



Food & Bio Cluster
Denmark

De la paille à l'énergie

Technologies, politiques de soutien
et innovations au Danemark

DEUXIÈME ÉDITION



Ce 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

AgroBioHeat

**Food & Bio Cluster
Danemark est le
cluster national pour
l'alimentation et les
bioressources au
Danemark.**



À propos de Food & Bio Cluster Danemark

Plateforme collective pour l'innovation et la montée en compétence des entreprises danoises et internationales par une coopération et une mise en réseau avec la recherche, l'accès à des financements pour des projets de développement, l'organisation de visites thématiques et des actions de promotion, la rédaction de rapports

sur différents sujets dans le domaine de la gestion des co-produits alimentaires notamment.

Pour plus d'informations, veuillez consulter le site www.foodbiocluster.dk.



Food & Bio Cluster
Denmark



Ce 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

Publication

Cette publication est une actualisation de l'édition précédente publiée en 2011 "De la paille à l'énergie - Technologies, politiques de soutien, et innovations au Danemark 2011". Ce document ne reflète que l'opinion des auteurs de Food & Bio Cluster Danemark. L'Agence exécutive pour l'innovation et les réseaux (INEA) n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.

Cette mise à jour a été réalisée dans le cadre du projet AgroBioHeat, qui a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre d'une convention de subvention N° 818369. Le projet AgroBioHeat vise à déployer massivement les solutions modernes 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.

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

Traduction française par le partenaire local AILE.



initiatives
énergie
environnement

TITRE

"De la paille à l'énergie - Technologies, politiques de soutien, et innovations au Danemark" (2ème édition, 2020)

PUBLIÉ PAR

Food & Bio Cluster Denmark
Agro Food Park 13
8200 Aarhus N Danemark

Traduction française par le partenaire local AILE – 73 rue de Saint Brieuc – CS 56520 – 35065 Rennes Cedex – France
www.aile.asso.fr

PHOTO DE COUVERTURE

Flemming Nielsen/
Story2Media ApS

CONCEPTION ET MISE EN PAGE

Designer graphique
Trine Elmstrøm
www.danskdesignrum.dk

PHOTOS

Torben Skøtt/Biopress,
Jørgen Hinge/Institut technologique danois,
Cormall A/S, Linka Energy, Kirsten Krogh, Adam Weller, Staramaki et Food & Bio Cluster Danemark

AUTEURS

Torben Skøtt/BioPress,
Jørgen Hinge/Institut technologique danois et Louise Krogh Johnson/Food & Bio Cluster Denmark

RELECTURE

Manolis Karampinis/Centre for Research & Technology Hellas (CERTH), Grèce et Gunnar Hald Mikkelsen/Food & Bio Cluster Danemark

Table des matières

Colophon	4		
		Dimensionnement de la chaudière	27
		Stockage	27
La paille comme source d'énergie	7	Réseau de chaleur rural à la ferme	29
La politique énergétique - Un outil important	8	Chauffage urbain	30
Réajustement du système énergétique	9	Manutention de la paille à la chaufferie	31
Accords internationaux sur l'atténuation du changement climatique	9	Conception de la chaufferie	32
Objectifs nationaux	11	Balles entières ou paille broyée ?	32
Indépendance aux combustibles fossiles	11	Considérations environnementales	32
La paille comme combustible	12	La paille pour les unités de cogénération	35
Ressources en paille	12	Manipulation de la paille en unité de cogénération	35
Europe	15	Foyer à gradin	36
Variation des rendements	15	Foyer Cyclonique	36
Manutention de la paille	15	Lit fluidisé circulant	36
Mise en andain	16	Co-Combustion	37
Mise en balles	16	Challenges	38
Les granulés, les briquettes et la paille broyée	17	Autres utilisations de la paille	39
Chargement et déchargement des camions et remorques	17	Gazéification	39
Transport au champ	18	De la paille au bioéthanol	40
Stockage décentralisé	18	Le concept de bioéthanol Inbicon	40
Transport routier	19	Le concept de bioéthanol BioGasol	41
Déchargement à l'usine	19	La paille dans les unités de méthanisation	42
Protection de la santé et sécurité des opérateurs	19	Pré-traitement mécanique	43
		Litière animale, compostage et ensilage	43
		Autres de methods : adaptation du process	43
		Fioul lourd issu de la paille	43
		Matériaux de construction à partir de paille	43
Durabilité de la combustion de paille	21	La paille pour une croissance verte dans les années à venir	45
Incidences agronomiques de l'exportation de la paille	21		
L'application des cendres issues de la combustion de paille	22	Répertoire des entreprises qui proposent un service, une expertise, des solutions techniques de valorisation de la paille	46
Biochar et de digestat pour le retour au sol	23		
Chaudières à paille de petite taille	24		
Rendement et environnement	26		

Le plus grand avantage de l'utilisation de la paille dans le secteur de l'énergie est qu'il s'agit d'un combustible neutre en CO2.



La paille comme source d'énergie

La paille peut être une source importante d'énergie renouvelable, comme le montre l'exemple du Danemark.

Malgré que l'utilisation de la paille pour la production d'énergie au Danemark ait considérablement augmenté depuis les années 1980, il existe encore plus de deux millions de tonnes de paille excédentaire, et selon le choix variétal, l'excédent pourrait être encore plus important. Ces dernières années, certaines organisations environnementales - entre autres - ont remis en question l'utilisation croissante de la biomasse pour la production d'énergie. Cependant, pour le cas de la paille (ainsi que d'autres résidus et sous-produits) l'utilisation énergétique pourrait contribuer à utiliser intelligemment cette abondante ressource au Danemark.

Le bilan gaz à effet de serre est considéré neutre pour la paille lorsqu'elle est utilisée pour la production d'énergie. Il y a seulement quelques décennies, la paille était considérée comme un résidu problématique, dont les agriculteurs voulaient se débarrasser le plus rapidement possible. La partie de la paille qui n'était pas utilisée pour l'alimentation, la litière, (et dans d'autres pays la vannerie, l'ameublement : chaises, chapeaux) était généralement brûlée dans les champs après la récolte. Cependant, en 1991, le brûlage dans les champs est devenu interdit et depuis lors, l'utilisation de la paille à des fins énergétiques s'est de plus en plus répandue.

Grâce à des politiques ciblées et à des développements technologiques, le Danemark est devenu un leader mondial dans l'utilisation de la paille pour l'énergie. Celle-ci représente plus de 2 % de la consommation d'énergie du Danemark et environ 10 % de la production d'énergie renouvelable. À l'heure actuelle, la paille est principalement utilisée comme combustible dans les exploitations agricoles individuelles, dans les réseaux de chaleur urbain et dans les grandes centrales électriques et de cogénération. À l'avenir, à mesure que les nouvelles technologies arriveront à maturité et deviendront plus rentables, la paille pourra également être utilisée pour la production de biocarburants liquides et de gaz renouvelable, ainsi que comme matière première pour divers matériaux et produits biosourcés.

Le présent guide se concentre sur le secteur de la transformation de la paille en énergie au Danemark, dont l'importance est une caractéristique unique du pays. Toutefois, il convient de noter qu'il existe plusieurs exemples d'utilisation de la paille à des fins énergétiques en dehors du Danemark, souvent, mais pas toujours, développés avec des technologies danoises. De plus amples informations sur des cas spécifiques sont accessibles sur l'Observatoire AgroBioHeat (www.agrobiomass-observatory.eu).

La politique énergétique - Un levier important

La paille n'aurait pas eu sa place actuelle dans le mix énergétique danois s'il n'y avait pas eu la volonté politique d'exploiter cette ressource renouvelable abondamment disponible dans le système énergétique.

Aujourd'hui, presque tous les partis du parlement conviennent que le Danemark devrait ne plus dépendre des combustibles fossiles d'ici 2050.

Depuis des décennies, les gouvernements danois ont encouragé l'utilisation des énergies renouvelables. En 1976, le Danemark a lancé son premier plan énergétique "Politique énergétique danoise 1976" et s'est depuis lors fait connaître par une politique énergétique active qui met l'accent sur l'utilisation efficace de l'énergie, les économies d'énergie et l'énergie durable.



À partir de 1993, les centrales électriques ont été tenues de mobiliser 1,4 million de tonnes de biomasse par an, dont au moins 1 million de tonnes à partir de la paille. **PHOTO** Torben Skøtt, BioPress.



Depuis la décentralisation de la production d'énergie danoise dans les années 1980, de nombreuses petites centrales produisent aujourd'hui de l'électricité et du chauffage urbain. PHOTO Kirsten Krogh.

Réajustement du système énergétique

Le système énergétique danois, qui, dans les années 1970, était presque entièrement basé sur le pétrole et le charbon importés, se caractérise aujourd'hui par une grande diversification de ses sources d'énergie. Il y a eu une expansion continue des énergies renouvelables, y compris l'énergie éolienne, les déchets, le biogaz et la paille. Les mesures qui ont ouvert la voie à cette évolution comprennent des surtaxes sur les prix de l'énergie fossile, des accords politiques soutenant la mise en place de certains types d'énergie durable, ainsi que l'exonération fiscale sur la biomasse. Ces actions cumulées ont incité dans les années 1980 un grand nombre de ménages, d'exploitations agricoles et de réseaux de chaleur urbain à substituer le fioul au profit de la biomasse.

En 1993, une large majorité parlementaire a conclu un plan d'action pour obliger les centrales à mobiliser 1,4 million de tonnes de biomasse par an, dont 1 million de tonnes de paille. Les objectifs devaient être atteints en 2000, mais l'accord a été révisé à plusieurs reprises et ce n'est qu'en 2009 que les objectifs ont été atteints, avec l'ouverture d'une nouvelle centrale électrique consommant 170 000 tonnes de paille par an sur l'île danoise de Funen (Fyn).

Depuis les années 1980, il y a eu une décentralisation de la production d'énergie danoise. La production d'électricité a ainsi été répartie dans tout le pays pour un élargissement géographique du parc de production. Le chauffage urbain a ainsi pu se répandre en utilisant la chaleur excédentaire issue de ces centrales électriques, faisant du Danemark l'un des pays les plus économes en énergie au monde. Il a été possible de maintenir la consommation d'énergie constante, tout en permettant une croissance économique d'environ 80 %.

En 1990, le Parlement danois a voté la loi encadrant l'approvisionnement en chauffage, donnant ainsi au Ministère en charge de l'Énergie le pouvoir de réglementer le choix du combustible dans les réseaux de chaleur urbain et les centrales combinées thermiques et électriques décentralisées substituant ainsi du charbon et du gaz naturel.

Accords internationaux sur l'atténuation du changement climatique

Il y a quelques décennies, la politique énergétique était uniquement considérée sur le plan national, mais ce sont aujourd'hui - dans une large mesure - des mesures internationales qui ont donné le ton à la politique danoise dans ce domaine. Le développement des marchés mondiaux de l'énergie, la libéralisation du secteur de l'énergie et les obligations liées au protocole de Kyoto et à l'Accord de Paris ont eu et continuent d'avoir un impact considérable sur le secteur de l'énergie au Danemark.

Le Danemark fait partie des pays ayant ratifié l'article 3.4 du protocole de Kyoto, ce qui signifie que les actions permettant le stockage/déstockage de carbone dans le sol doivent être inclus dans les bilans climatiques. En effet, l'exportation de la paille réduit la réserve de carbone du sol, tandis que les cultures énergétiques pérennes telles que les plantations de saule contribuent à stocker du carbone dans le sol. Dans cette logique, l'intégration de cultures d'automne dans l'assolement pourrait semble-t-il compenser l'exportation de la paille des terres agricoles. Sur le paramètre CO₂, le Danemark considère que brûler de la paille dans une chaudière émet moins de CO₂ que les autres énergies fossiles et que cette différence est significativement plus importante que l'effet provoqué par l'exportation des pailles.



Le Danemark a pour objectif national de réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 70 % en 2030 par rapport aux niveaux de 1990 pour lutter contre le changement climatique.

En 2016, le Danemark a ratifié l'Accord de Paris et s'est engagé à limiter le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C et à poursuivre ses efforts pour le limiter à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels. La contribution du Danemark à l'accord est négociée par l'intermédiaire de l'UE.

Objectifs nationaux

Au niveau national, le Parlement danois a approuvé en 2019 une nouvelle loi sur le climat fixant une réduction de 70 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030, ce qui en fait l'objectif le plus ambitieux au monde. Et aucune mention spécifique ne concerne l'usage de la paille – ou de la biomasse en générale – pour atteindre cet objectif.

D'une part, il est demandé au secteur agricole de réduire ses émissions de gaz à effet de serre et l'utilisation adaptée des gisements de paille et d'autres matières végétales résiduelles pourrait contribuer à améliorer l'empreinte carbone globale des exploitations agricoles.

D'autre part, les chercheurs et les organisations environnementales insistent de plus en plus sur le fait qu'à plus long terme, la biomasse devrait être utilisée pour fournir des produits à haute valeur ajoutée, autre que l'énergie.

Indépendance aux combustibles fossiles

En septembre 2010, la Commission danoise pour le climat a publié un rapport qui montre que le Danemark peut devenir indépendant aux combustibles fossiles d'ici 2050 et ce sans impacter négativement l'économie.

Selon elle, les éléments centraux d'un système d'énergie verte seront les suivants :

- Les économies d'énergie
- Les éoliennes offshore, qui peuvent fournir une grande partie de l'électricité qui deviendra la base du futur mix énergétique
- La biomasse, qui jouera un rôle important ; en partie comme carburant dans le secteur des transports, en partie pour la production d'électricité et de chaleur, pour compenser un éventuel manque de production des éoliennes offshore
- Les réseaux de chaleur urbains et les pompes à chaleur pour le chauffage des ménages
- L'électricité et les biocarburants pour la mobilité
- Le développement de smart grid qui permettront une meilleure organisation entre production, stockage et consommation d'électricité pour un système énergétique plus efficace.

Les études montrent que 0,5% du PIB serait mobilisé pour faire un changement complet vers un système d'énergie verte, quand il en coûterait pratiquement autant de continuer à utiliser du charbon, du pétrole et du gaz. L'augmentation des coûts des énergies fossiles prévue à court terme, combinée à l'application des quotas de CO2 devraient pouvoir compenser les coûts d'investissements dans les nouvelles technologies énergétiques et permettre d'être autonome pour la production d'énergie renouvelable.



La paille comme combustible

La paille contient habituellement 14-20% d'eau, qui se vaporise pendant la combustion. La matière sèche se compose d'environ 50% de carbone, 6% d'hydrogène, 42% d'oxygène ainsi que de petites quantités d'azote, de soufre, de silicium, d'alcalins, de chlorure notamment.

Lorsque la paille est utilisée comme combustible, la teneur en eau ne doit pas dépasser 20 %. Si la teneur en eau est plus élevée, il y a un risque de compactage des balles de paille. De même, une teneur élevée en eau augmente le risque de condensation et de corrosion.

La présence de chlore et d'alcalins dans le gaz de combustion peut être un problème de combustion, conduisant au développement de chlorure de sodium et de potassium, qui sont très agressifs et engendrent de la corrosion dans les corps de chauffe, les échangeurs de chaleur et les cheminées – en particulier à des températures élevées. L'objectif est d'utiliser la paille avec un faible taux de minéraux indésirables, et les conditions pédo-climatiques jouent un rôle très important, et d'autres facteurs interviennent. La paille peut prendre une teinte grise lorsqu'elle est exposée aux intempéries après la phase de maturation - surtout après la récolte. Celle-ci est beaucoup moins agressive que la paille jaune, qui a été mise à l'abri aussitôt la récolte.

La teneur en cendres peut varier entre 2 et 10%, la moyenne étant de 4-5%. La paille issue d'un sol sablonneux a normalement une plus faible teneur en cendres et aura un meilleur PCI qu'une paille ayant poussé des sols arables profonds et riches en minéraux.

A partir de 600 degrés, les cendres issues de la combustion de la paille peuvent se déformer, s'agglomérer. Un risque de volutage

La paille grise, est beaucoup moins corrosive dans la chaudière que la paille jaune.

est à considérer dans le foyer, synonyme de mauvaise évacuation des cendres, voire de vitrification des cendres et de colmatage des grilles. Des nouveaux types de chaudières et d'alliages d'acier plus résistants permettent de réduire ce phénomène, mais les centrales électriques continuent à considérer la paille comme un combustible plus difficile à brûler que le bois.

Les ressources en paille

Il y a un doute sur la disponibilité actuelle et future de la paille pour la production d'énergie. L'agriculture fournit non seulement des matières premières au secteur énergétique, mais elle doit également produire des denrées alimentaires et des aliments pour les animaux tout en respectant la protection et la durabilité des sols (la biodiversité, le lessivage des éléments nutritifs et le réservoir de carbone du sol). En enfouissant la paille dans le sol, cela augmentera la teneur en carbone du sol, ce qui a un impact sur l'atténuation du changement climatique comme mentionné à la page précédente.

Il y a un doute sur la disponibilité actuelle et future de la paille pour la production d'énergie. L'agriculture fournit non seulement des matières premières au secteur énergétique, mais elle doit également produire des denrées alimentaires et des aliments pour les animaux tout en respectant la protection et la durabilité des sols (la biodiversité, le lessivage des éléments nutritifs et le réservoir de carbone du sol). En enfouissant la paille dans le sol, cela augmentera la teneur en carbone du sol, ce qui a un impact sur l'atténuation du changement climatique comme mentionné à la page précédente.



	Paille jaune	Paille grise	Plaquettes de bois	Charbon
Teneur en eau	10-20%	10-20%	40-50%	12%
Cendre	4%	3%	1%	12%
Carbone	42%	43%	50%	59%
Hydrogène	5%	5%	6%	4%
Oxygène	37%	38%	38%	7%
Chlorure d'azote	0.75%	0.20%	0.02%	0.08%
Azote	0.35%	0.41%	0.30%	1.00%
Soufre	0.16%	0.13%	0.05%	0.80%
Pouvoir calorifique	14.4 MJ/kg	15.0 MJ/kg	10.4 MJ/kg	25.0 MJ/kg

TABEAU 1

Paramètres importants à considérer pour une utilisation en combustible de paille, plaquettes de bois et de charbon. La paille jaune est stockée immédiatement après sa récolte, tandis que la paille grise a été soumise à la pluie avant la reprise.

