



Etude bibliographique sur la combustion de produits issus de cultures annuelles (blé, paille, maïs)

Mars 2006

ADEME



Agence de
l'Environnement
et de la Maîtrise
de l'Energie

Responsables du suivi de l'étude :

MM L. BODINEAU et J-C POUET
ADEME
Direction des énergies renouvelables, des
Réseaux et des Marchés énergétiques
2, square La Fayette
BP 90406 – 49004 Angers cedex 01

SOMMAIRE

1. CONTEXTE D'INTERVENTION	5
1.1. LE CONTEXTE	5
1.2. OBJECTIFS ET PERIMETRE	7
1.3. METHODOLOGIE SUIVIE	7
2. LES COMBUSTIBLES	9
2.1. LES CARACTERISTIQUES COMMUNES	9
2.2. LES GRAINS DE CEREALES	10
2.2.1. Composition	10
2.2.2. Caractéristiques des combustibles	11
2.3. LES PAILLES DE CEREALES	12
2.3.1. Au Danemark	12
2.3.2. En France	13
2.3.3. Composition	13
2.3.3.1. <i>Composition moyenne de la paille</i>	13
2.3.3.2. <i>Composition moyenne des cendres</i>	14
2.3.4. Lavage de la paille	15
2.3.5. Formes des combustibles paille	15
2.3.6. Granulés de paille	16
2.4. PRODUCTION, RENDEMENT	17
2.5. LES « AGROPELLETS »	17
3. LA COMBUSTION DE CEREALES	19
3.1. PRODUCTION DE MACHEFER	19
3.2. CORROSION	20
3.3. EMISSIONS	22
3.3.1. La réglementation Européenne	22
3.3.1.1. <i>Les Grandes Installations de Combustion (GIC)- Directive 2001/80/CE</i>	22
3.3.1.2. <i>Les ICPE - Arrêté du 25 juillet 1997- Petites Installations de combustion</i>	23
3.3.1.3. <i>La norme EN 303.5</i>	23
3.3.1.4. <i>Point sur les dioxines</i>	25
3.3.2. Le point sur les seuils limites d'émissions existants au Danemark, en Autriche, Allemagne et Suède	25
3.3.3. Résultats de tests d'émissions réalisés par le Danish Technological Institute sur des chaudières à céréales de petite puissance	26

3.3.4.	Résultats de tests d'émissions réalisés en Allemagne (Carmen / LfU)	28
3.3.4.1.	<i>Résultats de tests réalisés sur des chaudières de 4 à 25 kW :</i>	28
3.3.4.2.	<i>Résultats de tests réalisés sur trois installations de 600 à 11 000 kW (source LfU)</i>	28
3.4.	L'ALLUMAGE	31
3.5.	CENDRES	31
3.6.	RESUME DES PRINCIPAUX ENJEUX	33
4.	LES EQUIPEMENTS DISPONIBLES SUR LE MARCHE FRANÇAIS	34
4.1.	ENERGIE SYSTEME	34
4.2.	REKA	35
4.3.	COMPTE R	36
4.4.	HS	37
4.5.	VETO	39
4.6.	ECOTECH	40
4.7.	VERNER	41
4.8.	VIADRUS	42
4.9.	ARCA	43
4.10.	BENEKOV	44
4.11.	HEIZOMAT	45
5.	RETOURS D'EXPERIENCE	46
5.1.	EXPERTS	46
5.2.	CONSTRUCTEURS	47
6.	RECOMMANDATIONS	49
6.1.	RECOMMANDATIONS TECHNIQUES	49
6.1.1.	Alimentation – Approvisionnement	49
6.1.2.	Local dédié	49
6.1.3.	Installateurs	49
6.1.4.	Réutilisation des cendres	50
6.1.5.	Nuisances olfactives	50
6.1.6.	Sonde fumée et sonde oxygène	50
6.1.7.	Nettoyage automatique	50
6.1.8.	Grilles fixes / grilles mobiles	50
6.1.9.	Mâchefers	51
6.1.10.	Corrosion	51
6.2.	RECOMMANDATIONS A L'ADEME	52

BIBLIOGRAPHIE	54
ANNEXES	56
A.1 Equivalences énergétiques	56
A.2 Schémas des chaudières des différents constructeurs	57
A.3 Entretien avec M.Rönnbäck du SP Swedish Testing & Research Institute	63
A.4 Entretien avec Bengt-Erik Löfgren d'ÅFAB – Résumé	65
A.5 Statistiques agricoles annuelles (SAA) – AGRESTE	73

1. CONTEXTE D'INTERVENTION

1.1. LE CONTEXTE

Chaque crise pétrolière, guerre du Golfe au début des années 90, flambée du baril à 60 \$ ces derniers jours, rappelle brutalement la nécessité de maintenir une certaine indépendance énergétique. Certaines sources d'énergie sont effectivement appelées à disparaître. Ainsi, tandis que les réserves mondiales de gaz seraient amenées à s'épuiser d'ici une soixantaine d'années, celles de pétrole sont estimées à environ quarante années seulement. Parallèlement, les besoins en énergie ne cessent de croître, compte tenu du développement économique et démographique mondial.

