

Destinataire :

**Pôle Compétitivité Filière Equine
Locaux France Galop
92100
Boulogne Billancourt
France**

A l'attention de Madame Lola QUITARD

Villeurbanne, le 26/11/2008

Responsable de l'étude : **Nourreddine MOSTEFAOUI**

Fonction : Chargé d'études

Signature :

Rapport d'étude PROVISOIRE n° 2815178

Révision : 00

Faisabilité de la combustion du fumier de cheval

COLLABORATEUR (S) :

Seul l'exemplaire du rapport original signé sous forme papier ou une copie certifiée conforme par le CETIAT fait foi

CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES AÉRAULIQUES ET THERMIQUES

Domaine Scientifique de la Doua - 25, avenue des Arts - BP 2042 - 69603 Villeurbanne Cedex - France
Tél. +33 (0)4 72 44 49 00 - Fax. +33 (0)4 72 44 49 49 - www.cetiat.fr - E. Mail : cetiat.commercial@cetiat.fr
Livraisons : Domaine Scientifique de la Doua - 54, avenue Niels Bohr - 69100 Villeurbanne

Siret 775 686 967 00024 - Ape 731 Z

Le rapport original signé annule tous les résultats et documents provisoires communiqués.

Chaque révision annule et remplace la précédente.

Tout exemplaire périmé doit être retourné au CETIAT ou détruit ainsi que les éventuelles copies. Nous attirons votre attention sur les risques d'erreurs encourus à conserver une version périmée.

Révision	Date	Nature de la modification	Pages modifiées
00	26/11/2008	Première édition	

Les résultats et les rapports sont la propriété exclusive du demandeur et le CETIAT s'interdit leur communication à des tiers sauf autorisation écrite.

Toute utilisation commerciale du nom du CETIAT et des résultats est soumise à l'accord préalable du CETIAT.

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous sa forme intégrale.

Les rapports établis par le CETIAT ne sont valables que pour le matériel qui lui a été présenté, et dans les conditions particulières de l'essai.

Les informations relatives aux équipements de mesure utilisés pour les essais sont conservées dans le dossier archivé au CETIAT.

L'utilisation de ces résultats pour le dimensionnement d'installations utilisant ce matériel doit tenir compte des tolérances de fabrication, des conditions réelles d'exploitation et ne relève donc pas de la responsabilité du CETIAT.

Les formules ou codes utilisés pour prévoir soit le fonctionnement d'un appareil dans des conditions autres que celles de l'essai, soit les caractéristiques d'appareils semblables mais de dimensionnement différent tiennent compte de l'état des connaissances au moment de la livraison des résultats et sont susceptibles d'évolution. Les résultats obtenus par ces formules ou codes de calcul sont donnés de façon indicative.

L'exemplaire original du rapport est remis au client, une copie certifiée conforme est conservée au CETIAT.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	5
2. Propriétés des combustibles solides	6
3. Généralités sur la combustion de la biomasse.....	8
4. Applications au fumier de cheval.....	12
5. Utilisation du fumier après transformation en gaz.....	Erreur ! Signet non défini.
5.1. Centrale de gazéification à Ocala	Erreur ! Signet non défini.
5.2. Transformation en biogaz.....	Erreur ! Signet non défini.
6. Utilisation directe dans des appareils à combustion	14
6.1. Centrale thermique de 1 MW à Wellington	14
6.2. Chaudière de la société SWEBO (Suède)	14
6.3. Essais de combustion.....	17
7. Combustion du fumier en France.....	20
8. Exigences de la norme EN 303-5.....	22
9. Conclusions	24
10. Bibliographie.....	26
ANNEXE 1 - Liste des constructeurs de chaudières à granulés de bois.....	27
ANNEXE 2 - Analyses des échantillons de fumier	33
Tableau 1 : analyse de la paille	7
Tableau 2 : teneurs en cendres et silice issues de la combustion de la paille.....	7
Tableau 3 : analyse des cendres de la combustion de la paille	11
Tableau 4 : analyse des cendres de la paille (ADEME).....	11
Tableau 5 : seuils et classes d'émissions de polluants de la norme EN 303-5.....	22
Tableau 6 : seuils et classe de rendement selon EN 303-5.....	22
Figure 1 : différentes étapes de la combustion du bois	8
Figure 2 : unité de transformation des déchets en biogaz	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3 : Chaudière Bio Therm de SWEBO.....	15
Figure 4 : Principe de fonctionnement de la chaudière Bio Therm	16
Figure 5 : Stockage du fumier et dispositif d'alimentation de l'appareil.....	17
Figure 6 : CO et NOx (10% O2) de fumier de cheval et de bois déchiqueté (P =150 kW)....	18

Figure 7 : Mesures de NOx, CO, O2 et température des fumées 18
Figure 8 : Emissions de NOx, CO, O2 et température des fumées 19

1. INTRODUCTION

Un cheval adulte, d'environ 450 kilos, produit chaque jour de 10 à 14 kilos de crottin et 9 litres d'urine associés à 13 à 17 kilos de litière paille de céréales. Cela représente un volume annuel de plus de 40 m³ nécessitant 14 m² de surface de stockage. Sur litière copeaux de bois, un cheval adulte produit un volume annuel de fumier de plus de 25m³.

La gestion du fumier de cheval est une activité incontournable. Pour la rendre moins pénible, gagner du temps et limiter les problèmes de voisinage, il est important d'optimiser toutes les tâches à partir du paillage à l'élimination.

Le fumier de cheval est considéré à la fois comme un sous-produit organique et comme un déchet et à ce titre, tout détenteur d'un équidé est responsable du fumier produit jusqu'à son élimination. Il doit prendre toutes les dispositions pour éviter la création de nuisances et la pollution des eaux de surface.

Le règlement sanitaire départemental (RSD) définit des normes pour le stockage du fumier et pour la collecte des liquides d'égouttage.

Le fumier de cheval est utilisé dans la production de champignons après compostage, mais ce débouché se raréfie. Il peut être épandu directement ou après compostage pour apporter de la matière organique aux cultures, mais cette solution n'est pas toujours réalisable.

De plus, l'épandage peut poser des problèmes sanitaires avec des risques de contamination par des parasites et diffusion des graines d'adventices non digérées indésirables.

Le gisement de fumier de cheval ne peut être entièrement valorisé par ces utilisations pour différentes raisons et il est donc important de trouver des nouvelles utilisations pour le valoriser.

Cette étude porte sur l'utilisation du fumier de cheval pailleux ou mélangé avec de la sciure ou des copeaux de bois comme combustible dans des chaudières pour la production d'eau chaude pour le chauffage et le sanitaire.

2. Propriétés des combustibles solides

La valorisation du fumier de cheval comme d'autres litières d'élevage (bovins, porcins, volaille) présente des avantages économiques devant la montée du prix des énergies fossiles et environnementaux si les appareils de combustion utilisés sont performants du point de vues émissions des polluants.

Tous les combustibles solides comme le bois et ses dérivés, les déchets à base de bois, les céréales, les déchets agricoles (foin, paille, cosses, coquilles), les litières d'élevage et les boues d'eau usées domestiques ou industrielles sont caractérisés soit par une composition globale qui donne une information générale sur leurs compositions (humidité, matières volatiles, teneur en carbone, les cendres (matières minérales) et le PCI ou une analyse élémentaire qui donne la teneur massique des éléments principaux de la biomasse qui sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, le soufre et l'azote. De plus l'analyse élémentaire donne la composition des cendres.

