles aux souffleurs de fourrage et aux caissons de stockage, toutes avec des innovations en termes de taille, de capacité et d'efficacité.		●	●		
	CNH Industrial https://www.cnhindustrial.com/	CNH Industrial produit et vend des équipements agricoles et de construction, des camions, des véhicules commerciaux.	●	●	●	●	

Logo	Contact	Description	Broyage/ Essaimage	Mise en balles	Collecte/ Chargement	Transport	Pelletisation/ Briquetage
	John Deere https://www.deere.com	Depuis sa fondation en 1837, John Deere fournit des produits et des services pour aider ceux qui sont liés à la terre. John Deere produit une large gamme de machines pour la récolte de la biomasse, notamment des presses à balles et des chargeurs.	●	●	●		
	Arcusin S.A. Polígono Industrial Pla d'Urgell - Av. Merlet, 8 - 25245 VILA-SANA Lleida (Spain) T 973 71 28 55 - 696 98 29 10 arcusin@arcusin.com https://www.arcusin.com	L'entreprise produit des machines pour le secteur de la manutention des balles. Chargeur automatique de balles AutoStack FSX et XP54. Collecteur de balles ForStack 8.12			●		
	ZAVOD KOBZARENKO LTD Ukraine, 42500, Sumy region., Lypova Dolyna, Rusaniwska street, 17 +38 (044) 451-68-77, +38 (095) 277-63-98 www.kobzarenko.com.ua	Production d'équipements pour la collecte et le transport des balles. - Remorque pour balles carrées PT-16 KVADRO; - remorques autochargeuses pour balles rondes; - remorques à plate-forme.			●	●	
	ProAG 2131 Airport Drive Saskatoon, SK Canada S7L 7E1 306-933-8585 https://www.proagdesigns.com/	Les porteurs de balles ProAG sont conçus pour les balles rondes ou les grandes balles carrées pour leur ramassage et leur empilage.			●		
	URSUS S.A. DOBRE MIASTO - HQ ul. Fabryczna 21, 11-040 Dobre Miasto Poland +48 22 506 56 00 dobreomiasto@ursus.com https://www.ursus.com/	URSUS est sans doute la plus ancienne marque polonaise de véhicules, de machines et de dispositifs fabriqués pour les besoins de l'agriculture, parmi lesquels on trouve des presses à balles (y compris celles destinées à l'ensilage du foin) et des remorques pour le transport des balles.		●		●	

Logo	Contact	Description	Broyage/ Essaimage	Mise en balles	Collecte/ Chargement	Transport	Pelletisation/ Briquetage
	AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG Dieselstrasse 5-9 21465 Reinbek Hamburg, Germany +49 (0) 40 72 77 10 info@akahl.de https://akahl.de	La granulation de matières premières renouvelables pour la récupération d'énergie a été un sujet pour KAHL. Les installations de granulation de paille et de fourrage séché ont fait partie du programme de prestation de KAHL.					●
	CPM Europe B.V. Rijder 2, 1507 DN Zaandam The Netherlands +31 75 65 12 611 info@cpmeurope.nl https://www.cpmeurope.nl/	CPM Europe produit des équipements haut de gamme pour la granulation et le broyage d'une grande variété de bois et de produits agricoles.					●
	ANDRITZ Feed and Biofuel A/S Esbjerg, Denmark Phone: +45 72 160 300 andritz-fb.dk@andritz.com https://www.andritz.com	ANDRITZ peut concevoir, fabriquer, fournir et optimiser les machines pour produire des granulés de biomasse de haute qualité. Nos solutions sont toujours accompagnées de conseils techniques, d'ingénierie, d'installation et de service après-vente par nos centres de service mondiaux.					●
	ICK GROUP office 222, 89 A, Prospect Peremogy, Kyiv, 03115, Ukraine tel.: +38 (067) 215 10 32 fax: +38 (044) 451 02 30 e-mail: info@ick.ua https://ick.ua/	Le groupe ICK fabrique des équipements sous la marque GRANTECH. De nombreuses années d'expérience dans la mise en œuvre de technologies d'économie d'énergie et de technologies de granulation de différents matériaux.					●
	C.F. Nielsen A/S Solbjergvej 19 DK-9574 Baelum tel: +45 9833 7400 https://cfnielsen.com/	C. F. Nielsen est la première marque mondiale dans la conception et la production de solutions de briquetage mécanique pour la biomasse et les déchets.					●
	PE "Briquetting Technologies" 13313, Ukraine, Zhytomyr region, c. Berdychiv, Semenivska str., 116 +38 (067) 410 21 02 bricteh@gmail.com https://briq-tech.com/	Le complexe d'équipements pour la production de briquettes et de pellets de combustible.					●

ANNEXE II : SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES POUR PRODUIRE DE LA CHALEUR À PARTIR DE RÉSIDUS DE MAÏS

Vous trouverez de plus amples informations auprès des producteurs de chaudières dans le tableau en ligne au lien ci-dessous:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1hb1IEKxIR_OStT5LOibOfZzggeZ-BjeARq33iwjiaE/edit#gid=0