Cependant, la manipulation et le transport de la paille peuvent être très coûteux, et si la distance entre le champ et la chaufferie est trop importante le coût d'approvisionnement risquera d'impacter négativement le prix de l'énergie rendue chaufferie. La paille est principalement commercialisée localement mais rien n'empêche la vente de granulés de paille au-delà des frontières, même-si cela n'est pas observé dans les faits.

Au Danemark, la production totale de paille a été en moyenne d'environ 5,5 millions de tonnes par an entre 2013 et 2019, dont 3,4 millions de tonnes ont été utilisées dans l'agriculture et à des fins énergétiques. Par conséquent, il y a un excédent annuel de paille d'environ 2,1 millions de tonnes.

Cependant, 2018 se distingue avec une production de seulement 4 millions de tonnes en raison d'une importante sécheresse cette année-là, montrant que le changement climatique, ce qui n'est pas surprenant, peut influencer la sécurité de l'approvisionnement.

En effet, bien que la superficie dédiée aux céréales s'est avérée

relativement constante, des variations significatives de rendement sont régulièrement observées d'une année à l'autre et représente le risque d'insécurité le plus élevé dans l'approvisionnement en paille en dehors des événements météorologiques extrêmes.

Le surplus de paille et sa variation d'une année à l'autre doivent être estimés précisément pour garantir l'approvisionnement, et cela d'autant plus si la consommation de paille pour la production d'énergie augmente. L'usage en litière et en alimentation du bétail est plutôt stable.

Cependant, par exemple en France, le Schéma National Biomasse (SNB), un document de recommandations et de planification, visant un développement équilibré et cohérent des filières (coexistantes et parfois concurrentes) de production et de valorisation énergétique de la biomasse, et dans un objectif d'atténuation du changement climatique, peut orienter la paille vers le retour au sol en tant qu'amendement organique pour maintenir la fertilité des sols. Ce plan national se décline et est adapté à travers les Schémas Régionaux Biomasse (SRB).

Production de paille en millions de tonnes

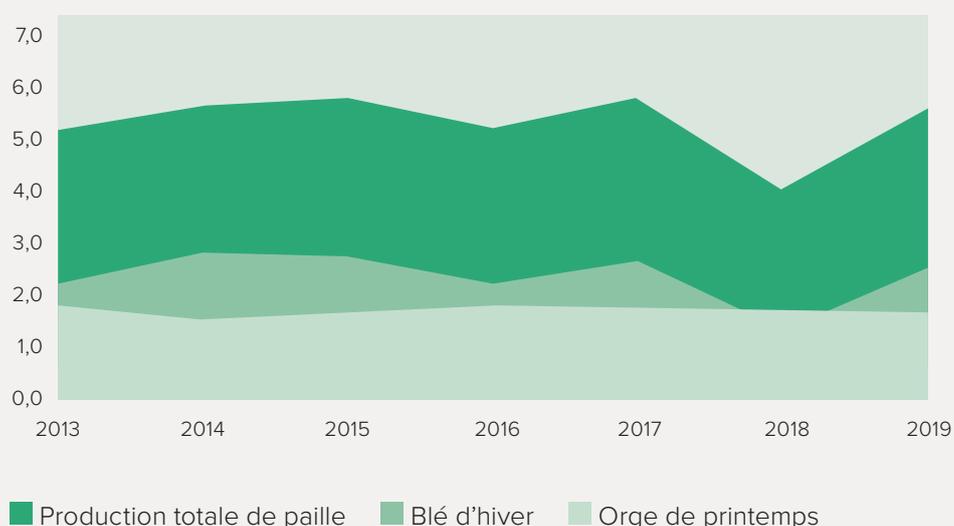


FIGURE 1

La production totale de paille danoise sur une sélection de trois cultures. Même un petit changement dans les rendements obtenus sur les grains entraîne une variation significative de la production de paille. Si la quantité de paille de blé varie de 1 kg par quintal, la production totale de paille de blé au Danemark varie de 47 000 tonnes.

Source: Statistiques Danemark.



Europe

Au niveau européen, Helin et al. ont estimé la quantité annuelle de paille récupérable à 33,4 millions de tonnes (DM), la France et l'Allemagne ayant de loin les plus grandes quantités. Dans le tableau 2, l'Ukraine et les pays des Balkans sont également inclus. Cette estimation reste prudente, sachant que l'excédent annuel danois dans une « année normale » est de 1,4 tonne (estimée par Helin et al.) alors que l'estimation faite par les danois eux-mêmes s'élève à 2,1 millions tonnes.

Pays	Potentiel de paille récupérable (1 000 tonnes)
France	5474
Ukraine	5774
Allemagne	5320
Italie	1142
Hongrie	1356
Roumanie	1032
Pologne	2252
Espagne	1770
Royaume-Uni	2477
Serbie - Monténégro	413
République tchèque	1480
Danemark	1409
Bulgarie	641
Autriche	331
Grèce	303
Slovaquie	496
Suède	478
Croatie	101
Lituanie	452
Finlande	402
Belgique	83
Bosnie - Herzégovine	0
Lettonie	157
Portugal	0
Estonie	75
Slovénie	0
Pays-Bas	0
Albanie	0
Luxembourg	5
Chypre	0
Irlande	0
Malte	0
Total	33423

TABLEAU 2

Quantité annuelle de paille récupérable pour l'UE 27, l'Ukraine et les pays baltes (Helin et al.).



La proportion de paille et de grain dépend de la variété sélectionnée. Il serait ainsi possible, par une sélection visant la production de paille, d'augmenter la quantité totale de 800 000 tonnes par année.

PHOTO Jørgen Hinge/Institut technologique danois.

Variation des rendements

Des essais sur le terrain avec le blé d'hiver au cours de l'année de récolte 2008 ont montré ces effets permis par une sélection appropriée. Parmi dix variétés différentes de blé d'hiver, les échantillons ont produits de 35 à 53 kg de paille par 100 kg de grain.

Attention, l'augmentation théorique de 800 000 tonnes par an est basée sur le blé d'hiver, hors dans la pratique une multitude de variétés de céréales sont cultivées, ces résultats sont donc à considérer avec précaution

Au-delà de la sélection variétale, les pratiques culturales ont un impact : plus on fertilise le blé d'hiver et moins on produit de paille. L'utilisation de raccourcisseurs de paille (souvent à base de chlorméquat) peuvent être utilisés afin de limiter les risques de « verse » (cassure de la tige sous le poids des graines). L'encadrement des pratiques culturales vise une utilisation maîtrisée des engrais et des produits phyto-sanitaires, et devrait ainsi limiter les risques sur la qualité et la quantité de paille mobilisable.

Manutention de la paille

Afin d'assurer un approvisionnement en paille à grande échelle, d'une qualité satisfaisante et à des prix raisonnables, toute la chaîne d'approvisionnement est importante aussitôt la moisson réalisée : le pressage carré ou rond, la reprise des balles au champs, le transport routier, le stockage doivent être optimisés. Les agriculteurs ne disposant pas de matériels performants (récolte, pressage) et/ou de grandes capacités (remorque agricole, semi-remorque).

Les agriculteurs peuvent faire appels à des prestataires extérieurs ou déléguer complètement les travaux liés à la paille. Depuis les années 1980, le Danemark est ainsi largement équipé pour approvisionner en paille le secteur de l'énergie.



Mise en andain et pressage de paille au champ.
PHOTO Jørgen Hinge/Institut technologique danois.

Après ou lors de la récolte, la paille est mise en andains dans le champ et les éléments de manutention suivants sont appliqués en fonction des conditions météorologiques et d'autres facteurs :

- Mise en andain
- Pressage et mise en balles
- Granulés, briquettes et paille broyée
- Chargement et déchargement des camions et remorques
- Transport sur le terrain
- Stockage décentralisé
- Chargement pour le transport routier
- Transport routier
- Déchargement à l'usine
- Enregistrement du poids et de la teneur en humidité
- Stockage (à l'usine)

Mise en andain

Si les conditions météorologiques sont bonnes pendant la récolte, la paille peut être mise en balles immédiatement après que la moissonneuse-batteuse ait laissé les andains dans le champ. Les râteaux modernes sont conçus pour étendre l'andain sur toute la largeur du râteau (afin de faciliter le séchage à l'air).

Si la paille est trop humide (teneur moyenne en humidité supérieure à 15 %), il faut la laisser sécher en andains avant de la mettre en balles. Selon les conditions météorologiques, il peut être nécessaire de retourner les andains.

Mise en balles

Aujourd'hui, les centrales de cogénération et les réseaux de chaleur urbains utilisent presque exclusivement des grandes balles carrées (big-baller). Les petites balles carrées sont rarement utilisées pour la production d'énergie (peut-être encore pour les très petites et anciennes chaufferies agricoles) et les balles rondes (round baller) ne sont utilisées que pour les chaufferies spécifiquement conçues pour cela.

Type de balle	Dimensions L x W x H (cm)	Poids kg.	Densité (kg/m ³)
Petites balles carrées	70-90 x 46 x 36	12-15	90-100
Balles rondes	120 x 170*	220-270	100-120
Balles carrées	200-240 x 80 x 80	200-250	110-150
Grande balles carrées haute densité	230-250 x 120 x 90	450-650	160-230
Grandes balles carrées	230-250 x 120 x 130	450-650	140-170

TABLEAU 3
 Propriétés des balles de paille. *largeur x diamètre.

Au fil du temps, le poids des balles carrées a augmenté, et des tentatives sont toujours en cours pour densifier la paille afin de réduire les coûts pour le transport routier. En transportant trois rangées de grandes balles carrées haute densité au lieu de deux rangées de grandes balles carrées il est possible de transporter près de 50% de paille en plus.

Cela a un impact sur les équipements à prévoir le long de la chaîne d'approvisionnement : des grues de capacité d'une tonne sont mises en place pour la manutention et les chemins agricoles sont aménagés et empierrés si besoin.

La conception des chaufferies est également réalisée pour permettre l'incorporation des balles carrées de toute densité et de toute taille.

Les granulés, les briquettes et la paille broyée

Le pressage et la mise en balle de la paille est l'opération la plus coûteuse de la chaîne d'approvisionnement. Serait-il intéressant de produire des granulés de paille ou des briquettes à la place ? Ou même de simplement hacher la paille et la manipuler en tant que telle, sans mise en balle ou granulation ?

En granulant ou en transformant la paille en briquette, il est possible de rendre la manipulation ultérieure de la paille plus efficace et, dans la plupart des cas, moins chère. En effet les granulés de paille/briquettes ont une densité plus élevée et le transport routier est moins cher.

Le soufflage des granulés permet d'alimenter des silos aériens et de s'abstenir de grues ou de chargeur de fortes capacités pour l'approvisionnement de la chaufferie.

Cependant, pour produire des granulés, il faut tout de même mettre la paille en balles et la transporter vers une installation de granulation, donc les coûts totaux seront plus élevés que pour les chaînes d'approvisionnement en grandes balles et en balles midi-grandes. Deux possibilités pour réduire le coût :

- Lorsque la distance de transport est très importante, le fret maritime de pellets est possible
- La granulation au champ pourrait être une solution pour éviter le passage initial mais c'est encore peu développé et non rentable pour le moment.



Briquette de paille. PHOTO Food et Bio Cluster Danmark.

Dans les années 2000, la centrale de cogénération d'Amager à Copenhague a massivement utilisé des granulés de paille. Ceux-ci étaient produits à seulement 50 km au sud de Copenhague dans l'usine de granulés bio de Køge et les granulés étaient expédiés à Amager par bateaux, afin d'éviter les transports de poids lourds à travers la ville. Cette activité a cessé depuis que la chaufferie Amager utilise des granulés de bois.

Au Danemark, il a été démontré que la transformation de la paille en briquettes sous haute pression a pour effet secondaire positif d'augmenter la digestibilité de la paille dans les unités de production de biogaz. Attention, toutes les technologies de méthanisation ne permettent pas d'incorporer de la paille (ce point sera abordé plus loin).

Au début des années 1990, des expériences ont été menées avec de la paille broyée, qui était stockée en conteneurs dans les champs mais les coûts de transport étaient trop élevés et le concept a été abandonné au milieu des années 1990.



Déchargement de deux balles de paille à la fois avec un chargeur télescopique pour optimiser la manutention.

PHOTO Torben Skøtt, BioPress.

Chargement et déchargement des camions et remorques

De multiples équipements sont envisageables pour la manutention de la paille : chargeur installé à l'avant d'un tracteur, d'un mini-tracteur, d'une pelleteuse, d'un tracto-pelle, ou encore transpalette et chargeur télescopique.

Ces derniers sont plus répandus, car ils ont une plus grande capacité, et une fois déployés ils permettent d'atteindre des hauteurs importantes et d'optimiser le rangement.

Le mini-chargeur et le transpalette, malgré qu'il soient peu répandus, sont très flexibles et peuvent être utilisés dans des endroits exigus.

Comme le montre la figure 2, le chargement avec un chargeur frontal est plus laborieux qu'avec un chargeur télescopique qui peuvent charger deux balles à la fois et permet d'économiser 2,5 minutes par tonne. Ramené au chargement d'un million de tonnes pour l'approvisionnement des unités de valorisation énergétique, le volume horaire économisé est de 41.000 heures.

Les grandes centrales électriques sont pour la plupart du temps équipées de grue pour le déchargement et ce point sera abordé plus loin.

Transport au champ

Au champ, les bottes sont transportées à l'aide d'une remorque attelée à un tracteur, pour être entreposées au champs ou sous abri (par exemple à la ferme). Si la distance est inférieure à 10 km, les balles de paille sont transportées directement à la chaufferie. Si la capacité de stockage de la chaufferie le permet, les balles sont transportées à l'aide de semi-remorque.

Stockage décentralisé

En général, les unités de cogénération ont une capacité de stockage tampon limitée à quelques jours, de sorte que la grande majorité de la consommation annuelle de paille doit être conservée sur des sites auxiliaires plus ou moins bon marché qui permettent, ou non, de maintenir qualité de combustible et d'éviter les pertes par moisissure.

En effet, pour une conservation longue durée, il faut privilégier un stockage sous abri, cloisonné sur les côtés et sur un sol bétonné car c'est le mode de stockage qui garantit la meilleure conservation mais qui représente aussi le coût le plus élevé. La création d'un hangar dédié augmente le coût final du produit, c'est pourquoi il convient de privilégier des hangars existants pour avoir un bon compromis avec la qualité souhaitée. Un hangar ouvert sur les côtés conviendra et représentera un coût moins élevé.

La couverture des balles au champ à l'aide de bâches est une alternative réduisant à la fois les coûts de transport et de stockage, d'autant plus si le stockage est réalisé à proximité d'une route.

Autrefois empilées l'une sur l'autre, il est maintenant possible par un système de chevauchement d'empiler bien davantage de balles.

Certains ajoutent une rangée de balle sur la bâche pour faciliter sa fixation.

Attention, selon la rotation des cultures envisagée, un stockage prolongé pourra perturber la mise en culture suivante.

Quelques précautions sont à prendre pour le stockage sous bâche au champ, notamment privilégier le haut du champ en cas de pente pour limiter les risques de moisissure à la base des tas.

Des moisissures peuvent également apparaître en haut du tas par condensation si la paille a été entreposée humide.

Le stockage à l'air libre est toujours pratiqué par certains fournisseurs de paille.

Attention, pour une utilisation combustible, la couche supérieure est inutilisable, ainsi que la couche inférieure qui a absorbé l'humidité du sol.

Une valorisation en méthanisation peut être envisagée sous certaines conditions et selon la technologie employée. Si cette solution n'est pas envisageable, le retour au sol direct est à privilégier. Quoiqu'il en soit le tri est très laborieux et aura un coût supplémentaire de main d'œuvre.

Manipulation de paille en minutes par balle

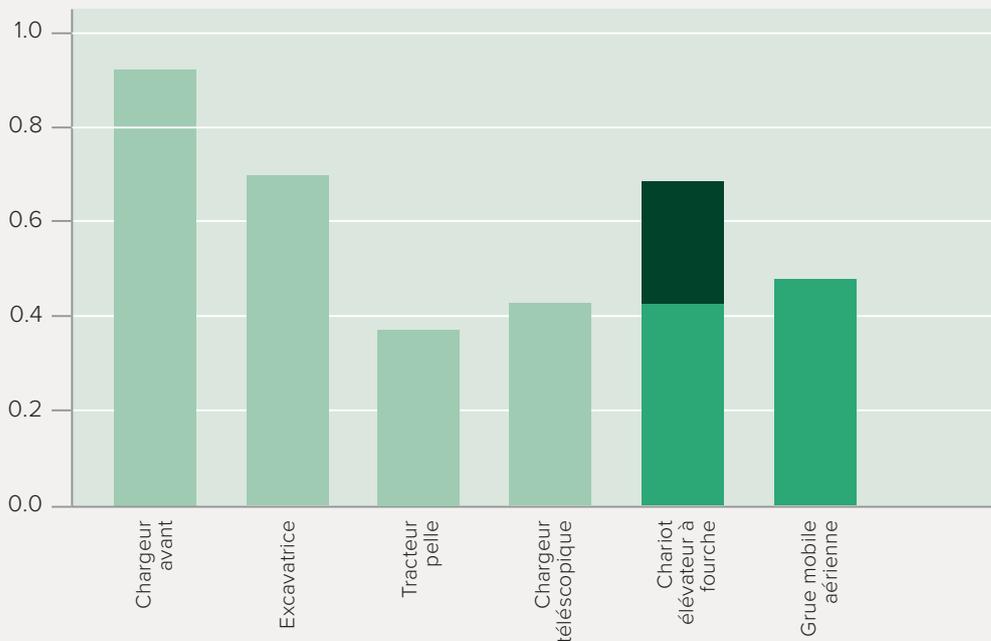


FIGURE 2

Temps passé pour le chargement, l'optimisation du rangement et le déchargement de la paille. Lors du déchargement à l'aide d'un chariot élévateur à fourche, on consacre plus de temps à la pesée et à l'analyse d'humidité de la paille. (Source : Centre for Biomass Technology).

Les unités de valorisation n'ont qu'une capacité de stockage tampon de quelques jours, la consommation annuelle de paille fait l'objet de stockage décentralisé.