Le combustible en question est la litière d'élevage (fumier de cheval) qui est constituée de sciures ou copeaux de bois, ou de paille de céréales, mélangés avec les résidus d'aliments, d'excréments et d'urine. Les informations relatives à la paille et aux copeaux sont donc applicables au fumier.

Les analyses des déchets agricoles comme la paille et le foin à base de blé ou de maïs montrent que ces combustibles sont constitués principalement des éléments élémentaires (Carbone et Hydrogène).

La paille a un pouvoir calorifique équivalent à celui du bois et peut être utilisée directement en bottes dans les chaudières de chauffage urbain ou sous forme de granulés dans certaines applications domestiques. Elle est souvent mélangée avec d'autres déchets ou produits agricoles comme les plaquettes forestières et les coquilles.

La paille est aussi caractérisée par son taux d'humidité qui varie de 18 à 22%. La paille sèche brûle très vite car 70% de la part combustible de la paille se trouve dans les gaz libérés pendant la phase de chauffage qui libère les gaz volatiles. La composition de la paille de blé est donnée dans le Tableau 1 suivant.

Cendres	Humidité	Carbone	Hydrogène	Azote	Soufre	Oxygène	Chlore	Potassium	Pouvoir Calorifique Supérieur
5,9	10,5	46	5,7	0,65	0,14	41	0,36	1,2	17,3

Tableau 1 : analyse de la paille

Une étude réalisée par l'ADEME montre que les pailles de céréales contiennent toutes des quantités importantes de cendres qui sont des substances minérales et de la silice comme le montre le tableau suivant.

La teneur en azote est relativement élevée et représente 2,5 à 4% alors que les teneurs en soufre et en chlore restent relativement faibles. Les analyses montrent que les cendres sont constituées principalement de CaO, K₂O, P₂O₅ et SO₃ et contiennent jusqu'à 7% de silice en fonction du type de paille (Tableau 2).

Céréale	Substance minérale (cendres)	Silice
Blé	4 – 9	3 – 7
Orge	5 – 7	3 – 6
Avoine	6 – 8	4 – 7
Seigle	2 – 5	0,5 – 4

Tableau 2 : teneurs en cendres et silice issues de la combustion de la paille

3. Généralités sur la combustion de la biomasse

Ce chapitre se concentre sur les émissions générées par la combustion des solides qui sont très complexes et contiennent un très grand nombre de constituants. La combustion des solides comprend trois phases principales qui sont :

- le séchage de la biomasse qui se fait entre 120 et 150°C avec l'élimination de l'humidité,
- la pyrolyse entre 500 et 600°C avec la production et dégagement des matières volatiles et dépôt de résidus de bois et enfin
- l'oxydation qui consiste à brûler les gaz produits en présence de l'air pour produire de la chaleur ainsi que tous les gaz de combustion.

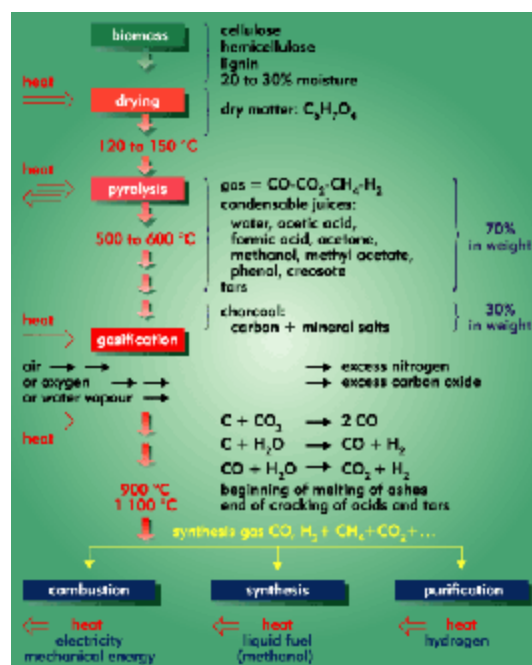


Figure 1 : différentes étapes de la combustion du bois

La Figure 1 ci-dessus présente les 3 étapes de la combustion du bois avec tous les produits intermédiaires formés. La combustion génère des fumées, des poussières, des cendres et des goudrons. Les quantités dépendent de la qualité du combustible et de l'humidité ainsi que des conditions d'aération.

Les produits les plus agressifs sont les goudrons, les cendres, les acides et les poussières qui seront présentés ci-dessous.

Les émissions de gaz produites par la combustion du bois et les autres combustibles solides sont CO₂, H₂O, NO_x et CO, SO_x. Elles sont connues et facilement mesurables en laboratoire ou sur site.

Les NO_x et les SO_x peuvent condenser dans certaines conditions et former des acides.

Les goudrons sont formés par la condensation des particules organiques condensables lorsque la température des fumées et ou l'excès d'air diminuent. En générale le goudron est défini comme un mélange complexe d'hydrocarbures condensables de masse moléculaire supérieure à celle du benzène (C₆H₆).

Les goudrons sont formés à la phase pyrolyse et condensent si la température descend en dessous de 150°C/200°C.

Ils se déposent sur les parois froides et sont une des principales causes de la corrosion et de l'obturation des conduits de fumées.

Les cendres sont constituées des espèces non organiques (minérales) des combustibles solides. Elles sont formées dans la partie pyrolyse de la combustion. Les cendres et les poussières sont produites à différents diamètres. On peut distinguer :

- les cendres de gros diamètres (quelques µm) qui se déposent dans la chambre de combustion ou le foyer (cendrier)
- les cendres de diamètre (<1µm) qui quittent la chambre de combustion sous forme de poussières dans les fumées. Elles se déposent sur les parois de l'échangeur et du circuit des produits de combustion ainsi que dans les conduits de fumées.

Le mécanisme de formation des grosses particules (cendres) et des fines particules (poussières) dépend de la température. On distingue 4 groupes :

- grosses particules > 10 µm formées à partir des poussières volantes résiduelles libérées par le lit de braises et composées de métaux réfractaires (Ca, Mg, Mn et Si)
- grosses particules de l'ordre de 1 µm produites probablement à partir de la conversion des sels alcalins de l'état vapeur à l'état solide. Ce processus n'est pas bien connu.
- fines particules (volantes) < 1 µm produites à partir de la vaporisation des minéraux volatiles (K, Na, S, Cl et Zn et dans certains cas P) dans le lit de combustion ou dans la flamme. Ces produits sont présents sous différentes formes (K, KCl, KOH, Na, NaCl, NaOH et Zn.)
- fines particules de combustion incomplète (imbrûlés) ou particules de suie < 1 µm sont produites dans la zone de flamme à faible concentration d'oxygène et peuvent facilement s'oxyder dans les zones à forte concentration d'oxygène.

On remarque que la vaporisation des matières alcalines se fait en fonction de la température et de la composition de la biomasse.

Le chlore est libéré en deux étapes 20 à 70 % autour de 500°C, le reste entre 700 et 900 °C.

Le Potassium, présent sous forme de chlorure de potassium, est libéré sous forme de silicate de potassium entre 700 et 800 °C. A partir de 830°C, le carbonate de potassium (K_2CO_3) se décompose et libère du Potassium sous forme de potasse (KOH) ou K uniquement. A une température supérieure à 1000°C, le potassium est libéré directement à partir du combustible solide ou à partir de la décomposition des silicates.

En général, les particules (cendres) dans les fumées sont constituées principalement de K, avec des parties infimes de Cl, S et Ca.

Les sulfates de potassium (K_2SO_4) sont formés à partir de la réaction de KOH et KCl avec du SO_2 à une température supérieure à 800°C. A des températures inférieures à 800°C ou si les concentrations de Cl et S sont faibles, KOH et K_2CO_3 sont produits.