Parallèlement, au niveau du secteur agricole, deux éléments relativement récents conduisent les agriculteurs à envisager de plus en plus à une utilisation de leurs céréales à des fins non-alimentaires :

1. L'adoption, le 26 mars 2001, du Règlement Européen autorisant les agriculteurs à cultiver sur jachère des céréales et oléagineux pour chauffer leur exploitation et pour y produire des bio-combustibles ou de l'énergie ;
2. L'accroissement des quantités de céréales déclassées. Plusieurs raisons peuvent entraîner le déclassement des céréales comme :
 - a. de mauvaises conditions climatiques (une gelée anormale survenant pendant le développement des grains peut entraîner une importante teneur en grains verts et gelés et un poids trop faible des grains ; un automne frais humide peut entraîner des dommages dus à la germination et au mildiou) ;
 - b. une composition non conforme aux exigences de la classe (par exemple mélange non conforme de variétés de céréales différentes), un trop grand excédent de production. Par exemple, les excédents de blé produits peuvent être déclassés et utilisés en fourrager ou pour de la valorisation énergétique ;
 - c. le durcissement des normes européennes en vigueur telles que celle sur les mycotoxines¹. Depuis 2001, le règlement (CE) no 466/2001² fixe des teneurs maximales en mycotoxines pour divers aliments, et notamment les céréales. Le règlement (CE) no 856/2005³ de la Commission du 6 juin 2005 modifie et durcit ce règlement. Ce dernier entrera en vigueur à partir du premier juillet 2006 (2007 pour le maïs). En ce qui concerne le blé dur et l'avoine bruts, la teneur maximale en mycotoxines ne devra pas dépasser 1750 µg/kg. De ce fait, une plus grande quantité de céréales va se trouver déclassée pour la consommation humaine, voire animale et ainsi devenir disponible pour une valorisation énergétique.

¹ Mycotoxines : Les mycotoxines sont des toxines élaborées par diverses espèces de champignons microscopiques (radical myco = champignons), comme par exemple le fusarium. Elles peuvent présenter un risque pour la santé humaine ou animale par absorption, inhalation ou contact cutané. Des effets hépatotoxiques, neurotoxiques, mutagènes, tératogènes, cancérigènes et immunosuppresseurs ont été prouvés expérimentalement chez l'animal. Ce risque est encore mal connu, mais il est de plus en plus pris en compte.

² Cf. : <http://europa.eu.int/eurlex/lex/LexUriServ/site/fr/consleg/2001/R/02001R0466-20010405-fr.pdf>

³ Cf. http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=FR&numdoc=305R0856

Dans ce contexte il n'est pas étonnant qu'une demande de plus en plus pressante, en provenance du monde agricole notamment, mais aussi, plus largement des décideurs locaux (cf. extrait de Mr Bailly dans l'encadré ci-dessous) se fasse entendre en faveur du développement de la production d'énergie à partir de céréales.

*Intervention de Mr G. BAILLY (Sénateur du Jura) en deuxième lecture du projet de loi d'orientation sur l'énergie -amendement « Bailly » visant à modifier la définition des énergies renouvelables : «Cet amendement vise à souligner l'intérêt de l'utilisation des céréales pour développer les énergies renouvelables, sachant qu'il existe en France 1,2 millions d'hectares de jachères. Je n'ai rien contre le bois et je défendrai, plus loin, un amendement à ce sujet. **Mais il existe aussi dans mon département des expériences très positives de chaufferies aux céréales.** Le grain utilisé peut être du maïs, de l'orge, du blé non panifiable...autant dire que l'on touche là à une source d'énergie abondante. [...] ».*

Ce développement ne pourra se faire avec succès qu'à condition d'une **meilleure connaissance des émissions liées à la combustion de ce type de combustibles** et à **l'utilisation de matériel** (poêles, chaudières) **adapté.**

1.2. OBJECTIFS ET PERIMETRE

L'étude vise à la réalisation d'une revue technique sur la combustion de produits issus de cultures annuelles, blé, paille et maïs essentiellement, pour la production de chaleur. Deux types principaux d'installations font partie du périmètre d'étude : les installations de chauffage à la ferme, habituellement dans des gammes de puissance allant de 5 à 100 kW et les installations urbaines de plus grande puissance pour production de chaleur (1 à 8 MW). Les installations de cogénération correspondant à la production simultanée de chaleur et d'électricité ne sont pas étudiées dans le cadre de ce travail.

Elle permet de clarifier les questions relatives à la composition et aux caractéristiques des céréales en comparaison avec d'autres combustibles, de présenter les réglementations en vigueur et les résultats de tests de combustion, de faire le point sur les équipements actuellement disponibles sur le marché français, enfin de proposer des conseils de mise en garde et des recommandations.

1.3. METHODOLOGIE SUIVIE

Cette étude est construite sur deux volets distincts mais complémentaires :

1. Un volet plus « théorique » s'appuyant sur une étude bibliographique, comprenant d'une part, un **recensement** des études, tests en laboratoires, mesures et travaux universitaires pertinents ;

Liste des principales sources bibliographiques retenues pour étude :

Bibliographie	Auteur	Pays
"Heizen mit Getreide" (Chauffage avec les céréales)	C.A.R.M.E.N. (Dr R. Brökeland)	Allemagne
"Biomass combustion and co-firing : an overview"	C.A.R.M.E.N. (Dr R. Brökeland)	Allemagne
"Addressing the constraints for successful replication of demonstrated technologies for co-combustion of biomass/waste"	ÅFAB (Swedish consulting company)	Suède
"Etude d'unités de production d'électricité à partir de biomasse"	Solagro	France
"Etude sur les inserts à alimentation automatique"	La France agricole	France
Utilisation de la biomasse pour des usages non alimentaires	The Centre for Biomass Technology	Danemark
Biomass Projects carried out as part of the DTI's New and Renewable Energy Programme. Volume 5 : Straw, poultry and energy crops as energy sources	Robert Newman / ETSU - DTI	Royaume-Uni
Emission of biomass Combustion plants	LfU (Bavarian State Office for Environmental Protection)	Autriche

2. Un second volet, clairement opérationnel fondé sur des retours d'expériences, des dires d'experts et des points de vue de constructeurs d'équipements dédiés à la combustion de céréales, comprenant les étapes suivantes :
 - ❖ **L'identification** d'experts et de constructeurs de chaudières et l'organisation d'entretiens ;
 - ❖ **L'analyse** et la **synthèse** ;
 - ❖ **La proposition de conseils de mise en garde et de recommandations.**

Liste des experts techniques interviewés :