PHOTO Alimentation et Bio Cluster Danemark.

Transport routier

Pour faciliter la reprise à la livraison il peut être exigé dans le cahier des charges avec le fournisseur que les balles soient chargées d'une manière spécifique pour le transport – généralement en rangées de 6 (2 x 3) sur le camion porteur et/ou la remorque et éviter les surcharges. Certaines chaufferies exigent également que les balles soient recouvertes d'un filet pendant le transport afin d'éviter que de la paille ne soit dispersée sur la route pour des raisons de sécurité.

Déchargement à l'usine

Une fois passé au pont bascule pour effectuer la pesée, la plupart des petits réseaux de chaleur urbains utilisent encore des chargeurs frontaux pour le déchargement des balles de paille.

Les chaufferies de grande taille ont pour la plupart mis en place le déchargement par système de grue capable de transférer six balles en une seule manipulation. Cette même grue est utilisée pour reprendre les balles du stockage tampon vers la bande transporteuse qui achemine la paille vers le(s) broyeur(s) en amont du foyer de la chaudière.

Beaucoup de ces grues sont équipées d'un enregistrement automatique de la masse et de l'humidité des balles, réduisant ainsi le temps alloué au déchargement des camions de livraison. La teneur en humidité peut également être mesurée à l'aide d'étuve, d'une sonde manuelle ou d'un micro-ondes.

Protection de la santé et sécurité des opérateurs

Le travail de manutention dans le secteur agricole est fréquent et comporte certains risques. Le poids et l'encombrement des bottes de paille nécessitent une prudence lors de leur manipulation et particulièrement lors de leur mise en tas.

Des mesures doivent également être prises pour éviter les incendies, en particulier dans les grands entrepôts. Au Danemark, il existe des

règlements très stricts concernant a) les quantités, b) les dimensions du tas de bottes, c) les distances entre le stockage et les autres bâtiments et d) les voies publiques.

En effet, en cas d'incendie il est pratiquement impossible d'éteindre un feu de paille, il est possible de le contrôler. Les mesures légales visent à :

- a) Limiter les quantités de produits stockés
- b) S'assurer que le feu peut être maîtrisé et contrôlé
- c) S'assurer qu'il ne se propage pas aux bâtiments ou autres entrepôts
- d) Prévenir les situations dangereuses sur les routes causées par la fumée d'un incendie

La manipulation de paille peut également entraîner beaucoup de poussière - et même des spores fongiques – d'autant plus si la paille a été mouillée. Cela peut donc provoquer des gênes respiratoires dans des environnements clos et peu aérés. Un masque antipoussière doit être appliqué par l'opérateur.



La teneur en humidité de la paille est contrôlée avant le déchargement. Si la teneur en eau est supérieure à 25%, elle n'est pas introduite dans la chaudière. PHOTO Torben Skøtt, BioPress.



**L'emrubannage permet
un stockage extérieur
décentralisé sans
endommager la qualité
de la paille.**

Durabilité de la combustion de paille

L'utilisation de la paille pour la production d'énergie thermique peut être durable à condition que des mesures appropriées soient mises en œuvre.

Comme mentionné précédemment, l'exportation de la paille répétée sur plusieurs années peut entraîner une carence et une modification du carbone du sol, comparativement aux pratiques qui consistent soit à enfouir la paille directement lors de la récolte, soit par épandage du fumier après que la paille ait été utilisée comme litière animale.

Incidences agronomiques de l'exportation de la paille

De nombreuses recherches ont été menées par l'institut de recherche danois Askov, St. Jyndeved et Rønhave, et des essais ont été réalisés. Les résultats montrent que la teneur en carbone du sol dans les 20 centimètres supérieurs est significativement plus élevée lorsque la paille a été incorporée pendant 36 ans (Rønhave) et 29 ans (Askov et St. Jyndeved).

Ces travaux ont également montré que ce manque peut être compensé par :

- le retour au sol des cendres de combustion sous foyer qui con-

tiennent de nombreux nutriments et minéraux.

- l'implantation de couverts végétaux après la récolte, qui sont ensuite incorporées dans le sol.

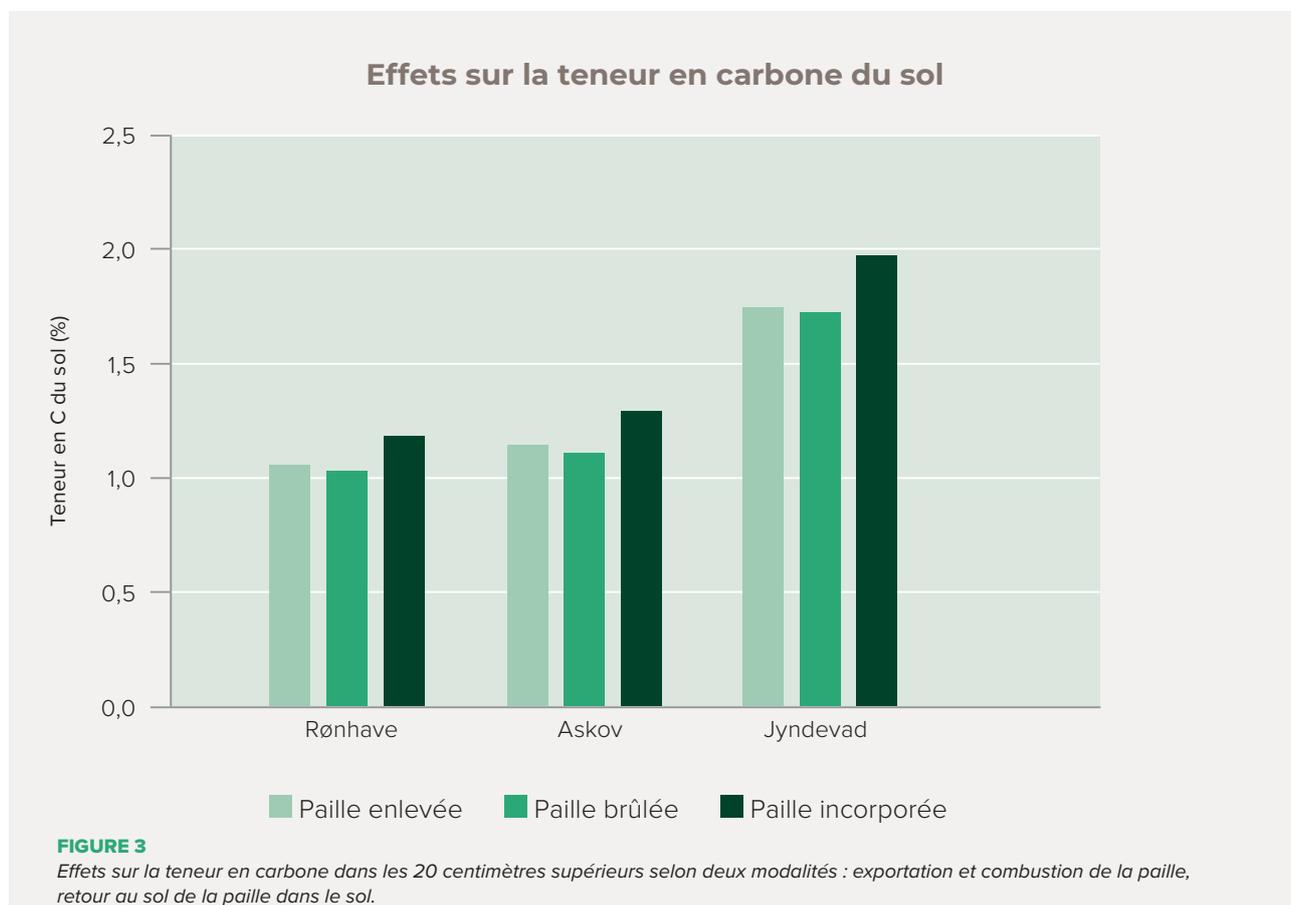
- une fertilisation renforcée par les lisiers (porcs, bovins) et les engrais minéraux.

Face à ces résultats, le débat est lancé par la profession agricole danoise qui pose notamment les questions sur :

- la chute des rendements observée des cultures sur les terres où les pailles sont exportées,

- la qualité des sols, et plus précisément le risque accru d'érosion des sols dus à une teneur en humus plus faible dans le sol qui ne permet pas une bonne aggradation des sols.

Dans tous les cas, l'implantation de couverts végétaux et la couverture permanente des sols a un double impact positif sur le taux de carbone du sol et la retenue des sols face aux risques d'érosion.



Métaux lourds	Seuil (mg par kg de matière sèche)
Mercure	0,8
Plomb	120
Nickel	60
Chrome	100
Cadmium	5

TABLEAU 4
Seuils de métaux lourds.

Les cendres provenant de la combustion de la paille contiennent de nombreux éléments nutritifs.

L'application des cendres issues de la combustion de paille

Les éléments nutritifs contenus dans les cendres – le phosphore et le potassium en particulier – sont agronomiquement intéressants. Les cendres de biomasse, y compris la paille, font l'objet de plans d'épandage réglementés pour maîtriser la teneur en éléments indésirables, principalement les métaux lourds.

Au Danemark, il existe un décret dédié au retour au sol en parcelle agricole «Bioaskebekendtgørelsen» dont l'objectif principal est de contrôler les quantités de métaux lourds appliquées au champ.

Dans le tableau 4, les valeurs seuils pour les métaux lourds dans les cendres indiquent un maximum de 0,8 g de cadmium par hectare et par an (en moyenne sur cinq ans) et qu'un maximum de cinq tonnes de cendres (DM) peut être appliqué par hectare sur une période de cinq ans.



PHOTO Adam Weller.



Biochar. PHOTO Food et Bio Cluster Danemark.

Biochar et de digestat pour le retour au sol

Une solution alternative consisterait à produire un biochar issu de la gazéification/pyrolyse de la paille (ou d'autres types de biomasse) qui contient encore une certaine quantité de carbone (comparé aux cendres sous foyer issues de la combustion), ainsi que des nutriments. Cependant, comme décrit plus tard, la pyro-gazéification de la paille est un processus difficile, et les unités sont rares ou inexistantes au Danemark.

Le biochar ne présente pas de propriétés fertilisantes, en revanche le digestat issu de la digestion anaérobique des matières fermentescibles dans les unités de biogaz, contient encore beaucoup de carbone, et d'éléments fertilisants. Lorsque la paille est digérée dans une unité de biogaz, entre 40 et 60 % de la matière organique est généralement convertie en méthane et en dioxyde de carbone, donc le retour au sol du digestat restituera environ la même quantité

de carbone sera redistribuée vers le sol. Le rendement énergétique de la combustion de la paille est donc sensiblement plus élevé que celui de la digestion anaérobique.

Cependant, contrairement à la combustion où certains fertilisants sont transformés en gaz de combustion, en particulier l'azote (en NOx), tous les éléments N, P, K sont conservés dans le digestat. Attention cependant, toutes les technologies de méthanisation ne permettent pas d'incorporer de paille. Tout d'abord, les micro-organismes ne sont pas tous en capacité de digérer les brins de paille. Certaines flores bactériennes (thermophile > 50°C) sont en mesure de digérer ces matières ligneuses à condition que des équipements spécifiques sont prévus dès la conception : incorporation, préparation (pré-broyage), de pompage (pompe dilacératrice capable de hacher une seconde fois), circulation et brassage dans le digesteur.

Chaudières à paille de petite taille

Après la première crise énergétique en 1973, beaucoup de gens ont commencé à chercher une source de chaleur moins chère et plus stable économiquement dans le temps que le pétrole, et pour les agriculteurs, il était naturel de se tourner vers la grande quantité de paille, qui à l'époque était juste brûlée dans les champs.

Les chaudières individuelles à paille ont connu un développement rapide depuis leur apparition sur le marché à la fin des années 1970. L'amélioration continue des chaudières a permis d'augmenter les rendements de combustion (X2), réduction significative des émissions atmosphériques. De nombreux agriculteurs danois ont choisi de développer de petits réseaux de chaleur à la ferme avec des puissances de chaudières légèrement plus importantes, permettant la production d'eau chaude sanitaire et fourniture de chauffage

centrale pour les voisins à la fois bon marché et écologique.

D'abord conçues pour les petites balles avec une alimentation manuelle ou semi-manuelle avec un chargeur frontal (voir figure 4), les chaudières ont évolué vers des systèmes automatiques pouvant incorporer des balles rondes, puis des balles carrées, permettant à la fois un meilleur confort d'utilisation et de maintenance, ainsi qu'une meilleure autonomie pour l'alimentation en combustible et l'acheminement automatique des cendres vers un cendrier.

La chaudière à alimentation manuelle est relativement bon marché avec des coûts d'exploitation pouvant être intéressants selon le coût de la main d'œuvre car les temps d'approvisionnement en paille et d'évacuation des cendres sont des éléments à considérer et à ne pas négliger.

Chaudière à paille avec ballon tampon

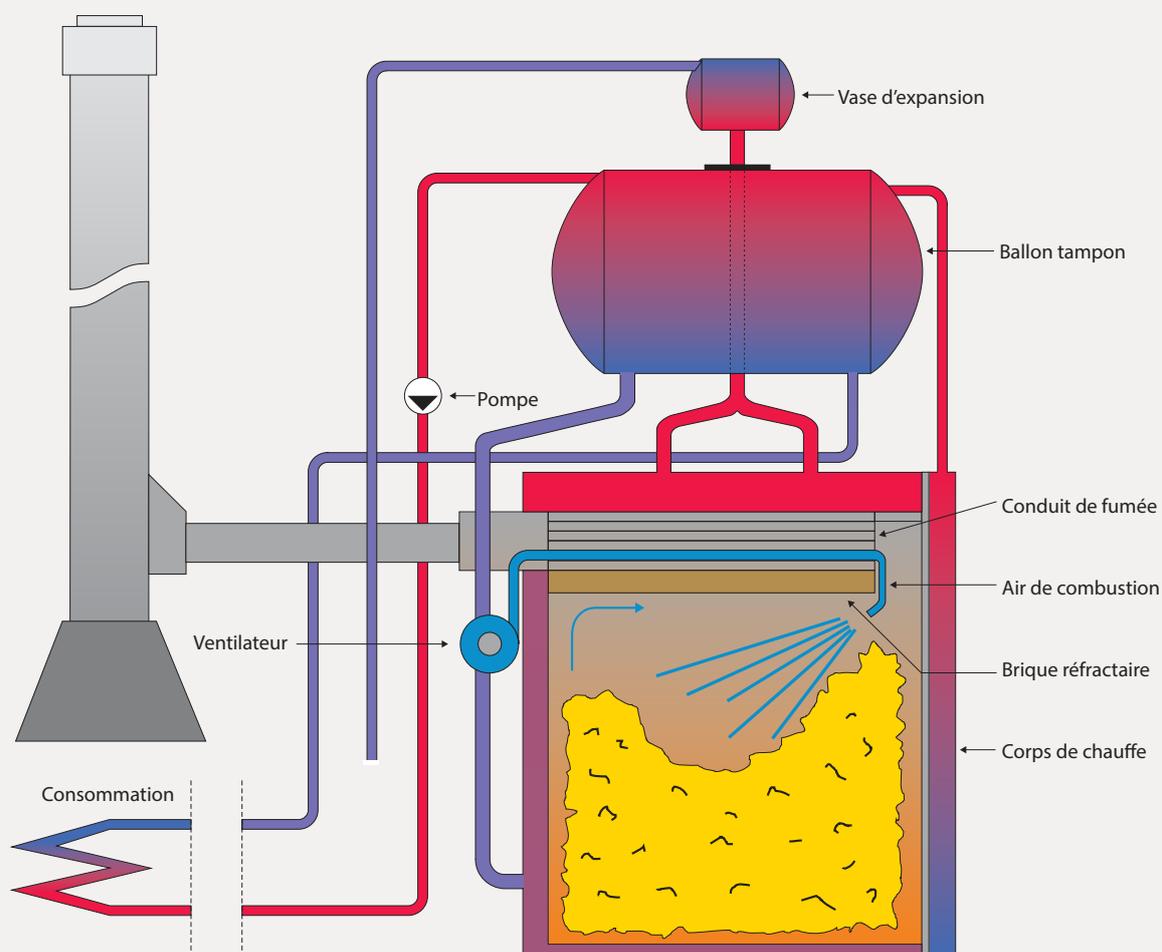


FIGURE 4

Chaudière à paille avec ballon tampon.



Foyer à alimentation manuelle pouvant accueillir des grandes balles carrées.
PHOTO Torben Skøtt, BioPress.

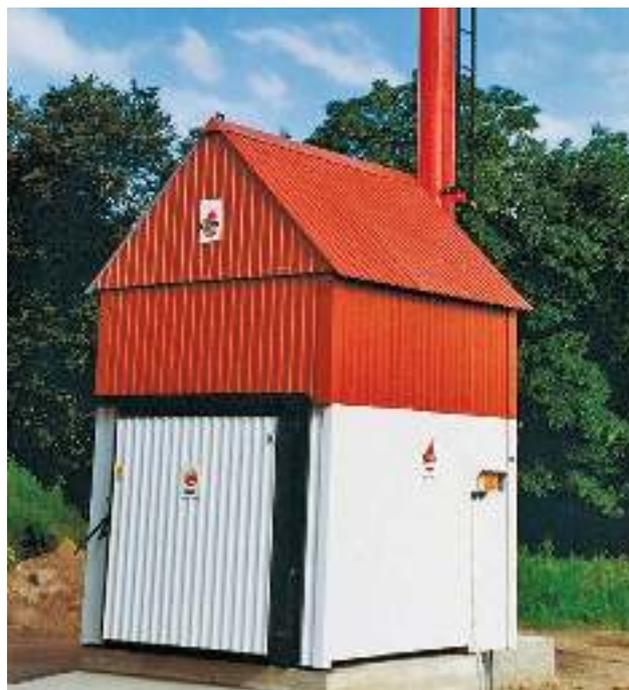
Chaudière manuelle ou automatique ?

Le système d'alimentation automatique comprend un convoyeur à tapis qui achemine les bottes de paille vers un collecteur qui broie la paille. La paille broyée est reprise par une vis sans ou est propulsée par air comprimé à l'aide de ventilateur.