KCl est plus agressive que K_2SO_4 du point de vue corrosion à haute température.

La suie est constituée des HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) qui sont des boucles aromatiques associées à des groupes alcalins.

La formation de la suie est conditionnée par la température et le taux d'aération ou d'oxygène. Si la température diminue, la concentration d'oxygène a un effet mineur sur la formation de la suie.

En plus de tous ces produits, la combustion produit des dioxines et des furannes à faibles concentrations. Ces deux polluants affectent plus la santé et l'environnement que la corrosion des conduits de fumées.

La paille brûle facilement quand elle est sèche. Dans certaines applications elle est humidifiée avant d'être brûlée.

C'est un combustible assez hétérogène avec une densité énergétique faible. Pour la même quantité d'énergie fournie, le volume de la paille est de 10 à 20 fois celui du charbon. La température de fusion de la paille est de 920°C.

Quand la paille brûle, elle produit autant de CO_2 qu'elle en a consommé pendant sa croissance et dégage moins de SO_2 par rapport au FOD mais plus que le gaz naturel et une quantité équivalente de NO_x que les autres combustibles.

Les particules émises par la combustion de la paille sont des sels solubles ainsi que des émissions de paille partiellement brûlée et de la suie de 300 à 2000 mg/Nm³ de fumées en fonction de l'origine et la qualité de la paille.

La combustion génère également des émissions de CO, d'hydrocarbures poly aromatiques (HPA), de dioxine et de l'acide chlorhydrique.

L'étude danoise montre que les cendres et les poussières produites par la combustion de la paille contiennent principalement du potassium (K), du Chlore (Cl) ainsi que du soufre, du phosphore (P) et d'autres minéraux et métaux comme le montre le **Tableau 3** ci-dessous.

Composant	Sodium (Na)	Magnésium (Mg)	Aluminium (Al)	Silicium (Si)	Phosphore (P)	Souffre (S)	Chlore (Cl)	Potassium (K)	Calcium (Ca)
Teneur masse (%)	1,31	0,31	0,33	4,23	4	4,78	34,38	49,61	1,06

Tableau 3 : analyse des cendres de la combustion de la paille

L'étude de l'ADEME donne également des informations sur les cendres produites par la combustion de la paille. On retrouve les mêmes minéraux et métaux sous forme d'oxydes comme le montre le Tableau 4 suivant.

Composants	SO ₃	Cl	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Teneur en masse	1,5	2,5	4,8	53	0,2	0,3	3,5	1,6	0,1	12

Tableau 4 : analyse des cendres de la paille (ADEME)

On remarque que les cendres sont composées de plus de 50% de silice (SiO₂) qui est la cause de la formation des mâchefers.

4. Applications au fumier de cheval

Le fumier de cheval récupéré dans les écuries est à base de litière de paille de blé ou de déchets de la transformation du bois (sciure, copeaux) et des foins des produits agricoles comme le chanvre ou le lin.

La différence par rapport aux autres combustibles solides est le taux d'humidité très élevé qui dépasse largement 50%. Ce taux d'humidité élevé est lié au mode de stockage du fumier qui se fait majoritairement en extérieur.

Des analyses réalisées dans l'état de Washington (USA) pour plusieurs types de biomasses montrent que le fumier de cheval est très riche en cellulose, hémicellulose et lignine et contient plus ou moins les mêmes composants trouvés dans la paille ou le bois.

On trouve également de l'azote, provenant de l'urine de cheval, sous forme d'ammonium (NH₄⁺) et ammoniacque moléculaire (NH₃) et sous forme de nitrate (NO₃).

Des analyses équivalentes de plusieurs échantillons de fumiers ont été réalisées par le pôle compétitivité de la filière équine. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les tableaux de l'annexe I.

Les analyses réalisées dans l'état de Washington et celles réalisées par le pôle de compétitivité de la filière équine sont complémentaires.

Les premières sont orientées plus vers l'aspect valorisation des fumiers comme combustible en se concentrant sur les propriétés relatives à la combustion alors que celles réalisées par le pôle présentent en plus d'autres aspects comme le potentiel de gazéification pour la production de biogaz ou de gaz de synthèse.

Les compositions élémentaires obtenues dans les deux cas sont équivalentes et peuvent être comparées à celle du bois sous forme de bûches ou de granulés.

Du point de vue énergétique, le fumier de cheval fournira la même quantité de chaleur dans le foyer d'une chaudière que le bois ou les déchets forestiers ou agricoles. Du point de vue émissions de polluants, on retrouvera les principaux éléments comme le CO, le CO₂, les oxydes d'azote, les imbrûlés gazeux ou COV (composés organiques volatiles) ainsi que des poussières ou particules.

Les matières non organiques sous formes d'oxydes sont récupérées dans les cendres avec des quantités et des compositions variables en fonction de l'origine du fumier et du type et origine de la litière utilisée.

La plus grande différence entre le fumier de cheval à base de la paille ou de copeaux de bois et la biomasse (bûches, bois déchiquetés ou granulés) est l'hétérogénéité du fumier et surtout son taux d'humidité qui reste très variable et élevé pouvant dépasser les 50%.

La combustion de la biomasse que ce soit des déchets agricoles ou forestiers ou de la litière mélangée avec du fumier produit en plus des gaz cités ci-dessus des goudrons qui sont la principale cause d'obturation des conduits de fumées et donc le mauvais fonctionnement des appareils.

Les goudrons produits par certains combustibles se déposent sur les foyers et les échangeurs des appareils et sont la cause des percements des corps de chauffe des chaudières.

Une autre cause de la corrosion est la présence de chlore et de soufre dans les combustibles. Si la température des fumées est inférieure à la température de rosée, on forme suite à la condensation, les acides sulfurique (H_2SO_4), sulfureux (H_2SO_3) et chlorhydrique (HCl) à faibles concentrations.

Le métal est attaqué par des piqûres jusqu'à perforation dans certains cas ou par une corrosion de surface dans d'autres cas. La corrosion par piqûres est le résultat de la très forte concentration d'acide obtenue suite à l'évaporation de l'eau pendant les phases d'arrêt de la chaudière.

Les dépôts de goudrons sont aussi une autre cause de la corrosion. Cette forme de corrosion peut être de type électrochimique due à la différence de concentration d'oxygène entre les parties couvertes de goudrons et les parties non couvertes.

La paille et les céréales contiennent de la silice ou silicium en quantité importante par rapport aux autres combustibles solides. La paille mélangée avec le fumier de cheval brûle dans la chaudière et génère du mâchefer qui est également une cause de corrosion et de détérioration des performances thermiques et mécaniques de la chaudière.

5. Utilisation directe dans des appareils à combustion

L'humidité élevée du fumier de cheval mélangé avec de la paille ou de la sciure rend la combustion difficile.

Les chaudières doivent être adaptées, réglées et contrôlées régulièrement pour obtenir des bonnes performances thermiques et environnementales.

Le plus facile et donc le moins onéreux est de brûler directement le fumier dans des chaudières adaptées sans aucun traitement ni préparation du combustible.

L'autre solution est de passer par une étape intermédiaire où il faut transformer le fumier en granulés puis les brûler dans des chaudières automatiques à granulés de bois.

Les chaudières automatiques disponibles sur le marché peuvent brûler ces granulés avec des réglages spécifiques.

Dans tous les cas le suivi du fonctionnement de la chaudière et un entretien régulier des différents composants seraient nécessaires.