Centres de recherche, laboratoires, experts	Pays
Biomass Logistics Technology (BLT)	Autriche
The Bavarian State Office for Environmental Protection (LfU)	Autriche
Austrian Bio-Energy	Autriche
Danish Technological Institute	Danemark
Danish Energy Authority	Danemark
Force Technology (ex-Centre for Biomass Technology)	Danemark
FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.)	Allemagne
Carmen	Allemagne
Arvalis	France
Chambre d'Agriculture du Bas Rhin	France
ADEME Bourgogne	France
Swedish National Testing and Research Institute	Suède
AFAB Älvdalens Fastbränsleteknik AB	Suède
SVEBIO (Swedish Bioenergy Association)	Suède
STEM (Agence Suédoise de l'énergie)	Suède
ETSU	Angleterre
International Energy Agency	

Liste des constructeurs de chaudières interviewés (ou leur distributeur en France) :

Fabricants / distributeurs de chaudières	
Arca	Italie
Benekov (Nideck)	République Tchèque
Compte R	France
EcoTec (Teccllem)	Suède
Energie Système	France
Heizomat (Nideck)	Allemagne
HS	Danemark
Reka	Danemark
Verner (Teccllem)	République Tchèque
Veto (FSI Franskan)	Suède
Viadrus (Teccllem)	République Tchèque

2. LES COMBUSTIBLES

On distinguera deux grandes catégories de céréales : les grains de céréales d'une part et les pailles de céréales et céréales « plante entière » d'autre part. En effet, leurs principales caractéristiques et leur composition sont à l'origine de problèmes qui, bien que semblables, diffèrent en proportion.

Une troisième distinction est effectuée en ce qui concerne les « agropellets », granulés composés de grains, paille, tourteau, additifs, ... Ceux-ci sont pour le moment encore au stade de la recherche.

2.1. LES CARACTERISTIQUES COMMUNES

La composition élémentaire du combustible a une influence directe et importante sur le déroulement de la combustion, à savoir l'énergie produite, les dépôts de cendres, les émissions atmosphériques et les mécanismes de corrosion principalement.

La combustion de céréales, grains ou paille, pose des problèmes récurrents qu'il est indispensable de prendre en compte :

- production importante de mâchefer (bloc de silice et de minéraux compacts) ;
- corrosion des éléments constitutifs de la chaudière et de la cheminée due à la présence d'acides dans les fumées ;
- rejets atmosphériques, notamment d'oxydes d'azote (NO_x) et de poussières importants.

Ces trois principales difficultés sont toutes liées à la composition du combustible, qui par ailleurs subit des variations inter et intra espèces importantes (année, localisation, intrants, conditions climatiques, ...).

Le tableau ci-dessous présente les données agrégées que l'on trouve dans la littérature :

		PAILLE		PLANTE ENTIERE		GRAINS		BOIS	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Taux d'humidité	%	10	22	12	15	9	15	25	45
PCI	kWh/kg	4,00	5,19	4,10	4,76	4,01	7,35	3,50	5,39
Carbone (C)	%	42	43			40,18	41,53	50	50
Hydrogène (H)	%	5	6			5,49	5,73	6,00	6,20
Oxygène (O)	%	37	38			40,66	42,25	43	43
Azote (N)	%	0,18	0,84	1,16	1,35	1,65	3,94	0,07	0,49
Soufre (S)	%	0,05	0,27	0,10	0,14	0,10	0,11	0,004	0,05
Chlore (Cl)	%	0,14	0,75	0,18	0,30	0,04	0,09	0,004	0,02
Cendres	%	3,00	6,20	5,24	5,24	1,37	4,60	0,55	1,50
Silice (Si)	%								
Temp. de fusion	°C	800	1273	886	886	687	730	1000	1400

Tableau 1 : Composition de la paille, des céréales, de la plante entière et du bois

Il est intéressant d'effectuer des comparaisons avec le bois, dont la combustion est mieux connue et maîtrisée :

- Les céréales sont plus **sèches** que le bois, ce qui contribue à leur conférer un **pouvoir calorifique** plus élevé ;
- La teneur en **azote** relativement élevée est source de formation d'oxydes d'azote (NO_x) lors de la combustion ;
- La teneur en **soufre** est bien plus élevée que celle du bois, ce qui conduit à la formation d'acide sulfurique (HCl) et d'oxydes de soufre (SO_x) en plus grande quantité lors de la combustion ;
- De même, la teneur en **chlore** est plus élevée, les phénomènes de formation d'acide chlorhydrique seront donc plus importants ;
- Le pourcentage de **cendres** observé, surtout en ce qui concerne la paille, est très élevé : ceci constitue un autre paramètre auquel il est nécessaire de prêter attention afin d'adapter la chaudière en conséquence en ce qui concerne la récupération de ces cendres mais également les émissions de poussières ;
- La **température de fusion des cendres** est plus basse : une plus grande quantité de mâchefer aura tendance à se former lors de la combustion.

La teneur en **silice** des pailles varie entre 0,5 et 2 % en fonction des sols. La teneur du grain est très voisine de celle de sa paille. La silice est à l'origine de la formation de mâchefer.

2.2. LES GRAINS DE CEREALES

En France, les grains de céréales les plus fréquemment utilisés pour la combustion sont ceux de blé et triticales, suivi de ceux d'orge et de maïs. Les grains d'avoine sont, quant à eux, moins fréquemment utilisés pour la production d'énergie.

En 2004 ont été produites en France environ 70 millions de tonnes de grains, dont 36 millions de tonnes de blé tendre et 16 millions de tonnes de maïs en grain (premier producteur de l'UE, cinquième producteur mondial). Nous consommons en France seulement 35 % de notre production de céréales (dont 50 % en alimentation animale). Les 65 %⁴ restants sont donc exportés et constituent une ressource possible pour une valorisation énergétique.

2.2.1. Composition

Les grains de céréales contiennent principalement :

- des glucides (environ 70 % à 80 %), sous forme d'amidon ;
- des protéines (jusqu'à 15 % pour le blé dur) ;
- des lipides en faible proportion (moins de 5 %), provenant du germe ;
- des sels minéraux.