Les coûts d'investissement des chaudières automatiques sont comparativement plus élevés que les chaudières manuelles, mais en contrepartie, le besoin en main d'œuvre sont optimisés et les coûts d'exploitation peuvent être ainsi réduits.



Chaudière automatique de 800 kW de Linka Energy.
PHOTO Linka Energy.



Les chaufferies sont souvent installées dans un bâtiment séparé afin de réduire les risques d'incendie. **PHOTO** Torben Skøtt, BioPress.

Rendement et environnement

Avant 1976, le rendement des premières chaudières à paille était de l'ordre de 30 à 40 %, ce qui entraînait une mauvaise combustion et l'émission de fumées polluantes. Depuis l'Institut danois de recherche agricole a commencé à tester les chaudières à paille et à aider les fabricants à développer leurs produits.

En outre, afin d'accélérer le développement, l'Agence danoise de l'énergie a mis en place un régime de subventions en 1995, avec des critères techniques et des exigences environnementales. Cela a permis d'améliorer considérablement le rendement jusqu'à plus de 80 % (voir figure 5).

Cela a considérablement contribué à réduire les émissions de monoxyde de carbone, de suie et de goudron, ce dernier étant composé de divers acides organiques et les HAP, qui sont cancérigènes.

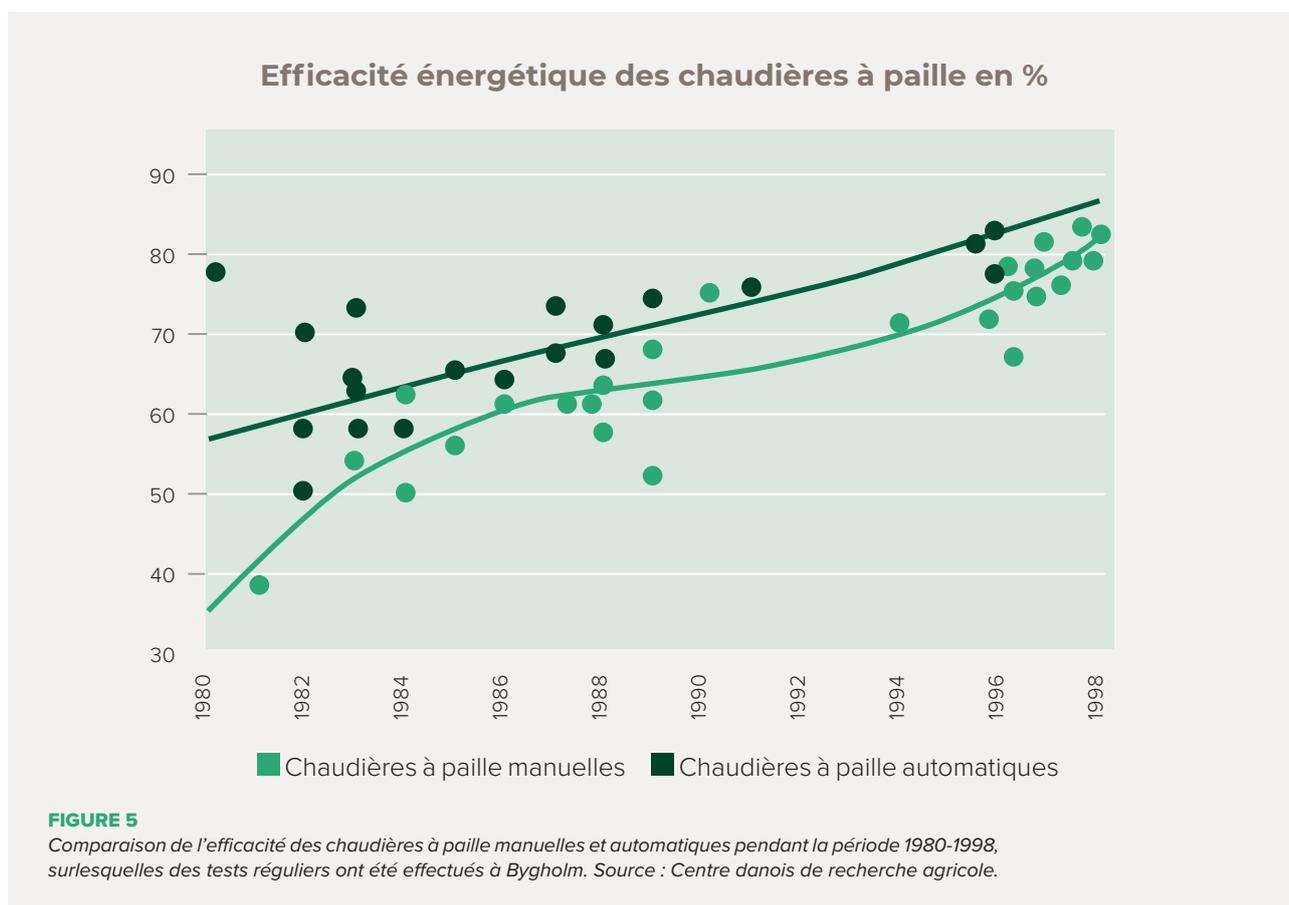
La présence d'imbrûlés dans les fumées témoigne d'une combustion incomplète. La conception de la chaudière et son dimensionnement, mais aussi la qualité du combustible et les réglages par l'exploitant permettent d'optimiser la combustion notamment par une bonne maîtrise de la température dans le foyer permettant d'obtenir un bon compromis avec le risque de déformation des cendres (autour de 800-900°C pour la paille et 1100°C pour le bois) tout en produisant un minimum de gaz imbrûlés (minimum 800-900°C). Plus le rendement est élevé, plus on réduit la consommation de combustible.

La conception des chaudières a nettement évolué et la plupart des installations d'aujourd'hui sont dotés d'automatismes permettant

d'actionner divers mécanismes (convoyage du combustible et des cendres, grilles mobiles, nettoyage des échangeurs de chaleur) et de répondre aux besoins de chauffage. Les chaudières automatiques sont aussi équipées d'appareils de mesures tels que la sonde Lambda.

Nettoyée régulièrement, cette sonde détecte et corrige toute mauvaise combustion. Située au niveau de la sortie des fumées, elle contrôle en permanence le taux d'oxygène. Pouvant être associée à une sonde de pression, elle peut contribuer à faire varier la vitesse de l'extracteur de fumée. Parallèlement, elle peut contribuer à modifier l'arrivée de combustible en augmentant ou diminuant les temps d'alimentation. Elle est associée à une sonde de température de fumées afin de réguler les paramètres préalablement réglés par l'exploitant, notamment en optimisant l'arrivée d'air secondaire à la sortie des flammes, permettant ainsi une combustion rapide et complète des gaz et goudrons.

Une température trop basse dans la chambre de combustion peut dégrader le rendement et entraîner des émissions inutiles.



Dimensionnement de la chaudière

Lors de la phase de montage du projet, il est important de ne pas surdimensionner la chaudière par rapport aux besoins de chauffage pour éviter les temps d'arrêts et de fonctionnement à bas régime qui ne permettent pas une bonne combustion.

Les installations de chauffage avec réseau de chaleur fonctionnent souvent en bi-énergie, c'est-à-dire avec une énergie d'appoint (fioul domestique, gaz, etc.) pour les jours les plus froids de l'année et/ou en secours. La puissance d'une chaudière biomasse représente généralement de 40 à 60% de la puissance maximale appelée de façon à couvrir 80 à 90% des besoins annuels.

Stockage

Pour assurer un fonctionnement régulier tout au long de l'année, il est important de prévoir un ballon tampon qui puisse fournir la chaleur même quand la chaudière ne fonctionne pas, surtout avec une chaudière manuelle. Le ballon tampon permet d'augmenter les temps de fonctionnement à pleine charge et réduit les fréquences d'arrêts et de mise en route, en cas de maintenance notamment. Le réservoir prévoit généralement 60 à 80 litres d'eau par kilo de paille que le foyer peut contenir.

Une journée entière de chauffage correspond à environ 6 à 8 heures de fonctionnement. La mise en place de ballons tampons sur le réseau hydraulique primaire permet d'obtenir un meilleur rendement de combustion avec des temps de fonctionnement à pleine charge pour une meilleure efficacité.





Réseau de chaleur rural à la ferme

Aujourd'hui, plus de 60 % des foyers danois sont raccordés à un réseau de chauffage urbain, ce qui ne permet pas d'envisager un fort potentiel de développement sur ce secteur.

En secteur rural, la faible densité des réseaux nécessite de prospecter d'autres potentiels clients à raccorder. Le Danemark prospecte ainsi de nouveaux quartiers à développer sous forme de micro-réseau de chaleur à la ferme. L'agriculteur investit dans le réseau de chaleur et dans une chaudière supérieure à ses propres besoins, puis fournit une chaleur renouvelable à ses voisins.

Là encore une solution en bi-énergie peut être envisagée avec une énergie d'appoint (fioul domestique, gaz, etc.) pour les jours les plus froids de l'année et/ou en secours.

Les installations de chauffage de quartier existantes au Danemark permettent le raccordement de quelques maisons jusqu'à 70-80 foyers, la grande majorité exploitées par des agriculteurs qui disposent de quantités considérables de paille offrant un coût énergétique compétitif à leurs voisins.

Les retours d'expériences sont généralement très positives, car l'agriculteur tire également un revenu sur la vente de chaleur et une meilleure acceptation de ses pratiques et moins de plaintes liées aux nuisances olfactives issues de leurs élevages ou d'élevages voisins.

Les clefs de la réussite d'un réseau de chaleur rural sont :

- Éviter les pertes sur le réseau hydraulique, en densifiant au maximum le nombre de clients raccordés.
- Mettre en avant les économies sur la facture énergétique grâce au remplacement des chaudières fioul.
- Privilégier les établissements publics, tels que les écoles, les piscines, et ceux ayant peu d'intermittence dans leur besoins de chauffage comme les maisons de retraite ou les industriels.
- Garantir un prix de l'énergie stable sur 10 ans au moins.

Chauffage urbain

Les réseaux de chauffage urbain s'alimentant à la paille peuvent constituer une alternative bon marché et écologique aux autres types de chauffage - surtout dans les zones céréalières où il y a un important surplus de paille.

On compte environ 55 unités fonctionnant à la paille, dont la plupart résulte d'une initiative d'agriculteurs. Les puissances installées varient de 500 kW à 12 MW, dont certaines avec des spécificités techniques et d'autres, communes à toutes les chaufferies.

En 2000 on comptait 61 chaufferies paille au Danemark, mais depuis, plusieurs installations ont choisi de procéder à leur remplacement par des chaudières à plaquettes de bois. La raison principale en était une baisse des prix des plaquettes de bois liées à une importation massive depuis les pays baltes.

Ce n'est pas la seule raison, certains fournisseurs de paille ont contractualisés avec les chaufferies des coûts de combustible avec une forte indexation. Aujourd'hui, la paille est principalement négociée sur un marché ouvert par le biais d'appels d'offres, ce qui

l'a rendue plus compétitive et a permis de développer à nouveau les installations de chauffage à la paille.

Pour choisir entre la paille ou la plaquette de bois, le contexte local peut être déterminant. En effet, la transaction de la paille s'effectue plutôt à l'échelle régionale, tandis que le marché du bois énergie peut être envisager sur un approvisionnement régional et international.

Dans les zones d'excédent de paille, le prix du MWh rendu chaufferie pourra être très compétitif et créer de la valeur ajoutée locale et une diversification des activités agricoles. Cependant, comparativement à une chaufferie bois, les investissements d'une part, les coûts d'exploitation et de maintenance d'autre part, sont en revanche plus élevés avec une chaudière paille.



PHOTO Torben Skøtt, BioPress.

Besoin de puissance en MW

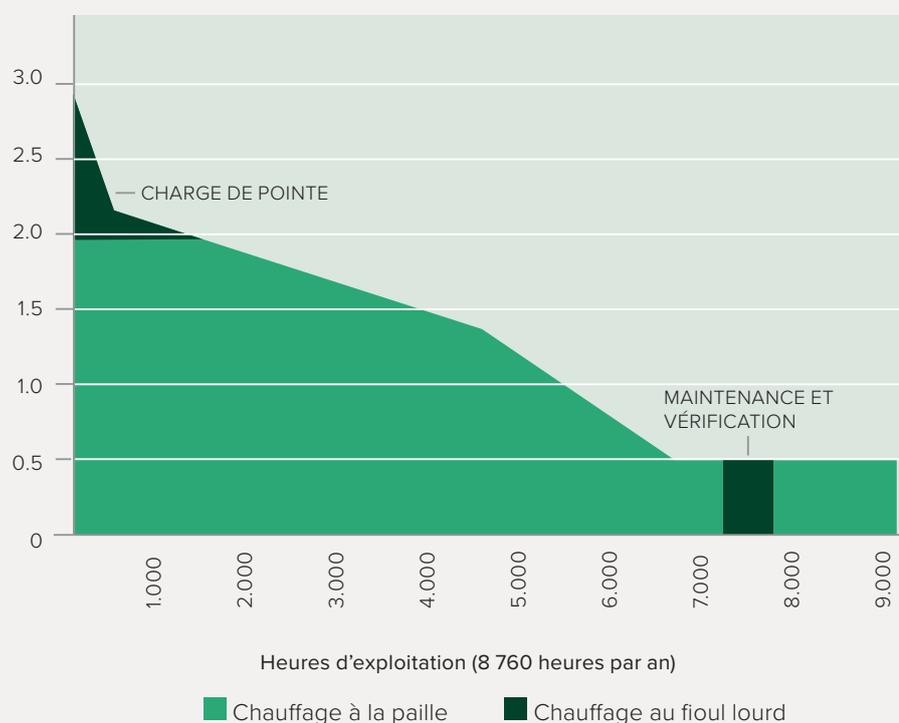


FIGURE 6

La chaudière à paille est ici dimensionnée de manière à pouvoir couvrir environ 70 % de la charge maximale. En cas de charge maximale ou de contrôle d'entretien de la chaudière à paille, les besoins sont couverts par la chaudière au fioul. Le graphique montre la répartition de la paille et du fioul pour une installation de chauffage urbain de 3 MW avec une chaudière à paille de 2 MW. Source: Centre for Biomass Technology.

La chaudière à paille est dimensionnée pour couvrir environ 70 % de la demande maximale.

Comme pour les installations agricoles, les installations de chauffage avec réseau de chaleur fonctionnent souvent en bi-énergie, c'est-à-dire avec une énergie d'appoint (fioul domestique, gaz, etc.) pour les jours les plus froids de l'année et/ou en secours. La puissance d'une chaudière biomasse représente généralement de 40 à 60% de la puissance maximale appelée de façon à couvrir 80 à 90% des besoins annuels. (voir figure 6).

La mise en place d'un ballon tampon sur le réseau hydraulique primaire est fréquente et permet de réduire la fréquence des phases de démarrage et d'arrêt de la chaudière, et ainsi d'augmenter les temps de fonctionnement à pleine charge permettant le meilleur rendement de combustion.

Manutention de la paille à la chaufferie

Aujourd'hui, tous les réseaux de chaleur urbains s'alimentant à la paille utilisent soit de grandes balles carrées classiques ou haute-densité. Ces dernières ont une hauteur inférieure de 30 cm. C'est normalement l'agriculteur ou un entrepreneur agricole qui gère l'approvisionnement en paille de la centrale de chauffage, bien que dans certains cas, la centrale de chauffage gère elle-même le transport et le stockage. Le transport se fait généralement par tracteur, si le fournisseur est situé à proximité (<5-10 km) de la centrale de chauffage, et par camion pour les distances plus longues.

Le déchargement à l'usine se fait généralement à l'aide d'un chargeur télescopique ou d'un chariot élévateur, qui décharge normalement deux balles à la fois. Certains sont équipés pour atteindre les balles les plus éloignées et peuvent décharger l'ensemble des bottes d'un seul côté du camion.

La rémunération de la paille se fait en fonction du poids et de la teneur en humidité. Un bon de livraison peut-être édité suite à un passage au pont bascule à l'arrivée et au départ du camion. Ce système de pesée est plus rapide que lorsque le chariot élévateur monte à chaque déchargement sur une balance. Cependant, un pont bascule est 2 à 3 fois plus cher et se rentabilise sur des consommations annuelles importantes en intégrant les coûts de manutention et de main d'oeuvre.

La mesure d'humidité avant le déchargement, si la teneur en eau est de 18 à 20 %, permet à certaines centrales de négocier le prix, et la plupart rejettent complètement la paille si la teneur en eau est de 25 % ou plus. La paille verte et humide sera également rejetée.

Le stockage de la paille nécessite beaucoup d'espace, et par conséquent, la plupart des usines n'ont de la place que pour une semaine environ de consommation à pleine charge. Il y a généralement quatre balles empilées les unes sur les autres dans des zones marquées, de sorte que la grue peut automatiquement placer les balles sur un tapis roulant d'où les balles sont transportées vers un broyeur ou directement dans la chaudière. Quelques petites usines ne disposent pas de grue, et les balles doivent être placées manuellement sur le couloir de paille.

Conception de la chaufferie

Une chaudière à paille est évidemment conçue pour la paille, mais la majorité des installations pourront également intégrer d'autres types de biomasse, pour autant qu'il s'agisse d'un combustible sec et avec des caractéristiques granulométriques proches de celle de la paille. Plusieurs usines ont fait des expériences positives en complétant avec des cosses de grains, des noyaux de cerises et des déchets de bois secs et propres.

Les chaudières à paille peuvent être de différentes conceptions, mais en général, les installations sont équipées de grilles mobiles permettant de faire progresser la paille dans le foyer jusqu'à la zone d'évacuation des cendres. La combustion est optimisée par un flux d'air dans les fumées.

La majeure partie de l'énergie contenue dans la paille est constituée de gaz volatils, qui sont brûlés à partir d'une température d'environ 800-900 degrés. Plus il y a de gaz imbrûlés à être évacués par la cheminée, plus le rendement sera faible et plus les émissions atmosphériques seront importantes.

Après avoir chauffé la zone réfractaire du foyer, les gaz de combustion sont dispersés et mis au contact des échangeurs de chaleur, généralement composés d'une série de tubes verticaux remplis d'eau. La plupart des installations sont équipées d'un "économiseur", une sorte d'échangeur de chaleur capable d'extraire la dernière calorie présente dans les fumées avant qu'elles ne soient évacuées à travers la cheminée.