Un cheval de taille moyenne produit en fumier l'équivalent d'une puissance de 4 kW lorsqu'il est utilisé comme combustible ce qui représente une perte incroyable d'énergie. Avec cette base de calcul, un établissement hébergeant 40 chevaux représente un potentiel de 160 kW de puissance thermique. L'énergie générée peut être utilisée pour chauffer les locaux, les étables, les bâtiments et autres annexes pour une surface de 2500 m².

5.1. Centrale thermique de 1 MW à Wellington

A Wellington (Floride) la société Wellington Energy LLC, souhaite construire une centrale pour brûler le fumier de cheval pour la production de l'électricité.

Une centrale similaire en Pennsylvanie, d'une puissance de 1 MW, produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau et de l'eau chaude de chauffage avec une puissance de 1 MW. L'unité brûle 130 tonnes de fumier par jour.

5.2. Chaudière de la société SWEBO (Suède)

La chambre de combustion innovatrice, Bio Therm, de la société SWEBO peut transformer les matériaux tels que le fumier de cheval et d'autres déchets en énergie. Elle est commercialisée en Suède depuis plus de 5 ans mais beaucoup d'utilisateurs potentiels attendent les résultats de cette phase d'essais et de validation.

Son utilisation actuelle est la valorisation du fumier de cheval pour produire de l'eau chaude pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire dans plusieurs champs de course.



Figure 2 : Chaudière Bio Therm de SWEBO

L'appareil proposé par la société SWEBO (Figure 2) n'est pas conçu uniquement pour brûler du fumier de cheval mais peut être adapté pour brûler d'autres déchets végétaux et agricoles.

La combustion se fait en deux étapes. La zone primaire permet de brûler le combustible avec de l'air primaire uniquement qui arrive par des conduits autour du foyer et où la température peut atteindre 850 °C et la zone secondaire qui est le conduit reliant la zone primaire à l'échangeur de chaleur où les fumées sont mélangées avec l'air secondaire.

Cette partie permet d'optimiser la combustion en fonction des caractéristiques du combustible utilisé et la température peut atteindre 1100 °C.

La société commercialise une gamme d'appareils de 30 kW à 1000 kW avec un ou deux chambres de combustion primaires pour pouvoir moduler en puissance en fonction des besoins comme en été lorsque la demande est faible, on peut faire fonctionner une seule chambre pour les besoins d'eau chaude sanitaire uniquement.

Le système est fourni avec tous ses composants pour des nouvelles applications ou des parties du système à adapter pour des chaufferies existantes.

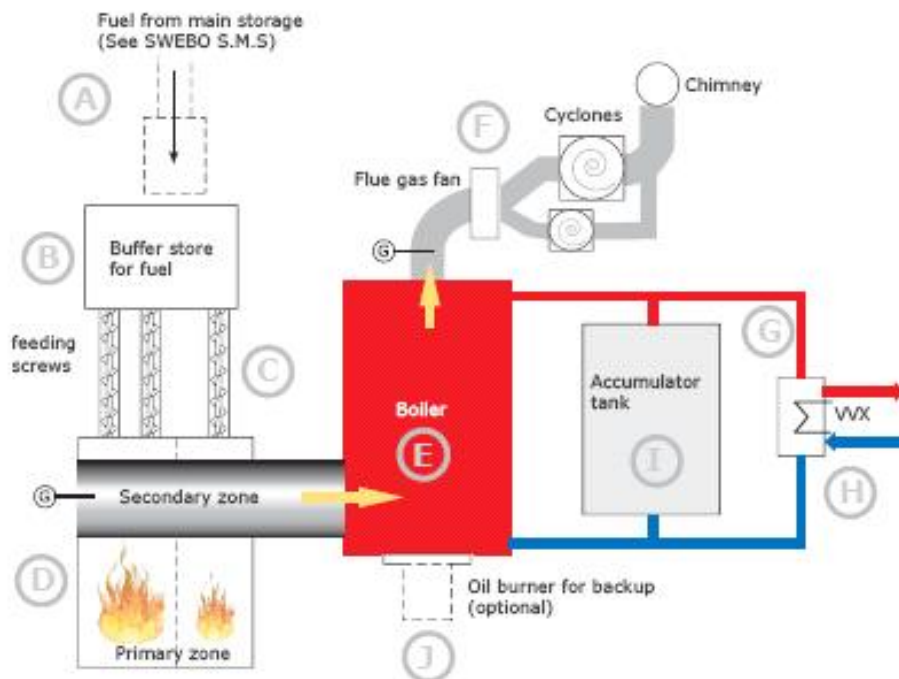


Figure 3 : Principe de fonctionnement de la chaudière Bio Therm

La Figure 3 montre le principe de fonctionnement de la chaudière Bio Therm.

Le combustible est transféré du stockage principal (A) qui se trouve généralement à l'extérieur de la chaufferie vers un stockage tampon (intermédiaire) (B) pour alimenter les chambres de combustion primaires au moyen de vis sans fin (C) où il est brûlé. Les produits de combustion sont mélangés avec de l'air secondaire comme décrit ci-dessus pour optimiser la combustion. Une sonde permet de vérifier si les réglages de l'air primaire sont corrects.

Les produits de la combustion alimentent l'échangeur ou la chaudière (E) pour chauffer l'eau. Un extracteur (F) permet de transférer les produits de combustion vers des filtres à cyclone pour récupérer les poussières puis vers le conduit de fumée.

Des systèmes de sécurité, des vannes et des sondes de température sont utilisés pour assurer un débit d'eau optimum pour éviter les surchauffes.

L'appareil est conçu pour utiliser en option un brûleur d'appoint fonctionnant au fioul domestique.

La société SWEBO commercialise également un système spécialement conçu pour le stockage et de manipulation du fumier (Figure 4) et des déchets pour différentes capacités allant du chauffage urbain au tertiaire avec différentes options possibles.

Les dimensions du plateau varient de 3x2,4 m à 6x2,4



Figure 4 : Stockage du fumier et dispositif d'alimentation de l'appareil

5.3. Essais de combustion

Des essais ont été réalisés pour étudier la combustion des crottins de cheval mélangés avec de la sciure dans un appareil de 400 kW. L'appareil a été instrumenté pour analyser en continu les produits de combustion O₂, CO₂, CO and NO_x.

Les essais ont montré que le taux d'humidité est très important pour la combustion et donc très difficile de brûler ce combustible si l'humidité est supérieure à 60% et la température de combustion dans la zone primaire doit dépasser 850°C pour limiter les émissions de CO et d'hydrocarbures imbrûlés comme pour les copeaux de bois très humides.

Plusieurs essais ont été réalisés à un taux d'humidité de 49% avec des émissions de polluants correctes. La **Figure 5** montre les émissions moyennes de CO et de NO_x produites par la combustion du fumier de cheval d'un côté et celles émises par la combustion des copeaux dans un appareil de 150 kW avec des taux d'humidité de 50%.

On remarque que les émissions de NO_x et CO produites à partir du fumier sont élevées par rapport à celles émises par la combustion des copeaux dans un rapport de 2,5.

Les émissions de NO_x sont élevées car le fumier contient de l'azote sous forme ammoniac et d'autres formes provenant de l'urine.

Il ne faut pas oublier que l'azote sous forme d'ammoniac est également émis dans les autres utilisations des fumiers en stockage et épandage dans les champs.