La graine est entourée d'une cuticule essentiellement constituée de cellulose, le son, qui rend l'allumage difficile lors de la combustion du grain en chaudière.

Sont détaillés ci-dessous la composition élémentaire des grains, leur PCI, leur taux d'humidité et la température de fusion de leurs cendres par espèce :

⁴ Chiffres variables suivant la production annuelle réalisée.

Tableau 2 : Composition de différentes céréales (grains)

		Grains		Avoine		Blé		Colza	
Taux d'humidité	%	9	15			10	15		
PCI	kWh/kg	4,01	7,35	4,28	4,50	4,01	4,72	6,20	7,35
Carbone (C)	%	40,2	41,5			40,18			
Hydrogène (H)	%	5,5	5,7			5,49			
Oxygène (O)	%	40,7	42,2			42,25			
Azote (N)	%	1,7	3,9			1,7	2,3	3,9	
Soufre (S)	%	0,10	0,11			0,103		0,10	
Chlore (Cl)	%	0,04	0,09			0,04			
Cendres	%	1,37	4,60			1,4	2,7	4,6	
Temp. de fusion	°C	687	730			687			

		Froment	Maïs		Orge	Seigle	Triticale			
Taux d'humidité	%		9	15						
PCI	kWh/kg	4,72	4,3	4,4	4,28	4,50	4,10	4,74	4,28	4,70
Carbone (C)	%		41,5							
Hydrogène (H)	%		5,7							
Oxygène (O)	%		40,7							
Azote (N)	%		1,7				1,9	1,7		
Soufre (S)	%						0,11	0,11		
Chlore (Cl)	%						0,09	0,07		
Cendres	%		1,4				2,0	2,1		
Temp. de fusion	°C						710	730		

Source : CARMEN, LNE, Arvalis, La France Agricole, ARENE IDF

2.2.2. Caractéristiques des combustibles

➤ L'**avoine** et l'**orge** (surtout les espèces hivernales) sont bien adaptés à la combustion et sont souvent plébiscités par les constructeurs : en effet, leur culture demande moins d'intrants (notamment intrants azotés) et ils ont un bon pouvoir calorifique.

La combustion de l'avoine produit peu de mâchefer mais plus de cendres ; l'allumage est relativement facile.



Photo 1 : Grains d'avoine

➤ Le **blé** et le **triticale** contiennent beaucoup de silice (environ 40 % du taux de cendres pour le blé), ce qui a comme conséquence la formation d'une quantité plus importante de mâchefer.

La combustion du blé fourrager produit des cendres compactes.

Le blé et le triticale allient une bonne productivité et des exigences modérées en intrants pour les espèces rustiques.

- Le **seigle** a une teneur en chlore élevée : ses fumées sont très corrosives.
 - Le **maïs**, généralement plus humide, a parfois besoin d'être séché avant utilisation pour la combustion.
 - Le **colza** pur est déconseillé car il est très chargé en huile ; il génère beaucoup de saletés et une forte odeur se dégage lors de sa combustion. Son PCI est très élevé, autour de 7 kWh/kg (fioul : 11,8 kWh/kg).
- Le **tourteau de colza** peut être utilisé comme combustible ; le tourteau provient de la trituration de la graine de colza après extraction à froid de l'huile.

2.3. LES PAILLES DE CEREALES



La paille est la partie de la tige de certaines graminées, dites céréales à paille (blé, orge, avoine, seigle, riz), coupée lors de la moisson et rejetée, débarrassée des graines sur-le-champ par la moissonneuse-batteuse sous forme d'andains. La paille est donc la partie résiduelle du battage des céréales. Selon les techniques de moissonnage, la longueur des pailles peut notablement varier, de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres.

2.3.1. Au Danemark

En Europe, le Danemark est le pays le plus avancé en matière de combustion de paille de céréales. Sur les 6 Mt de pailles récoltées, 47 % sont de la paille de blé et un peu plus de 36 % de la paille d'orge de printemps et d'hiver.

En 1996, la superficie de terres céréalières était de 1,55 millions d'hectares pour un rendement de 9,17 millions de tonnes de grain et une production de paille de 6 millions de tonnes.

La production moyenne danoise de paille est de 6,3 millions de tonnes/an mais cette production peut varier de plus ou moins 30 % selon les conditions climatiques.

Sur le total, 10 % ne peuvent pas être récoltées, environ 32 % des pailles sont utilisées pour l'alimentation des animaux, 13 % pour les litières, 7 % pour le chauffage des fermes, 5 % dans les réseaux de chaleur, 6,5 % dans installations de cogénération et de production d'électricité. Le reste, soit environ 30 % correspond au surplus de paille laissé sur les sols.

D'autres pays tels que la Suède, l'Autriche, l'Allemagne et dans une moindre mesure le Royaume-Uni et la Pologne témoignent également d'un certain dynamisme en la matière.