Balles entières ou paille broyée ?

La grande majorité des installations de chauffage urbain à paille utilisent de la paille broyée, mais il y en a aussi qui utilisent des "balles de paille tranchées" et quelques installations où les balles sont introduites entièrement dans la chaudière. Ce dernier système a connu son âge d'or jusque dans les années 1980, mais n'est plus pratiqué car il ne respecte pas les normes environnementales actuelles.

Le système à paille tranchée consiste en une boîte d'alimentation, qui fait basculer le ballot de paille verticalement. Lorsqu'un nouveau combustible est nécessaire, un couteau hydraulique coupe une tranche de la botte de paille, qui est ensuite poussée dans la chaudière.

Pour la paille broyée, un broyeur est simplement placé entre le tapis et la chaudière. Les broyeurs peuvent être de différentes conceptions, mais en principe, il s'agit de remettre la paille dans le même état qu'avant son pressage. Comme vu précédemment la mise en botte est nécessaire pour transporter la paille étant donné sa faible masse volumique et son aspect foisonnant lorsqu'elle est en vrac.

Les chaudières à paille déchiquetée ont généralement un rendement élevé et de faibles émissions.

Les chaudières utilisant la paille broyée ont généralement un rendement plus élevé et de faibles émissions qu'en balles entières car il est plus facile de maîtriser la quantité de combustible introduite dans le foyer. Les investissements et les coûts d'exploitation sont un peu plus élevés que pour les chaudières à balles entières, ce qui est normalement compensé par un meilleur rendement. Les usines qui utilisent de la paille broyée doivent toujours être équipées d'un clapet anti-retour entre le système de convoyage et l'introduction dans le foyer afin d'éviter tout retour de flamme vers le stock de paille et de sécuriser l'installation face aux risques d'incendie.

Considérations environnementales

L'impact environnemental des réseaux de chaleur urbains à paille attire l'attention des autorités et de la population locale qui a ont un intérêt considérable à ce que ces installations ne posent pas de problème. Toutes les réseaux de chaleur urbains à paille au Danemark sont équipées d'un système de contrôle et de filtration des gaz imbrûlés. Un filtre à manche ou un filtre électrostatique assure la filtration et la récupération des particules solides contenues dans les fumées.



Les balles de paille sont prises par chariot élévateur équipé d'une fourche, puis placées dans la zone délimitée en jaune, pour faciliter la reprise de la grue vers le stockage.

PHOTO Torben Skøtt, BioPress.



Réserve de paille à l'usine de chauffage du district de Terndrup. La grue est contrôlée automatiquement et coulisse vers le foyer. La réserve peut contenir l'équivalent d'une semaine d'exploitation pendant l'hiver. **PHOTO** Torben Skøtt, BioPress.

Une mauvaise combustion peut dégager du monoxyde de carbone (CO), des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui sont cancérigènes, des odeurs. La teneur en monoxyde de carbone est relativement simple à détecter et les autorités publiques ont des seuils de détection relativement bas.

Les oxydes d'azote (NOx) présents dans la fumée peuvent se déplacer sur de longues distances et se transformer, par exemple, en acide nitrique, ce qui peut entraîner des dommages aux forêts, aux lacs et aux bâtiments. En outre, les

composés azotés de l'air peuvent entraîner une surfertilisation des espaces naturels sensibles, telles que les landes et les bruyères. Les oxydes d'azote peuvent également réduire la fonction pulmonaire des personnes souffrant d'asthme et de bronchite, mais ici c'est surtout le NO2 et non pas tant le NO qui pose problème. La réduction non catalytique sélective (SNCR) consiste à injecter de l'ammoniac ou de l'urée dans la chambre de combustion et nécessite un volume de foyer suffisant pour disperser et évaporer l'additif. Cette technologie n'est donc pas utilisée pour les chaudières de petites puissances.

Pour l'élimination du HCl et du SO2, des systèmes de sorption à sec peuvent être utilisés, mais comme pour les NOx, les technologies employées sont très coûteuses et les réseaux de chaleur hésitent parfois à les utiliser. Néanmoins l'Etat a mis en place une taxe sur le soufre à l'État pour inciter à rester en dessous des valeurs maximales autorisées.

Plusieurs usines ont mené des expériences d'installation de technologies de condensation des gaz de combustion afin d'obtenir une meilleure efficacité, mais dans la plupart des cas elles ont été abandonnées après quelques années de fonctionnement. À Høng, au nord de Slagelse, un tel système a été installé et a permis d'améliorer l'efficacité d'environ 10 % tout en supprimant la teneur en soufre. Si cette mesure s'avère efficace, elle pourrait devenir la norme dans les anciennes comme dans les nouvelles installations, surtout s'il est possible d'exonérer les installations de la taxe sur le soufre sans avoir à installer des équipements de mesure coûteux et complexes.



Convoyeur de balles de paille pour un chargement automatique. **PHOTO** Cormall A/S.

A photograph of a modern industrial building with a tall, grey chimney. The building has a facade of light-colored panels and large windows. In the foreground, several stalks of wheat are visible, suggesting the use of agricultural waste in the production process. The sky is clear and blue.

Le Danemark est le leader mondial de la production combinée de chaleur et d'électricité à partir de paille.

La paille pour les unités de cogénération

Les centrales de cogénération, produisant chaleur et électricité, à base de paille sont une spécialité danoise. Depuis les années 1980, des fonds de recherche considérables ont été consacrés au développement de technologies permettant d'utiliser la paille dans les centrales au charbon et de créer des centrales de cogénération à base de paille ou d'autres types de biomasse.

Une centrale électrique se compose schématiquement d'une chaudière, d'un circuit de vapeur, d'une turbine et d'un générateur électrique. Dans la chaudière, le combustible est transformé en chaleur, et l'énergie qui en résulte est transférée à un circuit de vapeur, puis à la turbine, qui est reliée à un générateur électrique. Lorsque la vapeur a passé la turbine, elle est condensée en eau au moyen d'eau de refroidissement provenant de la mer, puis retourne à la chaudière.

Dans une centrale électrique traditionnelle, seuls 40 à 45 % du combustible sont transformés en électricité. Le reste de l'énergie disparaît par la cheminée et avec l'eau de refroidissement dans la mer. Une centrale de cogénération produit de l'électricité de la même manière qu'une centrale électrique classique, mais au lieu de refroidir la vapeur de la turbine avec de l'eau de mer, on utilise l'eau de retour d'un réseau de chauffage urbain et on la réchauffe ainsi. En produisant à la fois de l'électricité et de la chaleur, 85 à 90 % du combustible peut être exploité à des fins énergétiques, et comme aucune eau de mer n'est nécessaire, les centrales peuvent être placées dans n'importe quelle ville ayant des besoins de chaleur suffisamment élevés.

Au Danemark, la production combinée d'électricité et de chaleur est hautement prioritaire. Auparavant, il était normal d'avoir de très grandes centrales placées à proximité des grandes villes comme Copenhague, Aarhus et Odense. Cependant, en 1986, le Parlement a conclu un accord politique sur l'énergie, qui prévoyait la construction de nouvelles centrales de cogénération décentralisées pour la biomasse, les déchets municipaux et le gaz naturel. Cela a conduit à la construction de la première centrale de cogénération à la paille du monde à Haslev en 1989.

Depuis lors, dix autres centrales à paille ont été construites. À Aarhus, une nouvelle centrale à paille a été construite à Lisbjerg en 2017, ce qui a aidé la municipalité à éliminer complètement le charbon.

La centrale de 110 MW est conçue pour 100 % de paille, mais peut fonctionner à 50 % à la plaquette de bois.

En 1993, le Parlement a adopté le plan d'action sur la biomasse, qui exigeait que les centrales électriques utilisent 1,4 million de tonnes de biomasse par an, dont au moins 1 million de tonnes de paille. Les expériences d'autres pays étaient très limitées à cette époque et ne concernaient que l'utilisation du bois comme combustible. Fondamentalement, la paille pour la production d'énergie était un concept inconnu dans le secteur du chauffage, et il était nécessaire de lancer un programme de développement et de démonstration ambitieux. Ce programme a permis de résoudre de nombreux problèmes de mise en route, qui ont affecté les premières installations jusque dans les années 1990, et aujourd'hui, le Danemark est l'un des principaux pays en matière d'utilisation efficace de la paille pour la production d'électricité.

Les efforts de recherche et de développement dans les centrales de cogénération pour la paille ont été particulièrement axés sur les systèmes de foyers gradins, les foyers cycloniques, les systèmes à lit fluidisé circulant et la combustion mixte paille /charbon.

Manipulation de la paille en unité de cogénération

Les besoins de ces unités thermiques et électriques combinées sont beaucoup plus importantes que les réseaux de chaleur urbains. A Funen, par exemple, ce sont 150 à 170 000 tonnes de paille qui sont consommées par an, soit plus de 300 000 grandes balles carrées.

La plupart des usines sont équipées de grues automatiques qui peuvent soulever douze balles à la fois. De cette façon, il suffit de deux manipulations pour vider un camion et une remorque. Étant donné que la grue enregistre à la fois le poids et la teneur en eau, le débit de chantier est très élevé.

Turbine à vapeur alimentée par une chaudière à gradin permettant la production d'électricité

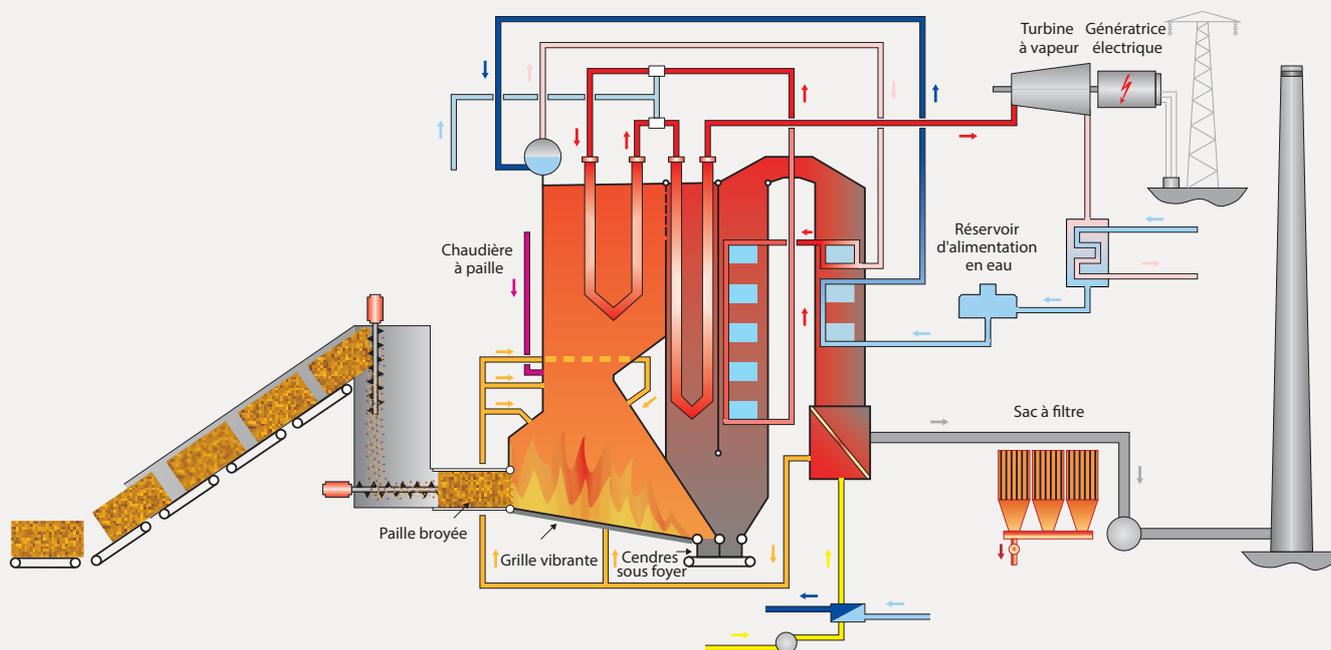


FIGURE 7
Schéma d'une turbine à vapeur alimentée par une chaudière à gradin permettant la production d'électricité à Funen, DK.

Après que la grue ait déchargé les balles sur un tapis roulant le broyeur affine le produit pour faciliter la reprise de la vis. Le nombre de tapis roulants varie d'une unité à l'autre, mais la plupart disposent de quatre tapis en parallèle afin de permettre une alimentation continue.

Foyer à gradin

La technologie gradin est la plus répandue pour l'utilisation de la paille dans les centrales électriques et thermiques danoises (voir figure 7). Dans la plupart des cas, il s'agit d'une grille inclinée, refroidie à l'eau, qui vibre à intervalles réguliers, déplaçant lentement la paille vers la vis d'évacuation des cendres sous foyer. Une plus petite proportion des cendres - les cendres volantes - est acheminée à travers la chaudière puis collectée dans un système de filtration, avant que la fumée ne monte à travers la cheminée.

Dans la majorité des installations à gradin, les balles de paille sont broyées puis acheminées par vis sans fin jusqu'au foyer.

Dans certaines installations plus anciennes les balles sont introduites directement dans la chaudière et se consomment par la base, au-dessus de la grille, et se consomment verticalement.

Foyer cyclonique

Les centrales électriques alimentées au charbon peuvent être adaptées pour fonctionner avec des granulés de paille. Cela né-

cessite de repenser le stockage et le broyeur doit être capable de broyer des granulés de paille au lieu du charbon, mais en principe, l'injection du combustible dans la chaudière se fait de la même manière. La combustion de la paille peut entraîner les mêmes problèmes d'obstruction et de corrosion des tuyaux du surchauffeur de la chaudière, de sorte qu'il peut être nécessaire d'abaisser la température de la vapeur d'eau afin de prolonger la durée de vie de la chaudière.

Lit fluidisé circulant

Dans une chaudière dite à lit fluidisé circulant il est possible de brûler de la paille avec du charbon, mais pas 100% avec de la paille. Dans ces installations la combustion se fait dans un lit de sable, ce qui permet une température de combustion plus basse que sur grilles mobiles. La formation de NOx est ainsi réduite, et il est possible d'éliminer le soufre des gaz de combustion en ajoutant de la chaux dans la chaudière.

Ces chaudières acceptent une large gamme de combustible, mais comme tout autre système ne permettent pas d'éviter la déformation des cendres de certaines biomasses, dont la paille fait partie. Lorsque la température d'écoulement est atteinte, la cendre devenue visqueuse se colle au sable et n'est plus en suspension. Dans ces systèmes, la paille représente 20 à 50 % maximum de l'approvisionnement total.

Les cendres de charbon ont une incidence favorable sur les éléments corrosifs de la paille.

De même que pour les systèmes à gradins, il a été observé une usure prématurée du revêtement et une corrosion importante des matériaux avec les systèmes à lits fluidisés circulants engendrant des coûts de maintenance élevés.

La méthode de combustion en lit fluidisé qui consiste à utiliser du charbon et de la paille ensemble et donne un produit résiduel qui ne peut être réutilisé, et c'est la principale raison pour laquelle cette technologie n'est utilisée que dans une seule usine au Danemark.

Co-Combustion

Dans les systèmes de cocombustion, la paille est brûlée simultanément avec le poussière de charbon. Il n'est pas nécessaire de construire une nouvelle chaudière et une nouvelle turbine, et les investissements sont donc très limités par rapport à une chaudière à gradin. De même, les centrales électriques au charbon sont déjà équipées de systèmes efficaces de traitement des fumées.

La cocombustion a été développée au début des années 1990 et a fait l'objet d'une première démonstration sur un site pilote à Studstrup, à proximité d'Aarhus. Il y a été prouvé que la cocombustion donne une combustion très efficace, et que la teneur en carbone fixe dans les cendres est généralement plus faible qu'avec la combustion du charbon seul. Dans les premières années, il était problématique d'éliminer les cendres volantes, mais ce problème est résolu. Les cendres peuvent être utilisées dans la production de ciment et de béton. Cependant, la paille est limitée à 20 % du volume brûlé, ce qui correspond à environ 13 % de l'énergie brûlée.

Lors du développement de la technologie de la cocombustion, une grande attention a été portée au risque de corrosion accrue dans la chaudière, comme c'était le cas dans les installations à grille. Cependant, il s'avère que les cendres de charbon ont une influence très favorable sur les éléments corrosifs de la paille. Tant que la proportion de paille n'est pas trop élevée, il n'y a pas de revêtement de chlore dans la chaudière et le risque de corrosion est donc limité.

La centrale électrique de Studstrup près d'Aarhus au Danemark. Système de co-combustion charbon/paille convertie en 2016 au granulé de bois, puis en 2019 granulé de bois/paille.

PHOTO Torben Skøtt, BioPress.



La combinaison du charbon avec la paille a également un effet bénéfique lors de la réduction non catalytique sélective (SNCR) qui consiste à injecter de l'ammoniac ou de l'urée dans la chambre de combustion d'une chaudière à un endroit où les gaz de combustion se situent entre 900 et 1100 °C pour réagir avec les oxydes d'azote (NOX) formés lors du processus de combustion. Le produit résultant de la réaction chimique redox est l'azote moléculaire (N₂), le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau (H₂O). Dans les chaudières à gradin, la formation de potassium peut endommager la technologie SNCR. En cas de co-combustion, la présence de charbon permet d'adsorber le potassium, réduisant ainsi la nocivité des fumées.

En 2016, la municipalité d'Aarhus a décidé d'éliminer complètement le charbon et l'usine a été modernisée pour brûler des granulés de bois. Depuis 2019, les tests effectués par l'exploitant de l'usine ont montré qu'il est possible de d'incorporer aux granulés de bois 8 à 10% de paille.

Challenges

L'un des plus grands défis concernant les centrales de cogénération à paille a été la conception de ce qu'on appelle les surchauffeurs dans la chaudière. Afin d'assurer un rendement électrique élevé, la vapeur doit avoir une température et une pression suffisamment élevées, mais le point de déformation des cendres de la paille est bas, autour de 800-900°C, il y a un risque de corrosion important au niveau de ces tuyaux.