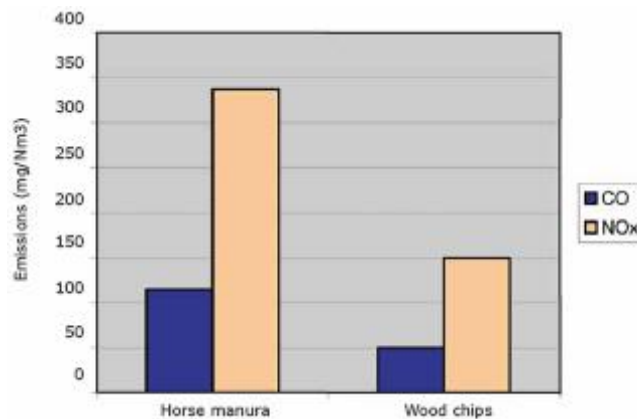


Figure 5 : CO et NOx (10% O₂) de fumier de cheval et de bois déchiqueté (P =150 kW)

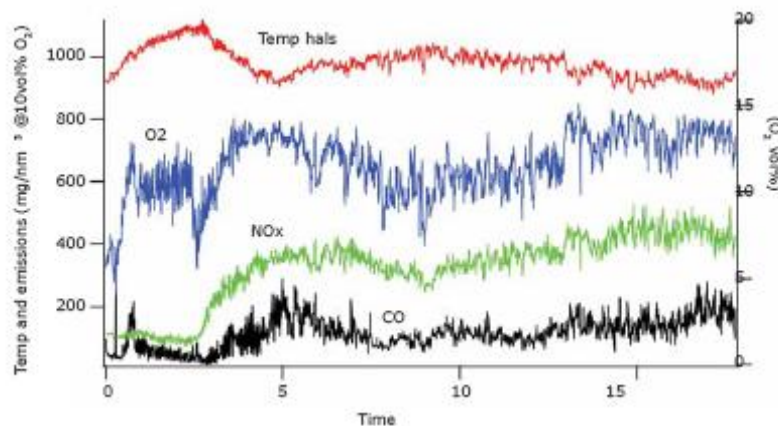


Figure 6 : Mesures de NOx, CO, O₂ et température des fumées

La Figure 6 et la

Figure 7 montrent l'évolution des émissions de CO et NOx produites par le même combustible avec un taux d'humidité de 49% mais avec des réglages d'air primaire différents.

Dans le premier cas, la proportion d'air secondaire est élevée et on remarque que les valeurs de CO et de NOx correspondent aux moyennes données ci-dessus.

Dans deuxième cas, la proportion d'air secondaire a été diminuée à une valeur très faible en augmentant considérablement la part de l'air primaire. Ceci a permis de diminuer les émissions de CO dans les fumées comme le montre la figure suivante.

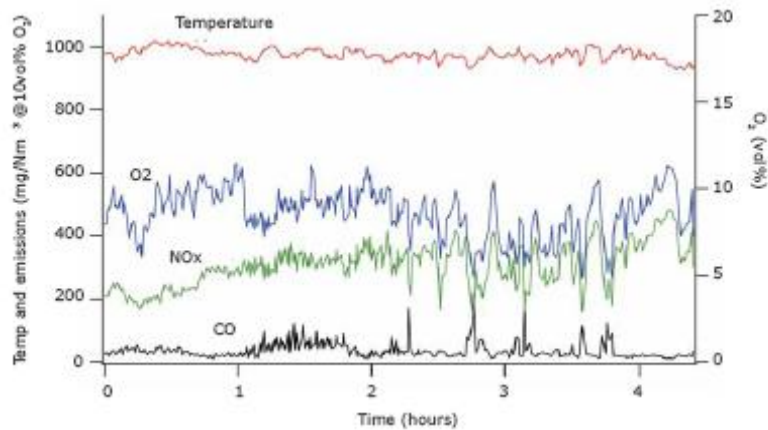


Figure 7 : Emissions de NOx, CO, O2 et température des fumées

En conclusion on peut dire qu'il est possible d'obtenir une bonne combustion du fumier de cheval dans ces appareils si l'humidité reste inférieure à 50%

Les derniers essais réalisés avec une humidité de 54% ont donné des résultats acceptables.

La société SWEBO est représentée en France par la société Agriculture Energie Biomasse (voir coordonnées en annexe I : liste des constructeurs)

6. Combustion du fumier en France

En France, les attentes portent davantage sur les chaudières individuelles à fumier de 200 à 300 kW car elles permettent à la fois de régler des problèmes environnementaux, de résorber les excédents de fumier, et de réduire les coûts énergétiques des exploitations agricoles.

Dans le cadre du plan de résorption breton, il était prévu d'utiliser une partie des déjections en valorisation énergétique dans de petites unités pilotes d'incinération. Deux unités de ce type ont été construites.

- La première unité, à Braspart dans le Finistère, traite 530 tonnes de fumier avec 160 tonnes de plaquettes de bois.
- La seconde, à Saint Ségal également dans le Finistère, utilise 360 tonnes de fumier avec 240 tonnes de plaquettes.

Ces deux expériences n'ont pas permis de démontrer la faisabilité d'une telle installation car elles n'ont pas pu satisfaire la réglementation relative aux unités d'incinération d'ordures ménagères (directive 2000/76/CE) puisque le fumier de volaille est assimilé à un déchet au même titre que les ordures ménagères

Les études sur le second procédé dit procédé «Stercus » devraient se poursuivre en partenariat avec l'Ademe et la région.

Convaincus de l'intérêt économique et technique du concept, des constructeurs continuent à s'y intéresser, et en particulier l'entreprise **Intertec Environnement**, filiale du groupe LGC dans le Calvados, qui s'intéresse depuis longtemps au concept de chauffage de poulaillers à partir de la combustion de fumier de volailles.

Des améliorations ont été apportées au prototype initial pour que la chaudière Stercus puisse fonctionner avec tout type de litière, contrairement au projet initial qui imposait un mélange de fumier, de copeau et de bois. Désormais, la nouvelle chaudière pourra être alimentée avec du fumier seul, quelle que soit la litière utilisée (copeau, paille ou autre), sans séchage ou rajout de biomasse.

Deux prototypes de centrale vont être prochainement mis en place dans l'ouest et le sud-ouest pour une phase d'essais. La centrale Stercus sera commercialisée début 2009.

La chaudière qui peut atteindre une puissance de 300 kW a été développée par la société Intertec et est composée de deux parties superposées. La partie inférieure comprend le foyer qui est équipé d'un four vertical en céramique et la partie supérieure de la chaudière placée au-dessus du four correspond à la chambre de détente des fumées et aux échangeurs de chaleur.

Les combustibles sont acheminés séparément dans le four par deux vis sans fin. Les apports et le décentrage sont pilotés par un automate. Le pilotage est réalisé en fonction de la température de l'eau dans la chaudière, celle des fumées et celle de la chambre de l'échangeur de chaleur.

L'eau chaude produite est utilisable telle quelle ou comme fluide de chauffage pour aérotherme ou dans un système de chauffage de type plancher chauffant.

La gamme de la société COMPTE ROBERT se compose de chaudières dites **COMPACT EVOLUTION** de 250 à 2000 kW et **COMPACT** de 1500 kW à 8000 kW.

Tous les équipements sont disponibles pour toutes les caractéristiques de **combustibles de très humides** à très secs avec divers types de grille et systèmes d'introduction, et sont dotés des dernières améliorations en matière de combustion avec un foyer bas NOx bas CO et une régulation entièrement automatique.

De plus, compte tenu des évolutions réglementaires, toutes les installations peuvent être équipées de **traitement de fumées** performant en utilisant des électro-filtres ou des filtres à manches.

L'annexe 1 présente la liste des constructeurs de chaudière à biomasse.

7. Exigences de la norme EN 303-5

La norme européenne applicable aux chaudières utilisant les combustibles solides est la EN303-5.