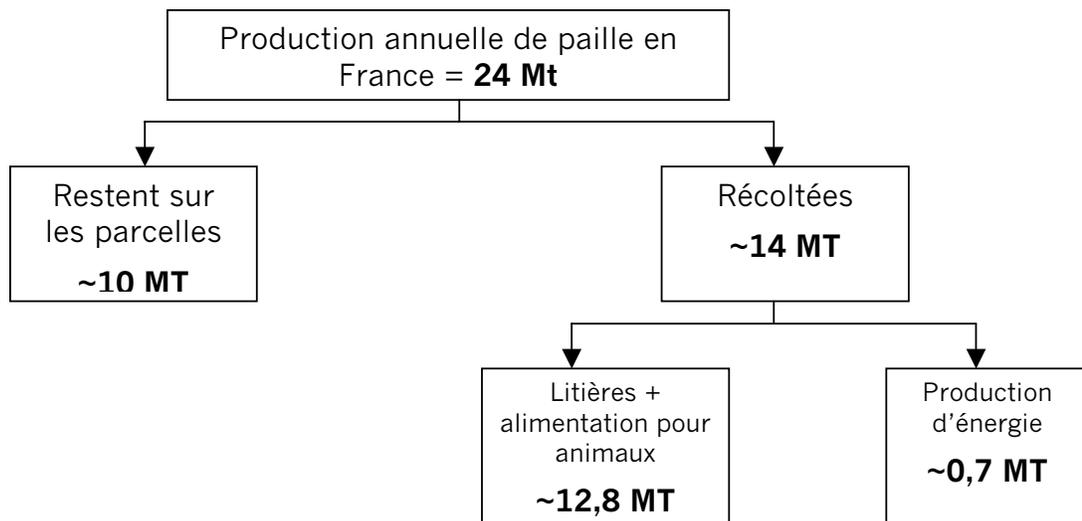
2.3.2. En France

Pour une année moyenne la production française se situe aux environs de 24 millions de tonnes de paille toutes céréales confondues (chiffres de 1998). Environ 40 % des pailles restent sur les parcelles et sont, pour l'essentiel, enfouies ou, dans une moindre mesure, brûlées. L'essentiel (92 %) de la paille récoltée est utilisé comme litière pour les animaux ou pour leur alimentation. La part utilisée pour produire de l'énergie ne représente qu'environ 3 %.

La paille de blé est la plus disponible, devant celle de l'orge et, de très loin, celles des céréales secondaires, triticale, avoine et seigle.

La part commercialisée est relativement faible : environ 18 % de la récolte.

Figure 1 : Répartition de la production de paille en France



2.3.3. Composition

2.3.3.1. Composition moyenne de la paille

Le principal intérêt d'utiliser de la paille est que la combustion de paille est considérée comme neutre du point de vue émissions de CO₂.

La composition moyenne de la paille destinée à une utilisation énergétique est de :

- ❖ 14 à 20 % d'eau ;
- ❖ ~42 à 43 % de carbone ;
- ❖ ~5 à 6 % d'hydrogène ;
- ❖ ~38 % d'oxygène ;
- ❖ Chlore, soufre, alcalins (sodium et potassium).

Cf. tableau 4 page suivante.

Le tableau ci-dessous détaille la composition de pailles de différentes espèces, et présente des moyennes concernant tous types de pailles :

		Paille de céréales		Paille de colza		Paille de blé		Paille d'orge		Paille de maïs	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Taux d'humidité	%	10	22			12	22	12	22	50	70
PCI	kWh/kg	4,00	5,19	4,58	4,80	3,58	4,14	3,33	3,86	0,92	2,00
Carbone (C)	%	42	43								
Hydrogène (H)	%	5	6								
Oxygène (O)	%	37	38								
Azote (N)	%	0,18	0,84	0,84							
Soufre (S)	%	0,05	0,27	0,27							
Chlore (Cl)	%	0,14	0,75	0,47							
Silice (Si)	%	0,5	2								
Cendres	%	3,00	6,20	6,2							
Temp. de fusion	°C	800	1273	1273							

Tableau 3 : Composition de différentes pailles

Selon des références danoises, il est important de noter que les variations de la valeur énergétique entre espèces de céréales sont inférieures aux variations au sein des pailles d'une même espèce, en fonction de l'année et de la localisation de la moisson.

2.3.3.2. Composition moyenne des cendres

Analyse des cendres (en % du poids des cendres)

Tableau 4 : Composition des cendres

en % du poids des cendres	Paille de céréales	Paille de colza	Paille de tournesol
CO ₂	1,3	3,9	29,2
SO ₃	1,5	12,7	1,6
Cl	2,5	9,2	5,1
P ₂ O ₅	4,8	5,1	1,9
SiO ₂	53	7,8	4,8
Fe ₂ O ₃	0,2	0,8	0,4
Al ₂ O ₃	0,3	1,6	0,2
CaO	3,5	22,9	12,5
MgO	1,6	2,5	1,9
Na ₂ O	0,1	6,8	0,2
K ₂ O	12	21	29

Source : Agrice - ADEME

2.3.4. Lavage de la paille

Les caractéristiques de la paille qui a séjourné dans un champ et qui a été exposée à la pluie (« paille grise ») diffèrent de celle de la paille fraîche (« paille jaune ») :

- ☺ PCI légèrement supérieur ;
- ☹ Taux d'azote supérieur (⚠ aux NO_x)
- ☺ Taux de soufre légèrement inférieur
- ☺ Taux de chlore inférieur
- ☺ Taux de cendres légèrement inférieur
- ☺ Point de fusion des cendres supérieur

		Paille jaune		Paille grise	
		10	20	10	20
Taux d'humidité	%				
PCI	kWh/kg	4,00		4,17	
Carbone (C)	%	42		43	
Hydrogène (H)	%	5,00		5,20	
Oxygène (O)	%	37		38	
Azote (N)	%	0,35		0,41	
Soufre (S)	%	0,16		0,13	
Chlore (Cl)	%	0,75		0,20	
Cendres	%	4		3	
Temp. de fusion	°C	1000		1100	

Source : The Centre for Biomass Technology

Tableau 5 : Comparaison paille jaune / paille grise

Pour ces raisons, la paille grise est mieux adaptée à la production d'énergie en chaudière que la paille jaune ; il est donc intéressant de se pencher sur cette transformation (mécanismes, conditions optimales, ...).

Aujourd'hui et après plusieurs expériences de « lavage » de la paille à hautes et faibles températures, il est admis que des températures de 50 à 60 °C sont optimum d'un point de vue économique. La contrepartie du lavage est le séchage puis la lixiviation de la paille induisant des pertes énergétiques représentant environ 8 % du pouvoir calorifique de la paille. Ce surcoût est néanmoins compensé par le rallongement de la durée de vie des chaudières.

2.3.5. Formes des combustibles paille

La paille peut être brûlée sous différentes formes : balles cylindriques, balles parallélépipédiques, paille hachée, granulés de paille. Cette particularité influe sur le type d'installation à laquelle la paille est destinée.