Dans les premières installations, il était souvent nécessaire d'arrêter régulièrement la chaudière pour nettoyer les tuyaux, mais dans les installations plus récentes, un espacement suffisant permet une tolérance vis-à-vis de l'accumulation de mâchefers. Combiné au nettoyage automatique des suies, cela a permis d'améliorer le temps de fonctionnement des centrales électriques à paille.

Ainsi il existe des limites quant à la température à atteindre pour assurer une durée de vie raisonnable aux centrales. Dans les premières centrales, la température de la vapeur était d'environ 450 degrés Celsius, mais aujourd'hui elle a atteint 540 degrés Celsius. Cela a entraîné une augmentation notable du rendement, bien qu'il ne soit pas du même niveau que celui des centrales au charbon les plus récentes, qui fonctionnent à des températures de vapeur de 580-600 degrés Celsius.

De nombreuses recherches ont été effectuées au sujet de l'altération des parois et la corrosion lors de la cuisson de la paille. Cela concerne notamment la quantité de chlorure de potassium, qui se vaporise de la paille pendant la combustion et se dépose sur les tuyaux du surchauffeur. Les mécanismes de corrosion ont aussi été soigneusement étudiés. Les tuyaux contiennent du fer, du chrome et du nickel et il est devenu évident qu'à des températures élevées, les chlorures éliminent sélectivement le chrome de l'acier, affaiblissant ainsi la résistance mécanique des parois. Une teneur en chrome de 12 à 18% s'est avérée offrir la meilleure protection des tuyaux. Enfin, on a tenté d'ajouter différents additifs à la combustion afin de réduire la corrosion.

Cette technologie a bien fonctionné lors du chauffage au bois, mais dans le cas du chauffage à la paille, la quantité de cendres générée est si importante que la consommation d'additifs est trop élevée pour être rentable.

Récemment, l'usine de Studstrup a été reconstruite pour fonctionner avec des granulés de bois et de la paille.

Autres utilisation de la paille

La combustion de la paille - à petite, moyenne ou grande échelle - reste de loin l'utilisation la plus répandue de la paille à des fins énergétiques au Danemark.

Plusieurs autres applications et méthodes de valorisation ont été développées et testées, telles que la gazéification et la production de bioéthanol. Des usines pilotes fonctionnent depuis longtemps, et des technologies pilotes ont été exportées dans d'autres pays, sans réel déploiement commerciale à ce jour.

Gazéification

La gazéification en lit fluidisé circulant (CFB), la biomasse est convertie en gaz pour alimenter une centrale de cogénération électrique. De cette façon, les cendres peuvent être maintenues hors de la chambre de combustion, ce qui permet d'utiliser une large gamme de biocombustibles solides différents, sans accumulation et risque corrosif pour la chaudière. Le système peut être utilisé par exemple pour la cocombustion de paille et de déchets dans des chaudières à charbon existantes, car les différents types de cendres sont séparés et peuvent être réutilisés séparément.

Cette technologie exige généralement des températures de 850-900 degrés qui correspondent aux températures de déformation des cendres. Egalement il est fréquent de retrouver des particules dans les gaz qui nécessitent une épuration. Par conséquent, au Danemark, la société Danish Fluid Bed Technology a développé une technologie appelée Low Temperature Circulating Fluid Bed (LT-CFB). Ici, la biomasse est convertie en gaz à une température juste inférieure au point de fusion des cendres.

A l'instar d'un gazeur CFB traditionnel, ici aussi la biomasse est conduite dans un réacteur, où elle est rapidement chauffée au moyen de particules de sable et les cendres sont mises en suspension dans le système (voir figure 8). Néanmoins dans la technologie LT-CFB, le foyer est plus petit et adapté à une pyrolyse rapide à une température plus basse que pour une gazéification classique.

En l'absence d'oxygène et à 650°C, la biomasse ne s'enflamme pas, et produit 80% de gaz de pyrolyse et 20% de résidu solide. Une partie des particules solides proviennent d'un premier filtre cyclone qui sont récupérées dans un second réacteur chauffé à 730°C. Les gaz sont filtrés par un second cyclone où les résidus carbonés (mélange de cendres et de biochar) sont récupérés comme amendement.

Comment le gazeur LT-CFB transforme la paille en gaz

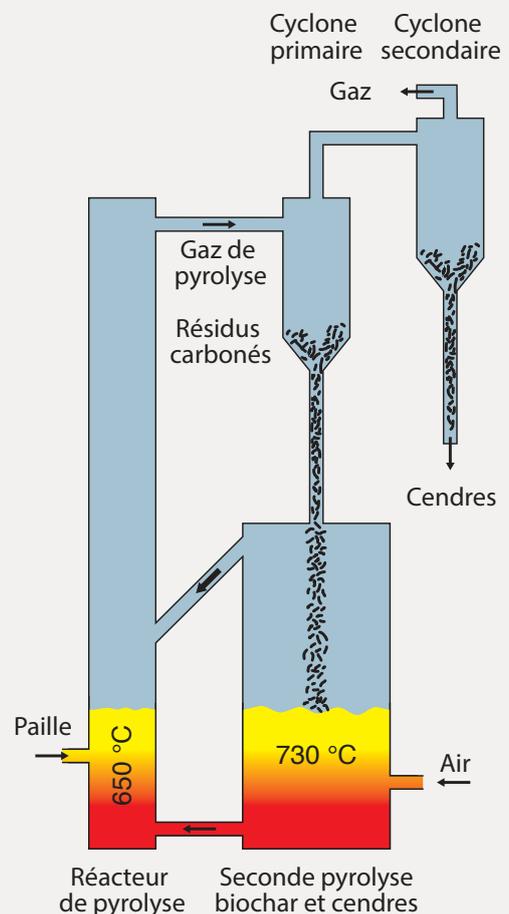


FIGURE 8

Fonctionnement du gazeur LT-CFB conçu pour produire 80% de gaz de pyrolyse et 20% de biochar tout en limitant la formation de mâchefer en évitant de dépasser les températures de fusion de la paille. Ainsi, les cendres, y compris les sels alcalins et le phosphore, peuvent être séparées, ce qui permet d'obtenir un gaz qui ne provoque ni dépôt ni corrosion.



La gazéification de la paille est loin d'être une pratique courante, mais certaines entreprises proposent cette technologie et tentent de la commercialiser.

Le concept a été testé pour la première fois dans prototype de petite puissance à l'Université technique du Danemark en 2000 et trois ans plus tard, une installation pilote de 500 kW a permis de gazéifier jusqu'à quatre tonnes de combustible par jour. En 2011, Dong Energy (aujourd'hui appelé Ørsted) a lancé une unité de démonstration de 6 MW à Kalundborg sous le nom de Pyroneer, où le gaz était utilisé dans une centrale électrique voisine. Cependant, en 2014, la centrale a été fermée, car il n'y avait pas de marché pour cette technologie, ni au niveau national, ni international.



L'usine de bioéthanol de deuxième génération de Versalis, d'une valeur de 165 millions d'euros, est située à Crescentino, dans la province de Vercelli, en Italie.

PHOTO Food & Bio Cluster Danemark.



L'usine de gazéification Pyroneer à Kalundborg.

PHOTO Torben Skøtt, BioPress.

De la paille au bioéthanol

La production de bioéthanol à base de céréales, de maïs ou de canne à sucre est une technologie bien connue. Un certain nombre d'usines de bioéthanol de première génération ont été créées dans des pays comme les États-Unis et le Brésil, où elles fournissent de grandes quantités de bioéthanol comme substitut de l'essence.

Cependant, l'utilisation de produits agricoles normalement destinés à l'alimentation humaine et animale est difficilement acceptée pour la production de bioéthanol pour deux raisons : une augmentation drastique des prix des denrées alimentaires pouvant aggraver les problèmes de faim dans les pays en développement, une mise en culture massive des forêts entraînant une déforestation et annulerait les avantages escomptés sur le changement climatique. Les recherches se sont alors orientées vers les technologies dites de 2ème génération, où la production de bioéthanol est basée sur des produits résiduels non alimentaires. Au Danemark, deux concepts ont été développés et testés à l'échelle pilote à partir de 2006 et 2009, respectivement, mais tous deux ont finalement été arrêtés pour une durée indéterminée.

Le concept du bioéthanol Inbicon

En novembre 2009, la filiale de DONG Energy, INBICON, a créé une usine près de Kalundborg, avec la capacité de convertir 30 000 tonnes de paille par an en bioéthanol, fourrage et granulés de combustible. C'était à l'époque l'une des plus grandes usines au monde pour la production de biocarburants de deuxième génération.

L'un des principaux défis consistait à mettre au point une technologie permettant d'introduire la paille dans un réacteur qui fonctionne à une pression de 15 bars et à une température d'environ 185 °C, tout en permettant le développement des micro organismes. Dans le réacteur, la paille est prétraitée, puis décomposée en sucre à l'aide d'enzymes. La suite du processus se déroule comme dans une unité de première génération: les sucres (glucides, principalement le glucose) sont transformés en alcool (éthanol) en milieu anaérobie à l'aide de levures et de la réaction de fermentation alcoolique.

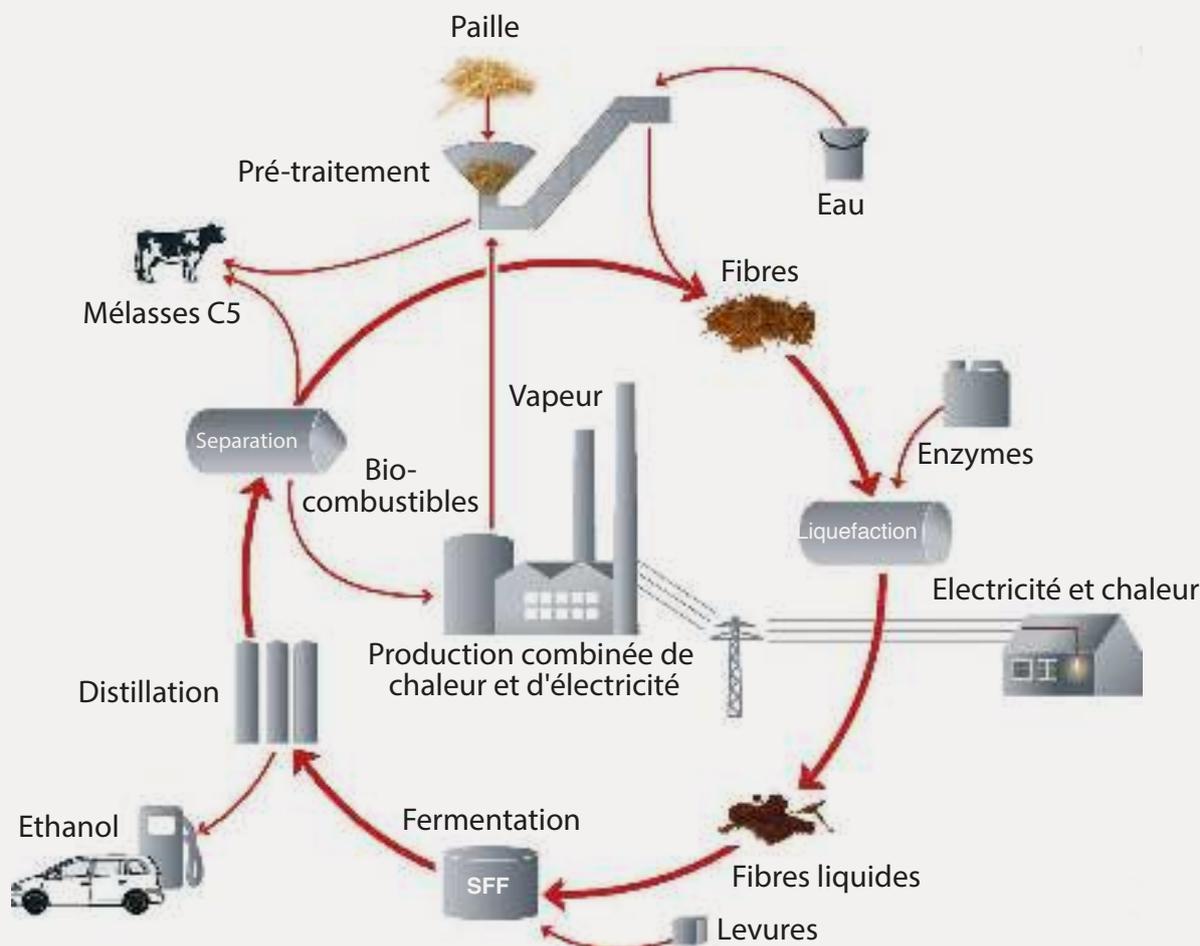


FIGURE 9

Diagramme schématisique de l'usine d'Inbicon pour la production de bioéthanol à partir de paille, construite en parallèle d'une centrale de cogénération qui consomme le bioéthanol et dont l'excédent de chaleur peut être utilisé pour la production d'éthanol.

En 2013, une usine de production à grande échelle basée sur cette technologie a été créée près de Crescentino dans la région du Piémont en Italie par le consortium Beta Renewables 2G. La capacité de production de l'usine était de 40.000 tonnes de bioéthanol par an. Toutefois, l'usine a été fermée à la fin de 2017. Entre autre, les difficultés à maintenir une qualité de paille suffisamment homogène ont été citées comme l'un des défis à relever. En 2018, Versalis S.p.A. (une filiale de son compatriote Eni S.p.A., major du pétrole, du gaz et de l'énergie) l'a rachetée après la faillite du propriétaire initial, et ils ont investi 15 millions d'euros supplémentaires dans l'amélioration de l'usine et prévoient de relancer la production de bioéthanol en 2020.

L'usine INBICON de Kalundborg a été fermée en 2014. Au printemps 2020, l'usine a été vendue à la société RE Energy, qui prévoit d'y produire à nouveau du bioéthanol, mais cette fois-ci, pas à partir de paille.

Le concept du bioéthanol BioGasol

La société de développement danoise BioGasol a mis au point un autre concept de production de bioéthanol, dont les sous-produits - outre le combustible solide - comprennent également des combustibles gazeux sous forme de méthane et d'hydrogène. Le principe de ce procédé est illustré dans la figure 10.

La première étape est un prétraitement thermique par une cuisson sous pression de la paille dans une dissolution acide ou basique douce avec apport d'oxygène, après quoi la biomasse est décomposée au moyen d'enzymes. La fermentation qui suit se fait en deux étapes, la première transformant la cellulose à 70°C et la seconde transformant l'hémicellulose en bioéthanol dans un digesteur à 55°C produisant du méthane et de l'hydrogène.

Schéma de la production de bioéthanol de BioGasol qui a développé

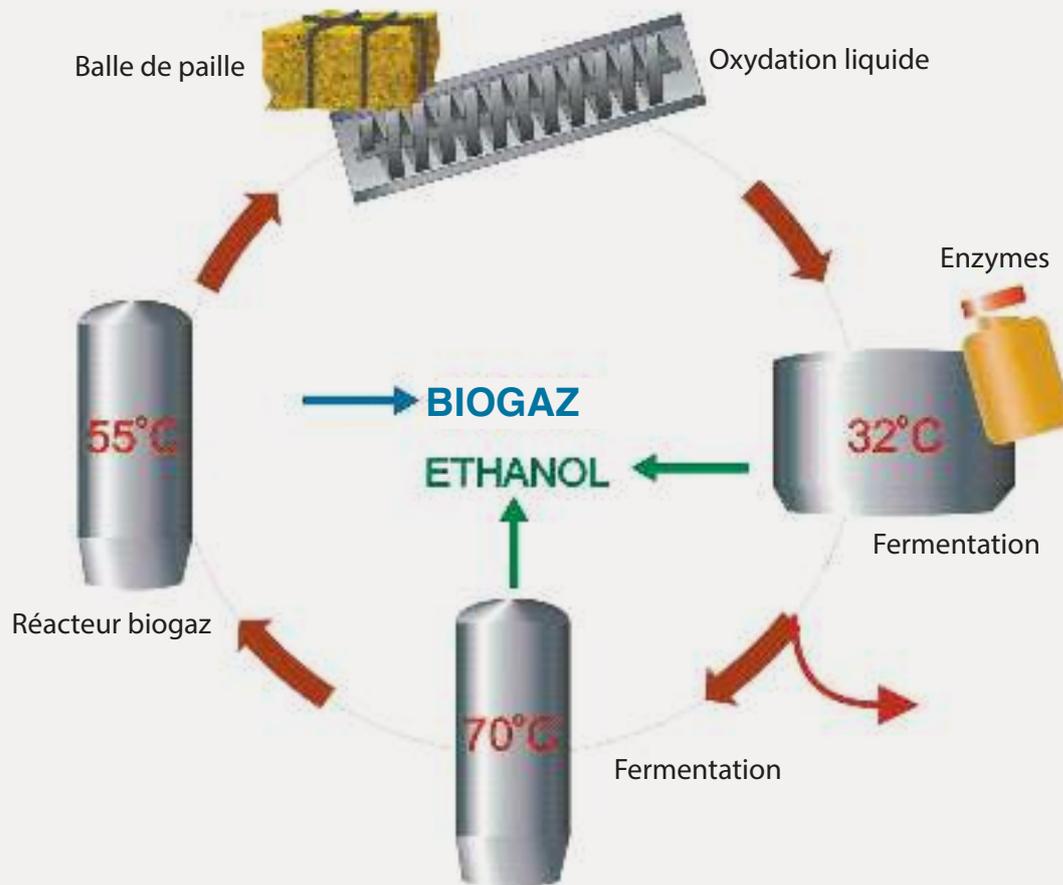


FIGURE 10

Schéma de la production d'éthanol du BioGasol qui a développé des populations de micro-organismes thermophiles (55°C) génétiquement modifiées, capable de convertir les sucres C5 en éthanol, ce qui augmente le rendement de production d'éthanol à partir de la paille de 30 à 40 %.

En septembre 2006, une usine pilote appelée Maxi-fuel a ouvert ses portes à l'Université technique du Danemark. Il était prévu d'établir une usine pilote plus grande sur l'île danoise de Bornholm, mais ce plan n'a pas été réalisé.

En conclusion, la production de bioéthanol de 2ème génération à partir de paille ne s'est pas encore avérée être un succès commercial au Danemark, même si la technologie semble bien documentée. Ailleurs en Europe, des développements sont en cours ; Clariant construit la première usine phare de sa technologie Sunliquid® en Roumanie (mise en service prévue en 2020).