Elle date de 1999 et s'applique aux chaudières de puissance inférieure à 300 kW prévues pour brûler des combustibles solides uniquement et sont installées et utilisées selon les instructions du constructeur. Les chaudières sont à alimentation manuelle ou automatique et utilisent les combustibles à base de biomasse et les combustibles fossiles pour la production d'eau chaude à une température inférieure à 100°C et une pression inférieure à 6 bars.

La norme fixe des exigences et des classes pour les émissions de CO (monoxyde de carbone), les COV (composés organiques volatiles) et les poussières. Le Tableau 5 présente les classes et les seuils des émissions de CO, COV et les poussières de la norme EN 303-5.

Classe d'émissions			Seuils								
			CO			OGC			Poussières		
			mg/Nm3 à 10% O2								
Type d'alimentation	Type de Combustible	Puissance nominale kW	Classe			Classe			Classe		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
Manuelle	biomasse	50	25000	8000	5000	2000	300	150	200	180	150
		50 à 150	12500	5000	2500	1500	200	100	200	180	150
		150 à 300	12500	2000	1200	1500	200	100	200	180	150
	Fossile	50	25000	8000	5000	2000	300	150	180	150	125
		50 à 150	12500	5000	2500	1500	200	100	180	150	125
		150 à 300	12500	2000	1200	1500	200	100	180	150	125
Automatique	biomasse	50	15000	5000	3000	1750	200	100	200	180	150
		50 à 150	12500	4500	2500	1250	150	80	200	180	150
		150 à 300	12500	2000	1200	1250	150	80	200	180	150
	Fossile	50	15000	5000	3000	1750	200	100	180	150	125
		50 à 150	12500	4500	2500	1250	150	80	180	150	125
		150 à 300	12500	2000	1200	1250	150	80	180	150	125

Tableau 5 : seuils et classes d'émissions de polluants de la norme EN 303-5

On remarque que la norme ne fixe pas d'exigences pour les NOx (oxydes d'azote) ni pour les dioxines et furannes.

La norme fixe également des classes de rendement en fonction de la puissance nominale (QN) et le type d'alimentation.

Classe	Valeur seuil
3	$> 67 + 6 \log QN$
2	$> 57 + 6 \log QN$
1	$> 47 + 6 \log QN$

Tableau 6 : seuils et classe de rendement selon EN 303-5

Cette norme n'est pas obligatoire. Elle est utilisée en France comme référentiel pour le label flamme verte qui sert pour le crédit d'impôts.

Elle sera révisée prochainement pour introduire des nouvelles exigences de sécurité spécifiques aux parties mécaniques, électriques et électroniques (vis d'alimentation, régulation) et de créer des classes d'émissions et de rendement pour les appareils les plus performants.

Il n'a aucune obligation de marquage CE pour les chaudières conformes à cette norme car elle n'est pas harmonisée par rapport à une directive européenne type rendement 92/42/CEE ou appareils à gaz (90/396/CEE).

8. Conclusions

Cette étude a permis de faire un point sur la valorisation du fumier de cheval pailleux ou à base de copeaux de bois.

Les résultats de cette étude montrent que plusieurs moyens et méthodes sont utilisés dans certains pays du Nord comme le Danemark et la Suède et aux USA pour la valorisation des déchets agricoles et des litières d'élevage pour la production de l'électricité, de l'eau chaude pour le chauffage ou les usages sanitaires.

La gazéification qui utilise des procédés thermochimiques permet de transformer les déchets en gaz combustible, composé essentiellement de monoxyde de carbone, d'hydrogène et d'azote. Ce gaz est brûlé directement dans un appareil à combustion (chaudière, turbine à gaz ou moteur) pour la production de chaleur ou de l'électricité.

La méthanisation est la transformation des déchets en l'absence d'oxygène (anaérobie) en biogaz. Le gaz obtenu est composé de méthane, de sulfure d'hydrogène et de dioxyde de carbone. Ce gaz est brûlé sur le site. La taille des unités varie de la petite installation dans une ferme jusqu'à l'installation collective alimentée par plusieurs fermes.

La combustion directe qui brûle du fumier sans aucun traitement dans des appareils de combustion destinés à brûler de la paille, des déchets de bois comme les copeaux ou du bois déchiqueté.

Une autre solution est la transformation du fumier en granulés avant de les brûler dans des chaudières multicom bustibles. Ces chaudières prévues généralement pour brûler des granulés de bois doivent être adaptées et réglées pour optimiser la combustion.

Certains problèmes risquent d'apparaître lors de l'utilisation du fumier non traité comme combustible dans les chaudières automatiques. On peut citer :

- la teneur en humidité très élevée et la non-homogénéité du fumier par rapport aux autres combustibles à base de biomasse,
- la présence d'azote (urine) dans le combustible qui sera la source principale des émissions d'oxydes d'azote,
- la paille contient de la silice qui est l'origine de formation de mâchefer avec ses effets négatifs
- les poussières issues de la combustion risquent d'être élevées,
- l'hétérogénéité des granulés (humidité, dimensions, poussière, friabilité)

Les essais réalisés en Suède en brûlant du fumier avec un taux d'humidité de 54% dans un appareil à combustion commercialisés dans certains pays comme les USA donnent des résultats qui respectent les exigences de la norme européenne EN 303-5.

Il existe également des applications en Bretagne, supportées par l'ADEME et la région pour valoriser les fumiers de volaille comme combustible avec l'implication de quelques constructeurs français.

L'étude montre que ces appareils sont conformes aux exigences normatives d'émissions de polluants mais des problèmes restent à éclaircir sur la classification des fumiers et quelles normes s'appliquent aux émissions des polluants issues de la combustion des fumiers, des litières d'élevage et autres déchets d'agriculture.

9. **Bibliographie**

Différentes notes techniques et autres documents du CETIAT sur la combustion du bois.

http://www.fival.info/images/stories/pdf/fumier_equin.pdf

<http://activerain.com/blogsview/236284/Wellington-s-Surplus-Of>

https://manuremanager.annexweb.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1627&Itemid=96

<http://www.elmia.se/en/World-Bioenergy/Fair-news/No-more-manure-piles>

<http://www.thoroughbredtimes.com/farm-management/farm-management-09-27-08.aspx>

<http://www.itebe.org/portail/affiche.asp?arbo=1&num=248>

http://www.planete-energies.com/getContent.aspx?directory=5_6_3_methanisation_dechets

<http://www.swebo.com>

http://www.energies-renouvelable.com/presse/58_1.pdf

http://www.pleinchamp.com/article/detail.aspx?id=31300&menu_id=12&page=1&local=false&pub_id=281

http://www.pleinchamp.com/article/detail.aspx?id=31301&menu_id=12&page=1&local=false&pub_id=281

<http://www.polytechnik.com/index.php?module=ContentExpress&func=display&btile=CE&mid=&ceid=172>

<http://planetpal.net/Fr/Infos/chaudiere.shtm>

http://www.ouest.cuma.fr/Documents/energies/Energies%20renouvelables/generalites/projet_prg_agriculture_nrij_bzh.pdf (rapport sur l'énergie en Bretagne)

<http://www.creuse-agricole.com/public/impressionPDF.php?codeArticle=5869> (Perge)

http://www.compte-r.com/pdfs/Dossier_presse_juin_2008_COMPTE-R.pdf

<http://dechetsbtplr.free.fr/textetreglementation/classification.htm> (classification)

http://www.rsenews.com/public/dossier_envi/dechets-classification.php?rub=3 (déchets banals)

http://aida.ineris.fr/textes/code_env/textes/livre_5_titre_4_reg.htm (code environnement)