	Paille hachée	Balles cylindriques	Balles parallélépipédiques	Granulés de paille
Dimensions	2-5 cm	1,5*2,5 m	1,2*1,3*2,4 m	6-40*100 mm
Densité de stockage (kg/m ³)	65-80	110-150	150-200	400-600
Aptitude à être transporté	Près	-	++	++
	Loin	--	+	++
Type de chauffage	Foyer à propulsion 1) inférieure 2) supérieure	1) Chauffage avec diviseur à disques 2) Carburateur à paille	1) Brûleur à cigares 2) Chauffage avec diviseur à disques	Installations pour granulés
Gamme de puissance	1) ? 1MW 2) tous secteurs	1) > 500 kW 2) 85 - 400 kW	> 3 MW	? 500 kW
Alimentation du secteur de combustion	continue	en charges	1) continue 2) en charges	continue

Tableau 6 : Caractéristiques de la paille combustible



Photo : Chaudière paille balles entières



Photo : Chaudière paille balles entières

2.3.6. Granulés de paille

Afin de limiter les problèmes de gestion des volumes lors de la combustion de la paille, la transformation de la paille en granulés s'avère un principe intéressant.

En effet, la composition et le comportement des granulés de paille permettent de les rapprocher des grains et des granulés de bois puisqu'elle est riche en cellulose. Certaines différences subsistent : la teneur en silice est plus élevée, et le PCI est un peu moins bon. Cependant, la transformation de la paille en granulés a un certain coût économique et énergétique :

- économique : il faut compter 80 à 100 €/t pour la production de granulés de paille. Si l'on ajoute le prix de la paille en elle-même, le coût final est équivalent à celui des granulés de bois.
- énergétique : il est nécessaire de consommer de l'énergie pour produire ces granulés.

Des difficultés organisationnelles persistent également puisque aucune filière établie n'existe à l'heure actuelle.

Même s'il est possible d'utiliser les chaînes de production de granulés de fourrage, cette solution n'est pas idéale car l'ajout d'éléments extérieurs à ceux déjà utilisés sur la chaîne peut provoquer des risques de salmonelle ; un nettoyage important et coûteux de la chaîne est alors nécessaire si le producteur veut reprendre une autre activité (production d'aliments de fourrage en granulés par exemple). De plus, l'utilisation de ces chaînes de production implique que les granulés aient le même diamètre que les granulés destinés au fourrage, c'est-à-dire un peu petits.

Il semble que le diamètre optimum de ces granulés soit de 8 à 10 mm. Afin d'obtenir des granulés conformes aux contraintes environnementales et financières, une étude suédoise montre qu'il est intéressant d'ajouter du tourteau de colza qui permet d'une part d'agglomérer les granulés et d'autre part de lubrifier la machine.



Photo 2 : Agropellets

L'expérience acquise au Danemark montre que ces granulés d'un diamètre de 8 à 10 mm peuvent être utilisés dans des chaudières d'une certaine puissance mais pas dans des chaudières de petites puissances où ils engendrent des problèmes de cendres et de scorification.

2.4. PRODUCTION, RENDEMENT

	Blé plante entière		Triticale plante entière		Orge plante entière	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Production (t de MS/ha, récoltée à 10 cm du sol)	8	15	8	16	5	10
Humidité (%)	12	15	12	15	12	15
Production de paille (t de MS/ha)	4	9	6	11	3	7
Production de grains (q/ha)	60	100	60	100	40	70

Source : Agrice - ADEME

Tableau 7 : Production de différentes céréales

La production récoltable estimée de paille de colza = 2t/ha.

2.5. LES « AGROPELLETS »

Les agropellets sont des granulés composés de grains de céréales et de déchets agricoles divers (« sous produits » de la récolte : graines portées par le vent, son, paille, fanes...). Pour le moment au stage de la recherche, ils représentent une évolution intéressante en ce qui concerne les combustibles issus de cultures annuelles.

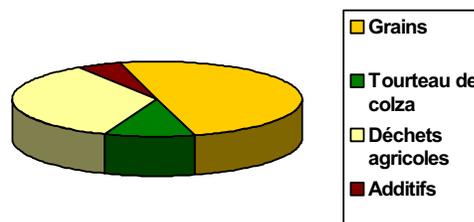


Figure 2 : Constitution d'un agropellet : exemple

Leurs avantages sont techniques ... :

- leur densité est deux fois plus importante que les grains, ce qui implique une production d'énergie double pour le même poids ;
- le transport est facilité ;
- le combustible est homogène, constant et sa composition est maîtrisée ; étant données les importantes variations induites lors de l'utilisation de céréales d'espèces différentes ou même d'une même espèce, cet avantage est majeur.

... et stratégiques :

- si leurs caractéristiques sont les mêmes que celles de granulés de bois, ils pourront être utilisés dans les chaudières bois (technologies et marché existants) ;
- un tel combustible pourra beaucoup plus facilement être utilisé par tous et non être confiné dans la sphère agricole.

Les freins actuels au développement des ces agropellets sont essentiellement de deux types :

- organisationnel : la filière de production est inexistante à l'heure actuelle ;
- financier : l'utilisation d'agropellets n'est intéressante que si le coût final du produit est inférieur ou égal au prix des granulés de bois. Pour un agropellet composé, par exemple, d'environ 50 % de grains, 10 % de tourteau de colza, 40 % de déchets agricoles et d'additifs, et étant donné que le tourteau de colza est légèrement plus cher que les grains, eux-mêmes plus chers que les granulés de bois, il faudrait alors que l'acquisition des déchets agricoles soient rémunérée pour obtenir un prix final de l'agropellet au maximum égal à celui des granulés de bois.