La paille dans les unités de méthanisation

Aujourd'hui le Danemark mobilise beaucoup de moyens pour produire du biogaz par digestion anaérobie dans les unités de méthanisation agricoles. Plus précisément des travaux sont menés pour

tenter d'introduire davantage de paille et ainsi tenter de trouver des débouchés à cet excédent annuel substantiel.

Le principal substrat des usines de biogaz danoises est le fumier qui a la particularité d'être riche en micro-organismes mais qui a un faible potentiel méthanogène. Depuis la fin des années 1980, les déchets organiques des industries agricoles et agro-alimentaires sont mobilisés pour augmenter la production de gaz et assurer la viabilité des unités de méthanisation. Cependant, l'augmentation du parc d'unités de biogaz agricole de co-digestion (en nombre et en taille) a incité à trouver d'autres substrats tels que les cultures énergétiques et les résidus de culture tels que la paille. Celle-ci peut contribuer à augmenter la teneur moyenne en matière sèche dans le digesteur et ainsi de valoriser des substrats liquides. Le rendement énergétique de la paille lorsqu'elle est valorisée en méthanisation n'est cependant que d'environ 60 % de ce qui peut être obtenu par combustion.



La méthanisation a l'avantage de produire à la fois une énergie renouvelable (le biogaz) qui peut être valorisé dans une unité de cogénération (chaleur et électricité) ou bien être épuré en biométhane (injectable dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme carburant) et de produire un digestat pouvant être valorisé en amendement sur les terres agricoles.

Sans broyage préalable de la paille avant son incorporation, le temps de séjour dans le digesteur est doublé. Alors qu'en Allemagne, la tendance a été de construire des installations avec un temps de séjour plus long (post-digesteur), au Danemark, l'accent a été mis principalement sur le prétraitement mécanique de la paille pour augmenter la digestibilité.

Pré-traitement mécanique

De nombreuses technologies ont été développées pour déstructurer la paille, afin que les bactéries puissent accéder plus facilement aux sucres. Dans un rapport préparé pour le "groupe de travail sur le biogaz" de l'Agence danoise de l'énergie, il est mentionné que le rendement en méthane de la paille peut être augmenté de 10 à 20 % grâce à des technologies de prétraitement telles que le broyeur à marteaux, le pressage en briquettes, l'extrudeuse et le X-chopper®.

Litière animale, compostage et ensilage

L'utilisation de litière paillée provenant des productions animales semble être un moyen plus facile que d'utiliser la paille brute dans les unités de biogaz ; le fumier est un mélange de paille et d'effluents qui ont déjà en partie dégradé et déstructuré la paille.

Dans le rapport susmentionné, le compostage de la paille a également un effet positif sur le rendement en méthane. En outre, les résultats indiquent que la paille de mauvaise qualité, c'est-à-dire trop humide pour être brûlée ou utilisée pour l'alimentation, peut être utilisée avec de bons résultats en co-digestion avec d'autres substrats liquides.

Enfin, il a été démontré que l'ensilage de la paille ou le co-ensilage avec d'autres matières végétales, par exemple de l'herbe ou des fanes de betteraves, augmente également la digestibilité de la paille.

Autres méthodes de prétraitement

L'une des technologies les plus connues pour "déstructurer" la paille est la cuisson sous pression, qui est également utilisée pour la production de bioéthanol de deuxième génération. Cependant, cette

méthode est assez gourmande en énergie - et donc coûteuse - et n'est pas considérée comme réalisable en tant que prétraitement de la paille pour la production de biogaz. Il en va de même pour le traitement enzymatique.

Fioul lourd issu de la paille

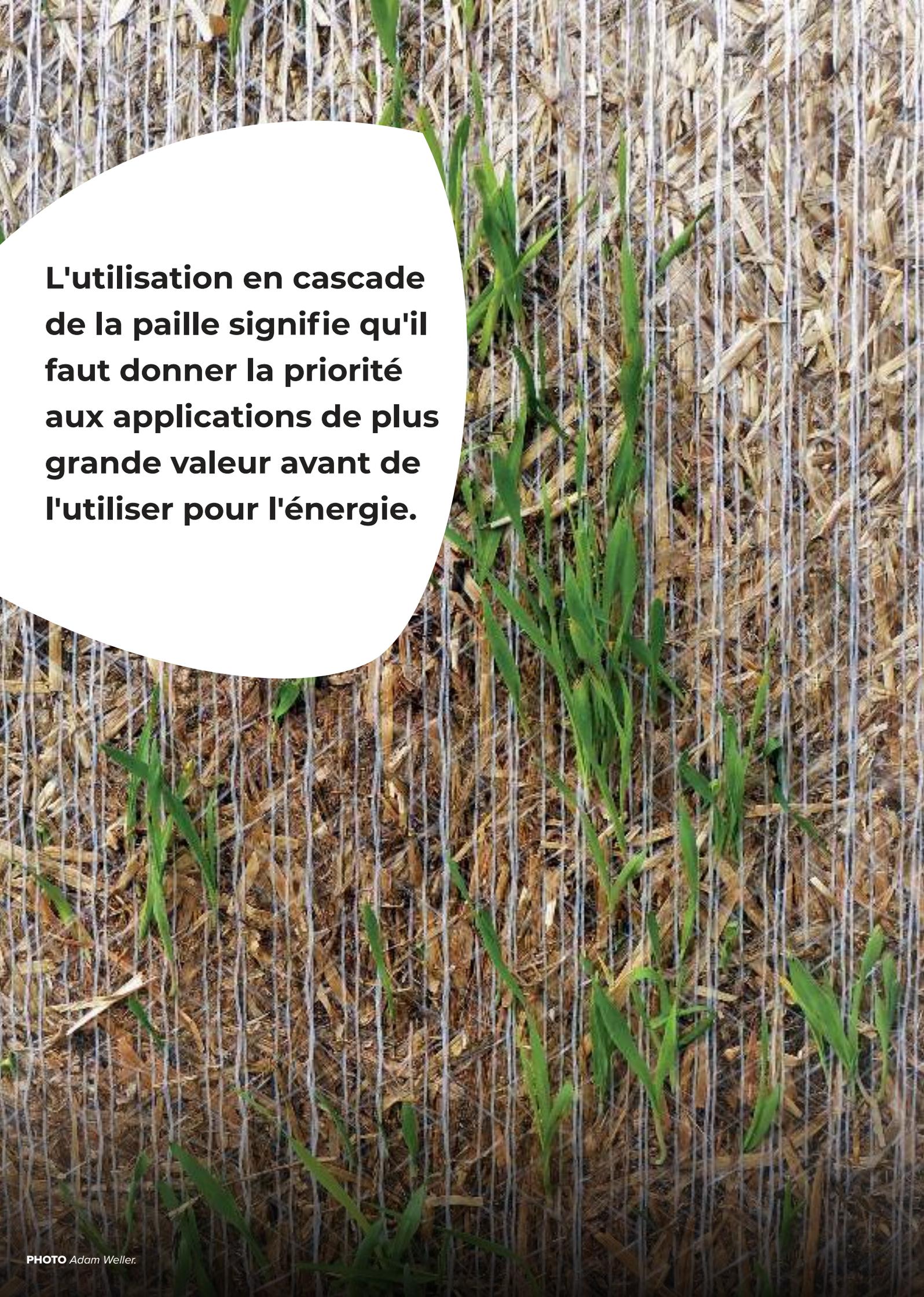
Une autre façon de tenter d'utiliser la paille à des fins énergétiques est la liquéfaction hydrothermale – qui s'apparente à la cuisson sous pression. Cette technologie est utilisée et développée par quelques universités et entreprises privées pour créer un produit pétrolier à base de biomasse.

Une entreprise dérivée de l'Université technique du Danemark (DTU), Kvasir Technologies, possède une technologie de liquéfaction brevetée pour convertir la paille (et d'autres biomasses cellululosiques) en carburant. Des études pilotes sont en cours et l'objectif de l'entreprise est de commencer la construction d'une usine commerciale en 2023. Un tel type d'énergie serait tout à fait approprié pour remplacer le carburant utilisé en transport maritime, encore aujourd'hui largement dépendant des combustibles fossiles. Reste à le rendre économiquement compétitif sur le marché. Une autre entreprise dérivée du DTU, MASH Energy, tente de produire par pyrolyse des produits pétroliers à partir de résidus agricoles.

Matériaux de construction à partir de paille

Comme décrit dans les chapitres précédents, l'utilisation de la paille pour la production d'énergie s'est avérée être une solution viable à de nombreux niveaux, et des progrès sont encore réalisés en matière de développement, d'optimisation et de mise en œuvre. Cependant, face au développement de l'énergie solaire et éolienne, le développement de produits bio-sourcés à base de paille pour l'industrie du bâtiment suscite un intérêt considérable.

L'une des applications consiste simplement à utiliser des bottes de paille comme "briques" pour ériger les murs d'une maison, puis à recouvrir la surface, par exemple avec de l'argile, pour limiter les infiltrations d'humidité. Les maisons en bottes de paille sont bien connues dans de nombreux pays, et de nombreuses entreprises proposent des solutions clés en main pour les habitations standard. Pour des applications plus vastes et plus complexes, un certain nombre d'entreprises dans l'UE et au-delà commercialisent actuellement des panneaux, mais des travaux de recherche et de développement sont en cours sur l'utilisation des fibres de paille pour des matériaux composites plus respectueux de l'environnement.



L'utilisation en cascade de la paille signifie qu'il faut donner la priorité aux applications de plus grande valeur avant de l'utiliser pour l'énergie.



Staramaki est une entreprise coopérative sociale de Kilkis, dans le nord de la Grèce, qui produit des pailles pour la boisson à partir de paille de céréales, en utilisant son propre procédé breveté. Alternative naturelle aux pailles en plastique.

PHOTO Staramaki.

La paille pour une croissance verte dans les années à venir

Plusieurs instituts de recherche et acteurs privés danois ont intensifié la recherche et le développement de technologies pour l'utilisation en cascade de la paille (et d'autres types de biomasse). Cela comprend par exemple le fractionnement (sec ou humide) de la biomasse afin d'extraire d'abord les produits de grande valeur tels que les fibres, les polymères, la cire, etc. D'autres parties peuvent ensuite être utilisées pour les produits alimentaires, et enfin, les résidus et les flux de déchets peuvent être utilisés dans des usines de biogaz ou pour la combustion. Ce type de bioraffinage de la paille est considéré par beaucoup comme le moyen le plus durable d'utiliser cette ressource abondante à long terme. Toutefois, de nombreuses technologies de bioraffinage ne sont pas encore (entièrement) développées et prêtes à être produites à l'échelle commerciale et ne le seront pas avant des années.

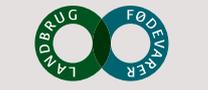
En attendant, il y a beaucoup de paille en excès dans toute l'Europe, et nous avons désespérément besoin de réduire notre consommation de combustibles fossiles pour atténuer les effets néfastes du changement climatique et respecter nos engagements dans le cadre de l'accord de Paris. L'exemple danois montre que la combustion de la paille est aujourd'hui une solution viable pour un chauffage renouvelable local et une production d'électricité neutre en carbone. La technologie est éprouvée et mature et pourra être répliquée dans d'autres pays d'Europe (ou au-delà) ayant une production importante de céréales et la volonté de développer des modes de chauffage plus écologiques et, dans de nombreux cas, moins cher. La paille comme énergie signifie l'indépendance vis-à-vis des combustibles fossiles, et potentiellement des emplois locaux et une croissance verte dans les zones rurales.

Répertoire des entreprises qui proposent un service, une expertise, des solutions techniques de valorisation de la paille

(Liste non exhaustive - pour plus d'information consulter l'[observatoire Agro-Bioheat](#)).

LOGO	DESCRIPTION DES CONTACTS	DESCRIPTION	DOMAINES D'EXPERTISE	FABRICANT/FURNISSEUR D'ÉQUIPEMENT	PRODUCTEUR, OPÉRATEUR ET UTILISATEUR FINAL	AUTRE (CONSEIL, ASSOCIATIONS DE RECHERCHE, ETC.)
	<p>Alcon ALHEAT ApS Ole Rømersvej 15 DK-8670 Låsby</p> <p>www.alcon.nu</p>	<p>Plus de 40 ans d'expérience dans la vente et le service de chaudières à paille intérieures et extérieures de 75 kW à 1 MW dans toute l'Europe.</p>	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE	●		
			PRÉ-TRAITEMENT	●	●	●
			CONVERSION	●	●	●
	<p>Byggeri & Teknik I/S Birk Centerpark 24 DK-7400 Herning</p> <p>www.byggeri-teknik.dk</p>	<p>Conseil agricole en matière d'énergie, d'isolation thermique des bâtiments, de dimensionnement des systèmes de chauffage, etc.</p>	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			●
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION			●
 <p>C.F. Nielsen A/S</p>	<p>C.F. Nielsen A/S Solbjergvej 19 DK-9574 Bælum</p> <p>www.cfnilsen.com</p>	<p>Installations de presse mécanique pour la production de briquettes. Outre le bois, les matières premières sont les résidus agricoles tels que la paille, les balles de riz, le miscanthus, etc. Des lignes de production complètes peuvent être livrées avec des capacités de 200 kg/h et plus.</p>	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT	●		
			CONVERSION			
	<p>CM Biomass Partners A/S Pakhus 48, Klubiensvej 22 DK-2150 Nordhavn</p> <p>www.cmbiomass.com</p>	<p>CM Biomass Partners A/S transporte et fournit une large gamme de biomasses avec tous types de producteurs, des coopératives aux petits producteurs locaux mettant en œuvre des solutions logistiques : maritimes, fluviales, ferroviaire, par conteneurs, par camions en vrac, ou encore conditionnés en bigbags ou en plus petits formats.</p>	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE		●	●
			PRÉ-TRAITEMENT		●	●
			CONVERSION		●	●
	<p>Cormall A/S Tornholm 3 DK-6400 Sønderborg</p> <p>www.cormall.dk</p>	<p>Cormall est une société danoise fondée en 1961, qui fabrique des mélangeuses et dessileuses pour l'affouragement des vaches laitières, les broyeurs de paille.</p>	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT	●	●	●
			CONVERSION			
	<p>Danish Energy Consulting Garmestervej 18 B DK-8600 Silkeborg</p> <p>www.danishenergyconsulting.com</p>	<p>Outre les conseils ciblés sur l'optimisation énergétique des chaudières à paille, le choix des solutions techniques et les demandes de subventions éventuelles, le département et le laboratoire de biogaz offrent des conseils sur l'utilisation de la paille dans la production de biogaz et effectuent des analyses biologiques pour stabiliser et optimiser le processus de digestion anaérobie.</p>	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION			●
	<p>Dansk Fjernvarme Merkurvej 7 DK-6000 Kolding</p> <p>www.danskfjernvarme.dk</p>	<p>Association commerciale de garantie des intérêts des réseaux de chauffage urbains danois, soit près de 64 % (soit 1,7 million) des ménages danois. Ceux-ci sont représentés par de petits exploitants de chauffage ou des entreprises nationales.</p>	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			●
			PRÉ-TRAITEMENT			●
			CONVERSION			●

LOGO	DESCRIPTION DES CONTACTS	DESCRIPTION	DOMAINES D'EXPERTISE			
				FABRICANT/FURNISSEUR D'EQUIPEMENT	PRODUCTEUR, OPERATEUR ET UTILISATEUR FINAL	AUTRE (CONSEIL, ASSOCIATIONS DE RECHERCHE, ETC.)
	Danish Straw Producers Axeltorv 3 DK-1609 København V www.danskhalm.dk	Association de fournisseurs privés qui vise à servir les intérêts de ses membres. L'association suit de près le cadre politique et réglementaire pour l'utilisation de la paille, suit le développement de nouvelles technologies pour l'utilisation de la paille pour, par exemple, des matériaux, des produits chimiques et d'autres utilisations dans le domaine de la bioéconomie circulaire.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION			
	DSE Test Solutions A/S Sverigesvej 19 DK-8700 Horsens www.dse.dk	Développe et produit des humidimètres à micro-ondes qui mesurent les valeurs d'humidité réelles et moyennes de la biomasse en balles de tous types, y compris la paille.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	  		
	Farmer Tronic Industries A/S Nyskovvej 13 DK-6580 Vamdrup www.farmertronic.com	Développe et fabrique des humidimètres / capteurs de température / balances et applications pour l'agriculture et les unités de cogénération. Le service comprend une procédure d'étalonnage adaptée aux exigences imposées sur la qualité du combustible utilisé dans les unités de cogénération.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION			
	FASTERHOLT Maskinfabrik A/S Ejstrupvej 22 DK-7330 Brande www.fasterholt.dk	Presses à balles rondes et à balles carrées.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION			
	Faust ApS Vester Fjordvej 2 DK-9280 Storvorde www.faust.dk	Faust conçoit et produit des chaudières à paille manuelles et automatiques et des chaudières à plaquette de bois de 140 kW à 2,5 MW.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION			
	Justsen Energiteknik A/S Grimhøjvej 11 DK-8220 Brabrand www.justsen.dk	Fondée en 1959, Justsen Energiteknik A/S est un fabricant de chaudières à biomasse capable de fournir l'ensemble des équipements de la chaufferie, de l'hydraulique et des éléments sous-pression. Les grilles mobiles refroidies à l'eau sont l'élément clé des systèmes de chaudières Justsen.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION			
	KF Halmfyr Hjulmagervej 12-16 DK-9490 Pandrup www.kfhalmfyr.dk	KF Halmfyr produit des chaudières à paille à feu partiel ou continu testées par l'Institut technologique danois. Les chaudières sont adaptées aux besoins de chaque client et sont construites un bâtiment indépendant.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION			