Documentations techniques de l'appareil Bio Therm de la société SWEBO

ANNEXE 1 - Liste des constructeurs de chaudières à granulés de bois

COMPTE Robert

Contact : Dominique COMPTE

ZI de Vaureil –

Route d'Aranc

63220 DORE L'ÉGLISE

Tél : 04 73 95 01 91

www.compte-r.com

GF SERVICES

Contact : Olivier GALLAND

352, Rue Victor Hugo

42120 COMMELLE VERNAY France

Tel: 04 77 67 18 70

Internet : www.gfservices.fr

Importateur exclusif France Chaudières multicom bustibles à plaquettes et à granulés
SOMMERAUER & LINDNER, modules BIOCOPACT intégrant silo et chaudière
multicom bustibles à plaquettes

Marques : Sommerauer & Lindner,

PRIMENERGIE

Contact : Angèle GARNIER

38, boulevard du Couhard

42680 ST MARCELLIN EN FOREZ

Tel : 04 77 52 75 80

Internet : www.primenergie.com

Etudes, commercialisation, installation, mise en route et maintenance de chaudières à bois,
poêles, inserts, fourneaux et autres moyens de chauffage basés sur les énergies renouvelables
(Solaires, etc...). Vente de broyeurs

Marques : HEIZOMAT, WANDERS, PIROUX

NATURA CONCEPT

Lionel FORMOSA

50, avenue des Ecoles Militaires

13100 AIX EN PROVENCE

Tel: 08 71 58 17 05

www.oranelle.com

Vente de poêles et chaudières à granulés de bois.

Fröling France SARL

Christian BALDAUFF
84, route de Strasbourg
67504 HAGUENAU CEDEX
Tel: 03 88 90 29 79

www.froeling.fr

Gamme chaudières bûches FHG de 20 à 70 kW, granulés P2 de 10 à 25 kW, plaquettes
Turbomatic de 28 à 110 kW.

Marques : Fröling

NATURE ENERGIE

Yann DENANCE
5, Grande Rue
38350 LA MURE
Tel : 04 76 30 77 94

www.nature-energie.com

Importateur des chaudières à granulés de marque Biotech

Marques : Biotech, Flexomatic

Ökofen France

Thomas PERRISSIN
45, route d'Apremont
73000 BARBERAZ
Tel : 0479 65 01 71

www.okofen.fr

Distribution chaudières à granulés de bois ÖKOFEN.

Marques : Ökofen

AMBIANCE ENERGIES

Yves CAYROU
20, rue de Bétheny Actipôle La Neuville
51100 REIMS
Tel : 03 26 86 70 54

www.ambianceenergies.com

Marques : ECOFOREST, BIO TECH, ENVIROFIRE, PAGNOD, EXTRAFLAME,
EUROLUZ, SOFAG, SOLUTION, PALAZZETTI

ECOTEC

Franz LARCHER

Moulin du Beuveron

04300 FORCALQUIER

Tel: 04 92 73 10 80

Coordination KÖB France Est,
chaudières à bois de 35 à 1300 kW.

Marques : Köb

http://www.koeb-holzfeuerungen.com/kus_tree//powerslave.id.1.nodeid.1.lang.FR.html

REKA-France Sarl

C. OLESEN

38, rue des Bouts de la Ville

78250 GAILLON SUR MONTCIENT

Tel : 0134 74 89 17

www.reka-france.fr

Fabricant de chaudières à biomasse tous combustibles, puissances entre 10kW et 6 000 kW -
Chaudières céréales, paille, bois, granulés, plaquettes, toutes biomasses. Fabrication et
installation de presses à granulés bois ou paille - vente aux professionnels - pas de vente aux
particuliers.

Marques : REKA

SYSTEMER SARL

Philippe GONDRY

ZA Sausse

07580 SAINT JEAN LE CENTENIER

Tel : 04 75 36 78 35

www.hargassner.at

Importateur & distributeur des chaudières automatiques HARGASSNER et KÖB. Chaudières
automatiques à bois déchiquetés et granulés de bois

Marques : HARGASSNER, KÖB

SCHMID France sarl

Jean-Claude JOSEPH

Quartier des entrepreneurs - Aire de la Thur - Route de Guebwiller

68840 PULVERSHEIM

Tel : 03 89 28 50 82

Fabrication et installation de process bois Gamme de puissance : 15 kW à 30 MW Fluide :
Eau chaude, Vapeur, Eau surchauffée etc... Combustible : Plaquettes, écorces, copeaux,
granulés, sciures, DIB

Marques : SCHMID, VECOPLAN

ENERGIE 79

Frédéric HUIGNARD

ZI route de Niort BP 22

79160 COULONGES SUR L'AUTIZE

Tel : 05 49 06 06 60

www.energie79.fr

Constructeur de chaudières à bûches et distributeur de chaudières automatiques pour
collectivités et industries du bois.

Marques : Energie 79, Köb, Palazzetti

ENERGIE SYSTEME

Route Nationale 120

19430 ST JULIEN LE PELERIN

Tél : 05 55 28 70 41

<http://www.energiesysteme.fr>

Fabricant français de chaudières à bûches et à granulés de bois.

HS France

Rue Andersen

F-67870 Bischoffsheim

Tél : 03.88.49.27.57

Fax : 03.88.50.49.10

Fabricant français de chaudières bois (bûches, granulés de bois, bois déchiqueté) et céréales
(blé, orge, colza)

<http://www.hsfrance.com>

Perge Chaudières

BP 07 26801

Portes-lès-Valence Cedex

Tél : 04 75 57 19 11

Fabriquant de chaudières à granulés de bois et d'autres types de granulés

<http://www.perge.fr>

CHAROT

Fabrique des Chaudières à bois, paille ou déchets pour le chauffage et la production d'eau chaude par accumulation fonctionnent avec tout type de combustible solide (paille, bûches, écorces, chutes de bois, papiers, carton, déchets) pour habitation, ferme, étable, serre

3, rue Industrie

ZI des Sablons BP166

89101 Sens Cedex

Tél : 03.86.64.73.73

<http://www.charot.com>

Agriculture Energie Biomasse

Benjamin Le Gall

benjamin.legall@methafrance.fr

Telephone : +33 (0) 296 346 675

Fax : +33 (0) 296 346 835

Commercialise les chaudières SWEBO

Voir aussi

http://www.asder.asso.fr/httpdocs/IMG/pdf/Distributeurs_chaudières_automatiques-2.pdf