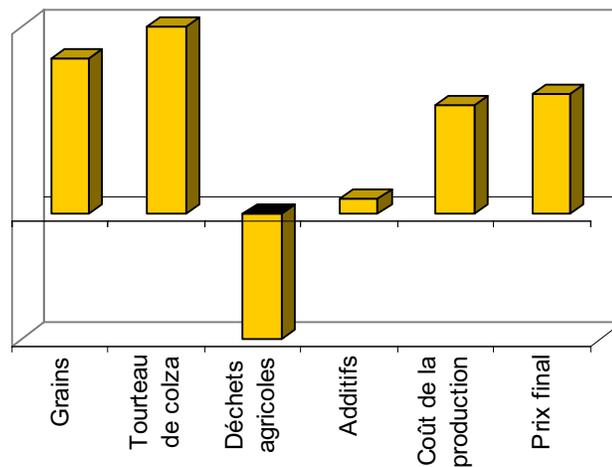


Figure 3 : Prix des éléments constitutifs d'un agropellet

Il est intéressant d'intégrer le tourteau de colza aux agropellets, car puisqu'il contient encore 12 à 17 % d'huile, le PCI du combustible obtenu est augmenté, la durée de vie des équipements utilisés lors de la combustion est allongée et l'allumage est facilité. Un inconvénient important est sa forte teneur en soufre.

En ce qui concerne les déchets agricoles, non valorisés (à l'exception d'une partie de la paille produite), cette filière pourrait être une solution intéressante de valorisation.

Enfin, l'énergie nécessaire à la production de ces agropellets est de l'ordre de 5 % du PCI des grains, ce qui représente une perte faible.

3.LA COMBUSTION DE CEREALES

La combustion de céréales présente des particularités dues notamment à leur composition ; celles-ci sont communes pour les grains, la paille et la plante entière bien que variant en proportion.

Une utilisation optimale des céréales comme combustible doit prendre en compte les trois grandes problématiques suivantes :

- la production de mâchefer ;
- les phénomènes de corrosion ;
- les émissions atmosphériques.

D'autres difficultés plus mineures, comme l'allumage, doivent être également étudiées. L'occurrence de ces problèmes est en partie due au processus de combustion en lui-même, mais résulte également de la composition des céréales.

3.1. PRODUCTION DE MACHEFER

Le mâchefer, composé de blocs de silice et de minéraux compacts, se forme lors de la fusion des cendres. C'est pourquoi un point de fusion bas sera problématique. Ces blocs risquent d'étouffer la combustion et de boucher l'évacuation des cendres s'ils s'accumulent.



Photo 3 : Bloc de mâchefer

	°C	PAILLE		PLANTE ENTIERE	GRAINS		BOIS	
		Min.	Max.		Min.	Max.	Min.	Max.
Temp. de fusion des cendres		800	1273	886	687	730	1000	1400

Tableau 8 : Température de fusion des cendres

Le point de fusion des cendres de grains de céréales étant le plus bas, c'est avec ce type de combustible que la formation de mâchefer sera la plus importante. Des experts suédois nous ont signalé que le point de fusion des cendres de l'avoine et de l'orge était parmi les plus élevés en ce qui concerne les grains. D'autre part, la combustion de blé ou de triticale a tendance à produire une quantité importante de mâchefer.

La présence et la quantité de mâchefer varient selon la qualité et l'origine géographique des céréales. Les céréales issues de sols acides engendrent

d'importantes quantités de mâchefers tandis que la combustion de certaines céréales cultivées sur des sols calcaires peut ne causer aucun problème.

Afin de limiter la formation de ces mâchefers, plusieurs solutions sont possibles :

- ⇒ **Diminuer la température de combustion** afin de ne pas dépasser le point de fusion des cendres ; ceci est très délicat puisque seul le design de la chambre de combustion et du brûleur influe sur ce paramètre. Une autre possibilité est de refroidir à l'eau le secteur de combustion. Cependant, une température trop basse peut empêcher le bon déroulement de la combustion ; certains experts recommandent une température minimum de 1000°C.
- ⇒ Ajouter un **additif** tel que la chaux vive (1 à 2 %) lors du stockage pour augmenter le point de fusion des cendres : le rapport des teneurs en calcium et en potassium est ainsi modifié, ce qui permet d'éviter la fusion de la cendre (cette solution est encore à l'étude) ;
- ⇒ Utiliser les combustibles comportant le **moins de silice** possible ;
- ⇒ **Remuer** régulièrement les cendres.

Comme cela est détaillé plus loin dans le paragraphe sur les équipements, certaines chaudières n'ont aucun dispositif particulier en ce qui concerne les mâchefers ; la majorité ont simplement un système d'évacuation des cendres un peu plus conséquent que pour le bois ou un dispositif permettant de secouer les cendres.

3.2. CORROSION

La présence dans les céréales de soufre (S) et de chlore (Cl) en grande quantité a comme conséquence la formation d'acide sulfurique (H_2SO_4) et d'acide chlorhydrique (HCl) lors de la combustion. De l'acide nitrique (HNO_3) se forme également, de manière moins importante.

		PAILLE		PLANTE ENTIERE		GRAINS		BOIS	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Azote (N)	%	0,18	0,84	1,16	1,35	1,65	3,94	0,07	0,49
Soufre (S)	%	0,05	0,27	0,10	0,14	0,10	0,11	0,004	0,05
Chlore (Cl)	%	0,14	0,75	0,18	0,30	0,04	0,09	0,004	0,02

Tableau 9 : Teneurs en azote, soufre et chlore

Ces différents acides sont évacués dans les fumées ; si le point de rosée⁵ acide de ces fumées est atteint lors de l'échange de chaleur ou dans le conduit d'évacuation des fumées, la condensation de ces acides va provoquer des problèmes de corrosion. Dans les cas les plus graves, les dégâts occasionnés peuvent conduire à la formation de trous dans les différents éléments de la chaudière en contact avec les fumées.