Logo	Contact	Description	Petites chaudières (100-500 kW)	Chaudières moyennes (500 kW-1 MW)	Grandes chaudières (plus de 1 MW)	Chaudières à vapeur
	Group COMPTE.R https://www.compte-r.com/en/	Depuis plus de 130 ans, COMPTE.R innove et invente de nouvelles solutions de chauffage à la biomasse pour le développement des énergies renouvelables, jusqu'à devenir un spécialiste de l'énergie de la biomasse.			●	●
	DP CleanTech https://www.dpcleantech.com/	Le portefeuille de solutions biomasse de DP se compose de technologies éprouvées, brevetées et de pointe pour la combustion, la gazéification et la conversion en biogaz de la biomasse en énergie propre.			●	●
	Babcock & Wilcox Vølund https://www.babcock.com/	B&W fournit des solutions et des services technologiques respectueux de l'environnement à des clients du secteur de l'énergie et de l'industrie dans le monde entier - en toute sécurité, de manière éthique et comme annoncé.			●	●
	TTS eko s.r.o. https://www.ttsboilers.cz/	Dans le cadre du programme écologique, l'entreprise TTS s'occupe principalement du développement, de la production, du montage et de l'entretien de chaudières industrielles et de chaufferies pour la combustion de la biomasse.			●	
	Volyn-Kalvis LLC https://www.volyn-kalvis.com.ua/en/	La société Volyn-Kalvis LLC produit des chaudières automatiques à combustible solide pour le chauffage de l'eau avec grille mobile pour différents types de biomasse: sciure, copeaux de bois, déchets de céréales, tiges de tournesol et de maïs, ainsi que des granulés de bois, de tournesol, de tourbe et d'autres matières végétales.	●	●	●	
	Kruger boiler plant https://kruger.com.ua/	La chaufferie Kruger est une entreprise qui propose un cycle complet de construction clé en main pour une entreprise liée à la production d'énergie thermique.		●	●	●

LE CONSORTIUM “AGROBIOHEAT”

Logo	Description
	Centre for Research and Technology Hellas (CERTH) est l'un des principaux centres de recherche en Grèce. Parmi ses domaines d'expertise, on compte les activités relatives aux sources d'énergie renouvelables, à la production et à l'utilisation de biocarburants solides, aux économies d'énergie et à la protection de l'environnement. www.certh.gr
	AVEBIOM est l'association espagnole de bioénergie qui représente toutes les entreprises de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement de la bioénergie en Espagne. www.avebiom.org
	BIOS est une société autrichienne de R&D et d'ingénierie qui possède plus de 20 ans d'expérience dans le domaine de l'utilisation de la biomasse énergétique. www.bios-bioenergy.at
	Bioenergy Europe (anciennement connu sous le nom d'AEBIOM) est la voix de la bioénergie européenne. Elle vise à développer un marché durable de la bioénergie basé sur des conditions commerciales équitables. www.bioenergyeurope.org
	Food & Bio Cluster Denmark est le cluster national danois pour l'alimentation et les bioressources. Nous encourageons une coopération accrue entre la recherche et les entreprises et offrons à nos membres un accès unique aux réseaux, aux financements, au développement commercial, aux projets, aux installations et à divers services de conseil. www.foodbiocluster.dk
	Centre technologique fondé en Espagne en 1993, cherchant à fournir des solutions innovantes dans le domaine de l'énergie pour un développement durable. www.fcirce.es
	INASO-PASEGES est une organisation civile sans but lucratif, créée en 2005 à Athènes par la Confédération panhellénique des unions de coopératives agricoles. (PASEGES). www.neapaseges.gr
	The Green Energy Cooperative (ZEZ) a été créé en 2013 dans le cadre du projet "Développement des coopératives énergétiques en Croatie" mis en œuvre par le Programme des Nations unies pour le développement (PNUD) en Croatie. www.zez.coop
	L'objectif principal du Cluster est de développer le secteur de la bioénergie en Roumanie et de susciter l'intérêt pour la production et l'utilisation de la biomasse. www.greencluster.ro
	UABIO a été créée en 2013 en tant qu'organisation publique. Le but de l'activité de l'association est de créer une plateforme commune de coopération sur le marché de la bioénergie de l'Ukraine. www.uabio.org

Logo	Description
	AILE travaille sur les énergies renouvelables et les économies d'énergie dans les zones agricoles et rurales de l'Ouest de la France. www.aile.asso.fr
	White Research est une entreprise de recherche sociale et de conseil spécialisée dans le comportement des consommateurs, l'analyse de marché et la gestion de l'innovation, basée à Bruxelles. www.white-research.eu
	Agronergy est un fournisseur de services énergétiques français dédié au chauffage renouvelable. www.agronergy.fr



PUBLICATION

Cette publication de l'Association Ukrainienne de Bioénergie (UABIO) et du Centre for Research and Technology Hellas (CERTH) couvre les questions liées à l'état actuel de la production de maïs, les caractéristiques de sa culture et les possibilités d'utilisation des résidus de maïs à des fins énergétiques. Le guide passe en revue les technologies de récolte des résidus de maïs et leur utilisation pour la production de chaleur, d'énergie, de biogaz et de bioéthanol. Il comprend également des listes d'entreprises qui proposent des machines pour la récolte, la logistique des résidus de maïs, leur transformation en pellets/briquettes et des systèmes énergétiques pour produire de la chaleur à partir de résidus de maïs. Le guide a été créé dans le cadre du projet AgroBioHeat, qui est cofinancé par le programme Horizon 2020 de l'Union européenne. AgroBioHeat vise à promouvoir des solutions de chauffage à base d'agro-biomasse économiquement et écologiquement durables en Europe.

PARTENAIRE AILE

AILE a été créé en 1995 pour accompagner les agriculteurs, les collectivités, les industriels de l'Ouest de la France sur les bonnes pratiques : d'économies de carburant, de valorisation énergétique et circulaire de la biomasse, de préservation des ressources (air, eau, sol, biodiversité, climat). AILE expérimente et teste des applications innovantes, facilite la création de filières de proximité et met en réseau à l'échelon (inter) régional les producteurs de biomasse, les apporteurs de solutions et les utilisateurs.

Pour plus d'information notre site: www.aile.asso.fr
Nous suivre sur Twitter @aileagence.



UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Ce projet a été financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, dans le cadre de la convention de subvention no 818369