ANNEXE 2 - Analyses des échantillons de fumier

Origine		Biarritz	Jeugny	Lamotte Beuvron	Chatenay Malabry	Paris 16ème	Sèvres	Tous les échantillons			Sans l'échantillon n° 6			
Etablissement		Centre hippique Biarritz	Les écuries de Jeugny	Parc équestre fédéral	Haras de Saint-Leu	Hippodrome d'Auteuil	Poney club de Brimbordon							
Litière		Copeaux (prolyte)	Paille	Paille	Copeaux	Paille	Paille							
Date		21-mars	27-mars	31-mars	01-avr	02-avr	03-avr							
Analyse agronomique		Unité	Fumier 1	Fumier 2	Fumier 3	Fumier 4	Fumier 5	Fumier 6	Moy	Mini	Maxi	Moy	Mini	Maxi
Humidité	%	62,1	71,9	56,6	73,8	16,8	70,4	58,6	16,8	73,8	67	56,6	73,8	
Matière Sèche	% PB	37,9	28,1	43,5	26,3	83,2	29,6	41,4	26,3	83,2	33,1	26,3	43,5	
Matière Organique	% MS	86,6	86,3	75,3	75,5	92,8	80,4	82,8	75,3	92,8	80,8	75,3	86,6	
	% PB	32,8	24,3	32,7	19,8	77,2	23,8	35,1	19,8	77,2	26,7	19,8	32,8	
C-organique	g/kg de MS	433	432	377	377	464	402	414	377	464	404,2	377	433	
pH		7,8	7,6	7,2	8,3	6,2	7,9	7,5	6,2	8,3	7,8	7,2	8,3	
Conductivité	mS.cm-1	2,8	3	2,6	4,5	2,6	4,7	3,4	2,6	4,7	3,5	2,6	4,7	
Azote global	g/kg de MS	10,7	11,3	10,4	15,4	7,6	11,9	11,2	7,6	15,4	11,9	10,4	15,4	
Azote organique	g/kg de MS	9,3	11,3	9,4	11,5	7	9,2	9,6	7	11,5	10,1	9,2	11,5	
Azote ammoniacal	g/kg de MS	1,2	<0.01	1	4	0,6	2,7	1,9	<0.01	4	2,2	1	4	
Azote nitrique	g/kg de MS	1,66	<0.003	<0.003	0,037	0,016	<0.003	0,6	<0.003	1,7	0,8	0,037	1,7	
Phosphore	g/kg de MS	8,7	6,8	7,45	10,3	2,3	8,7	7,4	2,3	10,3	8,4	6,8	10,3	
Potassium	g/kg de MS	18,1	28,6	17,3	26,6	16,4	28,9	22,7	16,4	28,9	23,9	17,3	28,9	
Magnésium	g/kg de MS	4,1	3,1	3,54	4,6	1,44	3,37	3,4	1,4	4,6	3,7	3,1	4,6	
Calcium	g/kg de MS	22,7	19,9	14,5	20	10,4	17,2	17,5	10,4	22,7	18,9	14,5	22,7	
C / N		40,6	38,2	36,2	24,5	61	33,8	39,1	24,5	61	34,7	24,5	40,6	
C / Norg		46,6	38,3	40,2	32,9	65,9	43,7	44,6	32,9	65,9	40,3	32,9	46,6	

Origine	Biarritz	Jeugny	Lamotte Beuvron	Chatenay Malabry	Paris 16ème	Sèvres							
Etablissement	Centre hippique Biarritz	Les écuries de Jeugny	Parc équestre fédéral	Haras de Saint-Leu	Hippodrome d'Auteuil	Poney club de Brimbordon	Tous les échantillons			Sans l'échantillon n° 6			
Litière	Copeaux (prolyte)	Paille	Paille	Copeaux	Paille	Paille							
Date	21-mars	27-mars	31-mars	01-avr	02-avr	03-avr							
Innocuité éléments traces métalliques	Unité	Fumier 1	Fumier 2	Fumier 3	Fumier 4	Fumier 5	Fumier 6	Moy	Mini	Maxi	Moy	Mini	Maxi
Chrome	mg/kg de MS	10	22,1	10	7,8	3,1	5,8	9,8	3,1	22,1	11,1	5,8	22,1
Cuivre	mg/kg de MS	92	12,4	22,5	40,6	4,3	15,3	31,2	4,3	92,0	36,6	12,4	92,0
Nickel	mg/kg de MS	3,7	8,5	4,5	4,4	1,5	2,8	4,2	1,5	8,5	4,8	2,8	8,5
Zinc	mg/kg de MS	125	63,9	120	116	11,0	47,2	80,5	11,0	125,0	94,4	47,2	125,0
Cadmium	mg/kg de MS	< 0,11	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.06	< 0.15	-	-	-			
Plomb	mg/kg de MS	25,8	< 2.7	< 2.7	< 2.7	< 1.6	< 4.0	-	-	-	25,8	25,8	25,8
Mercuré	mg/kg de MS	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.10	< 0.06	< 0.1	-	-	-			
Sélénium	mg/kg de MS	0,6	< 0.4	< 0.4	0,9	0,3	0,6	-	-	-	0,7	0,6	0,9
Arsenic	mg/kg de MS	< 0.9	< 0.9	< 0.9	< 0.9	< 0.5	< 1.2	-	-	-			
Critères microbiologiques													
Salmonelles	/25g MB	absence	absence	absence	absence	absence	absence	-	-	-			
Œufs d'helminthes viables	/1.5g MB	absence	absence	absence	absence	absence	absence	-	-	-			

Origine	Biarritz	Jeugny	Lamotte Beuvron	Chatenay Malabry	Paris 16ème	Sèvres	Tous les échantillons	Sans l'échantillon n° 6
Etablissement	Centre hippique Biarritz	Les écuries de Jeugny	Parc équestre fédéral	Haras de Saint-Leu	Hippodrome d'Auteuil	Poney club de Brimborion		
Litière	Copeaux (prolyte)	Paille	Paille	Copeaux	Paille	Paille		
Date	21-mars	27-mars	31-mars	01-avr	02-avr	03-avr		

TEST DE COMPOSTABILITE

Espace lacunaire	Unité												
Masse volumique	g/L	297,0	131,0	58,0	418,0	14,0	109,0	171,2	14,0	418,0	202,6	58,0	418,0
Espace lacunaire sans compression	%	70,0	90,0	97,0	59,0	96,0	88,0	83,3	59,0	97,0	80,8	59,0	97,0
Espace lacunaire pour 3 m de hauteur d'andain	%	42,0	30,0	48,0	27,0	68,0	28,0	40,5	27,0	68,0	35,0	27,0	48,0
Espace lacunaire à compression maximale	%	40,0	26,0	28,0	25,0	21,0	22,0	27,0	21,0	40,0	28,2	22,0	40,0
Hauteur maximum (pour 35%)	m	>3	2,0	>3	1,5	>3	2,0	1,8	1,5	2,0	1,8	1,5	2,0

Respirométrie

Taux de dégradation aérobie à 60 jours :	% MO	11	56	46	29	46	47	39,2	11,0	56,0	37,8	11,0	56,0
	% PB	24	25		26	39	45	31,8	24,0	45,0	30,0	24,0	45,0
Aération moyenne journalière	Unité												
Jour 0 à jour 4	m3 d'air/tonne PB.j	20	34	30	52	20	45	33,5	20,0	52,0	36,2	20,0	52,0
Jour 5 à jour 7	m3 d'air/tonne PB.j	15	24	20	37	14	32	23,7	14,0	37,0	25,6	15,0	37,0
Jour 8 à jour 10	m3 d'air/tonne PB.j	12	20	16	31	12	26	19,5	12,0	31,0	21,0	12,0	31,0
Jour 11 à jour 30	m3 d'air/tonne PB.j	8	12	9	19	7	15	11,7	7,0	19,0	12,6	8,0	19,0
Jour 31 à jour 60	m3 d'air/tonne PB.j	4	3	2	6	3	4	3,7	2,0	6,0	3,8	2,0	6,0

TEST DE POTENTIEL METHANOGENE

Détermination	Unité												
Production de biogaz :	Nm3 / to PB	18,0	72,0	89,0	18,0	186,0	50,0	72,2	18,0	186,0	49,4	18,0	89,0
	Nm3 biogaz / to MO	56,0	285,0	236,0	83,0	265,0	207,0	188,7	56,0	285,0	173,4	56,0	285,0
Potentiel méthanogène :	Nm3 CH4 / to MO	43,0	190,0	148,0	59,0	168,0	145,0	125,5	43,0	190,0	117,0	43,0	190,0
Teneur en CH4 finale :	%	54,0	67,0	63,0	71,0	63,0	70,0	64,7	54,0	71,0	65,0	54,0	71,0