LOGO	DESCRIPTION DES CONTACTS	DESCRIPTION	DOMAINES D'EXPERTISE	FABRICANT/FOURNISSEUR D'ÉQUIPEMENT	PRODUCTEUR, OPÉRATEUR ET UTILISATEUR FINAL	AUTRE (CONSEIL, ASSOCIATIONS DE RECHERCHE, ETC.)
	Kinetic Biofuel Solbjergvej 19 DK-9574 Bælum www.cfnielsen.com	Technologie de prétraitement de la paille de céréales et des fumiers pailleux pour une valorisation optimale en méthanisation.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	● ●		
	Kvasir Technologies Maskinvej 5 DK-2860 Søborg www.kvasirtechnologies.com	Kvasir Technologies dispose d'une technologie exclusive de conversion de la paille (et d'autres biomasses cellulosiques) en carburant utilisable dans le secteur maritime. Des études pilotes sont en cours et l'objectif est de commencer la construction d'une unité commerciale en 2023.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	● ●		●
	Danish Agriculture & Food Council Axeltorv, Axeltorv 3 DK-1609 Copenhagen V www.lf.dk	Organisation professionnelle agricole coopérative en faveur des intérêts économiques des agriculteurs et des industries agro-alimentaire. Par des actions communes elle encourage une utilisation de la biomasse pour le développement des énergies renouvelables et de la bioéconomie circulaire.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION		● ●	● ●
	Lekea – Dan Trim Højvejen 18 DK-8860 Ulstrup www.lekea.dk	Développeur et fabricant de chaudière à combustion manuelle de paille. Chaudières à paille de 48 kw à 130 kw pour le chauffage en agriculture et dans l'industrie.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION		●	●
	Linka Energy A/S Nylandsvej 38, DK-6940 Lem St. www.linka.dk	Développement, production, installation et service d'usines de biomasse entièrement automatisées pour la production de chaleur ou de vapeur, de 100 à 15 000 kW. Les systèmes de combustion de paille sont adaptables avec divers systèmes de convoyage du combustible tout en optimisant les rendements.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	● ●		
	MASH Energy ApS Fruebjergvej 3 DK-2100 København Ø www.mash-energy.com	La solution de gazéification modulaire MASH permet une production d'énergie à partir de granulés de paille. En outre, selon les exigences du client, le processus peut être configuré pour produire un rendement accru de biochar pour l'amendement des sols ou de charbon actif pour l'épuration de l'eau et des gaz.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	● ●		●
	ParkLand Maskinfabrik A/S Vejlemosevej 14 DK-4160 Herlufmagle www.parkland.dk	Producteur de remorques attelables sur des presses de grande capacité permettant une collecte rapide et efficace des balles au champ. Les remorques peuvent également être équipées de systèmes de pesée.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	● ●		●

LOGO	DESCRIPTION DES CONTACTS	DESCRIPTION	AREAS OF EXPERTISE W			
			FABRICANT/FURNISSEUR D'EQUIPEMENT	PRODUCTEUR, OPÉRATEUR ET UTILISATEUR FINAL	AUTRE (CONSEIL, ASSOCIATIONS DE RECHERCHE, ETC.)	
	PlanEnergi Jyllandsgade 1 DK-9520 Skørping www.planenergi.dk	PlanEnergi est une société de conseil indépendante organisée comme une fondation à but non lucratif sur les étapes logistiques de récolte, prétraitement et transformation de la paille pour la production combinée de chaleur et d'électricité, la combustion et la digestion anaérobie.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			●
			PRÉ-TRAITEMENT			●
			CONVERSION			●
	POMI Industri ApS Abildvadvej 5 DK-9610 Nørager www.pomi.dk	Produits : Accumulateur de balles à fixer sur de grandes presses à balles carrées afin d'avoir une collecte rapide et efficace sur le terrain. Empileur de balles qui permet de collecter et d'empiler avec la même remorque. Enrubanneuses pour grosses balles 5, 7 et 12 dans chaque pile.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE	●		
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION			
	Processbio A/S Fiskerhusvej 20 DK-4700 Naestved www.processbio.com	Processbio fournit des systèmes industriels de manutention des grandes balles de paille carrées, y compris des grues sur rails, des humidimètres, des systèmes de déchargement des camions entièrement automatisés, des systèmes d'alimentation avec fendage des bottes, basculement et distribution des balles ainsi que des systèmes de désenrubannage et d'éjection des balles. Capacités allant de 1 t/h à 75 t/h.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE	●		
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION			
	REKA A/S Vestvej 7 DK-9600 Aars www.reka.com	Produit des installations de combustion entièrement automatiques de 10 à 6500 kW pour la plupart des bio combustibles solides tels que la paille, les plaquettes de bois, les pellets, les copeaux de bois, la sciure, le charbon, les céréales et les balles. A développé une trémie à chaîne pour la paille en vrac et un électrofiltre pour le nettoyage des fumées de la combustion de la paille.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT	●		
			CONVERSION	●		
	Scanboiler Varmeteknik Vangvedvænget 1 DK-8600 Silkeborg www.scanboiler.dk	Spécialisé dans la vente et la conception de chaufferies pour les granulés de bois, les plaquettes de bois, le bois en bûches, avec des chaudières de 10,5 à 1000 kW. Scanboiler vend également des panneaux solaire et des systèmes de géothermie.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION	●	●	●
	SEGES Agro Food Park 15 DK-8200 Aarhus N www.seges.dk/en	SEGES possède des connaissances approfondies sur la production de paille et sur la manière d'optimiser le rendement et la qualité de la biomasse pour des applications spécifiques ciblées. SEGES peut, par l'intermédiaire des sociétés de conseil agricole, quantifier les gisements de paille disponibles dans une zone géographique d'intérêt spécifique.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			●
			PRÉ-TRAITEMENT			●
			CONVERSION			●
	Stratek ApS Bragesvej 11 DK-8660 Skanderborg www.stratek.com	Stratek est spécialisée dans la préparation et le traitement de la paille pour toute application industrielle comme la granulation, le briquetage, la mise en balles et la fabrication d'aliments pour animaux : des convoyeurs à balles, des broyeurs, des dépoussiéreurs, des séchoirs à bande, des machines de conditionnement et mise en sacs.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT	●		
			CONVERSION			

LOGO	DESCRIPTION DES CONTACTS	DESCRIPTION	DOMAINES D'EXPERTISE	FABRICANT/FURNISSEUR D'ÉQUIPEMENT	PRODUCTEUR, OPÉRATEUR ET UTILISATEUR FINAL	AUTRE (CONSEIL, ASSOCIATIONS DE RECHERCHE, ETC.)
	<p>Supertech Agroline ApS Maltgørervej 7 DK-5471 Søndersø</p> <p>www.supertechagroline.com</p>	<p>Développer et produire des équipements portables pour mesurer la teneur en eau et la température du foin, de la paille et de l'ensilage dans une fourchette de 8,5 % à 80 % de teneur en eau.</p>	<p>PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE</p>	●	●	
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION			
	<p>Danish Technological Institute (DTI) Agro Food Park 15 DK-8200 Aarhus N</p> <p>www.teknologisk.dk</p>	<p>Le DTI a plus de 20 ans d'expérience dans tous les aspects de la production (optimisation du rendement) et de l'utilisation et la gestion de la qualité de la paille, les machines et la technologie, la logistique, le prétraitement, la conversion, y compris la combustion, la digestion anaérobie, le bioraffinage.</p>	<p>PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE</p>			●
			PRÉ-TRAITEMENT			●
			CONVERSION			●
	<p>Verdo Agerskellevej 7 DK-8920 Randers NV</p> <p>www.verdo.com</p>	<p>Verdo a plus de 100 ans d'expérience dans la production d'énergie, le conseil, le développement et le service de solutions énergétiques clés en main à base de paille, plaquettes de bois, pellets ou déchets, et d'une capacité comprise entre 1 et 20 MW pour la production de chaleur et de vapeur.</p>	<p>PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE</p>			
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION	●	●	●
	<p>University of Copenhagen - Dept. of Geosciences and Natural Resource Management (IGN) Røglighedsvej 23 DK-1958 Frederiksberg C</p> <p>www.ign.ku.dk</p>	<p>IGN réalise la caractérisation des combustibles, l'analyse du contenu énergétique et des cendres, la réutilisation des nutriments des cendres, la conversion en combustible liquide et les questions de durabilité.</p>	<p>PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE</p>			
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION			●
	<p>Aarhus University Dept. of Engineering Research Centre Foulum Blichers Alle 20 DK-8830 Tjele Denmark</p> <p>www.eng.au.dk/en</p>	<p>L'université d'Aarhus a mené des projets axés sur le développement de nouvelles technologies de chaudières à paille et à biomasse sous l'angle de l'efficacité énergétique, la réduction des émissions et de l'impact environnemental, et dans une moindre mesure, la logistique et l'optimisation des chaînes d'approvisionnement.</p>	<p>PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE</p>			●
			PRÉ-TRAITEMENT			●
			CONVERSION			●
	<p>CZECH REPUBLIC Step TRUTNOV a.s. Na příkopě 1047/17 110 00 Praha 1</p> <p>www.steptrutnov.cz</p>	<p>Step TRUTNOV SA. propose la production combinée de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse sous l'angle économique pour une meilleure rentabilité des projets.</p>	<p>PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE</p>	●	●	
			PRÉ-TRAITEMENT	●	●	
			CONVERSION	●	●	
	<p>CZECH REPUBLIC TTS eko s.r.o. Průmyslová 163 674 01 Třebíč</p> <p>https://www.ttsboilers.cz</p>	<p>Le développement et la construction de chaudière à combustion de paille de type VESKO-S. Elle est produite dans une gamme de puissance de 2 à 5 MW et permet de brûler des balles de paille carrées (cultures céréalières, colza, foin, lin, oseille, etc.). La première chaudière VESKO-S a été mise en service à l'automne 2006 sur le secteur de Třebíč.</p>	<p>PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE</p>			
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION	●		

LOGO	DESCRIPTION DES CONTACTS	DESCRIPTION	DOMAINES D'EXPERTISE	FABRICANT/FURNISSEUR D'ÉQUIPEMENT	PRODUCTEUR, OPÉRATEUR ET UTILISATEUR FINAL	AUTRE (CONSEIL, ASSOCIATIONS DE RECHERCHE, ETC.)
	LITHUANIA Atenergy Verslininku str. 11A, Juodeliai Sirvintos regiona, Lithuania, LT-19131 www.strawcomfort.com	Atenergy est l'un des plus grands producteurs de granulés de paille des pays baltes. La marque commerciale Strawcomfort propose des granulés de paille ordinaires (8 ou 10 mm) et des granulés de paille broyée utilisés pour la litière des animaux. Toute la matière première est récoltée par Atenergy et les granulés sont 100 % naturels, sans aucun additif et de très haute qualité.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION		<input checked="" type="checkbox"/>	
	ROMANIA Erpek IND Ltd. 527035 Bodoc 14/A Jud. Covasna www.biosistem.ro	La société a une longue expérience dans le domaine technique, de la conception à la fabrication: I. Fours de boulangerie et autres accessoires dans le domaine II. Installations thermiques automatisées à base de déchets et de pellets de biomasse.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	UKRAINE Briquetting technologies 13306, Ukraine, Zhytomyr region, Berdychiv, st. Semenovskaya, 116 www.briq-tech.com	Briquetting Technology Company développe et fabrique des produits pour le briquetage et la granulation de la paille de 350 kg/h à 1200 kg/h : presses mécaniques, granulateurs, séchoirs aérodynamiques et broyeurs de balles de paille.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	<input checked="" type="checkbox"/>		
	UKRAINE Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine 2a, Marii Kapnist Str. Kyiv, 03057 Ukraine www.ittf.kiev.ua	L'Institut d'ingénierie thermophysique de la NAS d'Ukraine mène des travaux de recherche pour l'industrie et le secteur agro-industriel sur les technologies de combustion de différents types de biomasse, y compris la paille, dans des chaudières de petite et moyenne capacité ; l'étude des technologies de pyrolyse rapide de la biomasse et de production de biogaz.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION			<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
	UKRAINE SEC Biomass 03067, Ukraine, Kyiv-67, p/o 66 www.biomass.kiev.ua	Centre d'ingénierie scientifique "Biomasse" Ltd. (SECB) est un bureau d'études et de consultations, d'analyse et d'ingénierie dans les domaines suivants : technologies et politique en matière de bioénergie, potentiel de mobilisation de la biomasse, efficacité énergétique.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION			<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
	UKRAINE ZAVOD KOBZARENKO, LTD Ukraine, 42500, Sumy region, Lypova Dolyna, Rusanivska street, 17 www.kobzarenko.com.ua	Production et vente d'équipements pour la mise en balles, la manutention (grappin), le transport (remorque pour balles carrées PT-16 KVADRO, remorques autochargeuses pour balles rondes, remorques à plate-forme, enrurbanneuse pour balles rondes), le stockage (bâches agrofibrés pour la couverture), et la production d'air chaud à partir de générateurs de chaleur à paille.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	FRANCE COMPTE.R 4 Industry Street Arlanc, 63220 www.compte-r.com	COMPTE.R, fabricant de chaudières à biomasse, a développé depuis de nombreuses années de réelles compétences dans le domaine de la combustion des agrocombustibles : paille, rafles de maïs, ana de lin, co-produits de la viticulture. COMPTE.R propose des solutions performantes et à faible taux de NOx pour la valorisation énergétique des co-produits agricoles.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE PRÉ-TRAITEMENT CONVERSION	<input checked="" type="checkbox"/>		

LOGO	DESCRIPTION DES CONTACTS	DESCRIPTION	DOMAINES D'EXPERTISE	FABRICANT/FURNISSEUR D'ÉQUIPEMENT	PRODUCTEUR, OPÉRATEUR ET UTILISATEUR FINAL	AUTRE (CONSEIL, ASSOCIATIONS DE RECHERCHE, ETC.)
	ITALY Biofact www.biofact.eu	BIOFACT est une société d'ingénierie, d'assistance et de services pour les exploitants de chaufferie consommant la paille et les vendeurs de chaudières à paille pour prévenir l'apparition de phénomènes de scorification, d'encrassement et de corrosion. BIOFACT se base sur la variabilité de la composition chimique et l'hétérogénéité des combustibles en prenant en compte : les espèces, les conditions pédoclimatiques, les pratiques de fertilisation et les conditions logistiques de récolte jusqu'à l'introduction des ans la chaudière.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION			●
	AUSTRIA GILLES Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co KG Koaserbauerstrasse 16, 4810 Gmunden www.gilles.at	GILLES propose des technologies allant de 12,5 à 2 500 kW. Celles-ci ont été continuellement améliorées au cours des 28 dernières années pour permettre une automatisation moderne et fiable des chaufferies poly-combustibles.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION	●		
	AUSTRIA Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik Hainfelderstr. 69 2564 Weissenbach (NÖ) biomass.polytechnik.com	Premier fournisseur mondial de solutions avancées de conversion de la biomasse en énergie, Polytechnik, avec plus de 55 ans d'expérience, propose des solutions de combustion, d'unités de production de chaleur/cogénération et de carbonisation sur une large gamme de 150 combustibles.	PRODUCTION, RÉCOLTE ET LOGISTIQUE			
			PRÉ-TRAITEMENT			
			CONVERSION			●

AgroBioHeat Consortium



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS

CERTH est l'un des principaux centres de recherche en Grèce et intervient sur les domaines d'expertise suivants: étude de gisement d'énergie renouvelables, production et utilisation de biocombustibles solides, économies d'énergie et protection de l'environnement.
www.certh.gr



AVEBIOM est l'association espagnole de la bioénergie qui représente toutes les entreprises de la chaîne d'approvisionnement pour 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 énergétique de la biomasse.
www.bios-bioenergy.at



Bioenergy Europe (anciennement connu sous le nom d'AEBIOM) vise à développer un marché durable de la bioénergie basé sur des conditions commerciales équitables en Europe.
www.bioenergyeurope.org

AgroBioHeat Consortium



Food & Bio Cluster
Denmark

Food & Bio Cluster Denmark est le cluster national danois pour les aliments et les bioressources qui favorise la coopération entre la recherche et les entreprises, centralise et permet une mise en réseau à ses membres, un accès aux financements de projets de développement pour les entreprises, divers services et conseils.
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



PASEGES est une organisation civile à but non lucratif, créée en 2005 à Athènes par la Confédération des unions de coopératives agricoles grecques.
www.neapaseges.gr



La Coopérative d'énergie verte (ZEZ) a été créée en 2013 dans le cadre du projet "Développement des coopératives d'énergie 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 créé en 2013 en tant qu'organisme public pour créer une plateforme commune de coopération sur le marché de la bioénergie en Ukraine.
www.uabio.org



AILE accompagne les agriculteurs, collectivités, industriels de l'Ouest de la France sur les économies de carburant, la valorisation énergétique de la biomasse et la préservation des ressources (air,eau,sol,biodiversité, climat).
www.aile.asso.fr



White Research est une entreprise de recherche et de conseil spécialisée dans le comportement des consommateurs, l'analyse des marchés et la gestion de l'innovation, basée à Bruxelles.
www.white-research.eu



Agronergy est un FSE (Fournisseur de Services Energétiques) français dédié au chauffage renouvelable.
www.agronergy.fr



**L'exemple danois
montre que la
combustion de la
paille est aujourd'hui
une solution viable
pour un chauffage et
une production
d'électricité neutres
en carbone.**





Publication

Cette publication de Food & Bio Cluster Denmark fait le point sur l'utilisation de la paille à des fins énergétiques au Danemark et passe en revue les technologies, les politiques et les solutions innovantes pouvant être utiles dans d'autres pays disposant d'un excédent de paille non utilisé.

Elle comprend également une liste d'entreprises et d'organisations ayant des compétences et des technologies spécifiques dans la chaîne d'approvisionnement de la paille et de production d'énergie.

Réactualisée dans le cadre du projet AgroBioHeat, cofinancé par le programme Horizon 2020 de l'Union européenne. AgroBioHeat travaille à la promotion de solutions de chauffage à base d'agrobiomasse économiquement et écologiquement durables en Europe.

À propos de Food & Bio Cluster Denmark

Food & Bio Cluster Denmark est le cluster national danois pour les pratiques innovantes de valorisation des denrées alimentaires et les bioressources. Cette plate-forme collective favorise la coopération entre la recherche et les entreprises, centralise et permet une mise en réseau à ses membres, un accès aux financements de projets de développement pour les entreprises, ainsi que divers services et conseils.

www.foodbiocluster.dk

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 [@ileagance](https://twitter.com/ileagance).



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Grant Agreement No 818369