Pour réduire les risques de corrosion, plusieurs solutions à mettre en place seules ou couplées sont envisageables :

⁵ point de rosée = température de condensation

- ⇒ Maintenir la **température des fumées** au-dessus du point de rosée acide ; les pertes de chaleur par les fumées sont alors augmentées ce qui provoque une diminution du rendement de la chaudière ;
- ⇒ Utiliser des **matériaux résistants** à l'action des acides, comme la céramique (notamment pour la construction du conduit de cheminée) ;
- ⇒ Ajouter des **additifs** comme le bicarbonate de soude (NaHCO_3) afin de piéger le chlore et le soufre avant qu'ils ne réagissent avec l'hydrogène et l'oxygène de l'air et forment des acides. En effet, le bicarbonate de soude gonfle sous l'effet de la chaleur et rend poreuses les cendres formées ; le chlore et le soufre se retrouvent alors piégés dans les cendres. Des tests réalisés par Åfäb et Svenska Foder ont démontré que presque 90 % de l'acide sulfurique et 70 % de l'acide chlorhydrique pouvaient être confinés dans les cendres situées au bas de la chaudière sous forme de soufre et de chlore de cette manière. Les cendres peuvent ensuite être réutilisées comme engrais, le soufre et le chlore étant souvent ajoutés aux engrais en cas de carence du sol en ces éléments. Le risque de production de dioxine est également réduit.

Les deux premières alternatives sont les plus utilisées mais les moins satisfaisantes : les acides sont rejetés dans la nature où ils finissent par se condenser. Le problème n'est donc que déplacé. Cependant, pour une installation isolée de petite puissance, les concentrations en acides ne sont pas suffisantes pour poser un réel problème environnemental.

L'ajout d'additif est encore au stade expérimental mais semble d'ors et déjà montrer des résultats intéressants et pourrait constituer la solution future aux problèmes de corrosion.

3.3. EMISSIONS

3.3.1. La réglementation Européenne

En ce qui concerne la réglementation relative aux émissions atmosphériques liées à la combustion de céréales, la situation est différente selon la capacité nominale des installations.

1. Pour les installations de combustion dont la puissance est supérieure à 20 MW, la réglementation en vigueur est celle des Grandes Installations de Combustion (GIC), c'est à dire de la Directive 2001/80/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 octobre 2001.
2. L'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) définit des limites d'émission pour les installations dont la capacité est comprise entre 2 et 20 MW.
3. Il n'existe pas de réglementation pour les installations de combustion de petite et moyenne puissance (< 2 MW). Seuls les seuils indiqués dans la norme européenne EN 303.5 pour les chaudières de puissance inférieure ou égale à 300 kW sont utilisés comme référence pour les petites unités, bien que ne s'appliquant pas aux chaudières à céréales.

3.3.1.1. Les Grandes Installations de Combustion (GIC)- Directive 2001/80/CE

Cette directive s'applique aux installations de combustion, quel que soit le combustible utilisé, dont la puissance thermique nominale est égale ou supérieure à 50 mégawatts.

La directive vise à réduire par étapes :

1. les émissions annuelles de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote en provenance des installations existantes (c'est à dire les installations pour lesquelles l'autorisation administrative est antérieure au 1^{er} juillet 1987)
2. et à fixer des valeurs limites d'émission pour le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote et les poussières dans les cas d'installations nouvelles à partir du 1^{er} janvier 2008 (sauf cas particuliers).

Les valeurs limites des nouvelles installations biomasse sont indiquées dans le tableau suivant et sont exprimées en mg/Nm³ à 6 % d'O₂.

	50 à 100 MWth	100 à 300 MWth	300 à 500 MWth	> 500 MWth
SO ₂	200	200	200	
NO _x	400	300	200	
Poussières	50	30		

3.3.1.2. Les ICPE - Arrêté du 25 juillet 1997- Petites Installations de combustion

L'arrêté du 25 juillet 1997 s'applique aux installations dont la puissance thermique maximale est supérieure à 2 MW mais inférieure à 20 MW qui consomment exclusivement, seul ou en mélange, du gaz naturel, des gaz de pétrole liquéfiés, du fioul domestique, du charbon, des fiouls lourds ou de la biomasse.

Les limites de rejet en concentration sont exprimées en milligrammes par mètre cube (mg/m^3) sur gaz sec, la teneur en oxygène étant ramenée à 6 % en volume dans le cas des combustibles solides, 3 % en volume pour les combustibles liquides ou gazeux et 11 % en volume pour la biomasse.

La puissance P correspond à la somme des puissances des appareils de combustion sous chaudières qui composent l'ensemble de l'installation."

Type de combustible		Oxydes de soufre en équivalent SO_2	Oxyde d'azote NO_x	poussières			CO	COVNM
				P < 20 MW	P < 20 MW	P < 4 MW		
Biomasse (mg/m^3 à 11 % d' O_2)	Existante	200	750	150 (1)	150 (1)	150 (1)	Pas de VLE	Pas de VLE
	Nouvelle		500	150 (2) /100	150 (2) /100	150 (2) / 50 (3)	250	50

Chaudières existantes (déclarées avant le 1er janvier 1998)

Nouvelles chaudières (déclarées depuis le 1er janvier 1998)

(1) applicable au plus tard le 01/01/2005

(2) Si P < ou = 4 MW et hors agglomération > 250 000 hab.

(3) A partir du 01/01/2000 et si dans agglomération > 250 000 hab et P > 10 MW

Les concentrations en monoxyde de carbone (exprimée en CO) et en composés organiques volatils hors méthane (COVNM) ne doivent pas dépasser respectivement $250 \text{ mg}/\text{m}^3$ et $50 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Dans le cas d'une installation située en dehors des zones définies à l'article 6.2.9 et si la puissance totale des chaudières consommant de la biomasse n'excède pas 4 MW, la limite de rejet en poussières, applicable aux appareils de combustion utilisant ce combustible, est fixée à $150 \text{ mg}/\text{m}^3$ quelle que soit la puissance totale de l'installation.

Pour les **installations situées en agglomération de plus de 250 000 habitants**, la valeur limite de rejet pour les **poussières** des installations dont la puissance totale est supérieure à 10 MW est fixée à **$50 \text{ mg}/\text{m}^3$** (à l'exception des chaudières utilisant un combustible gazeux).

3.3.1.3. La norme EN 303.5

Cette norme s'applique aux chaudières de puissance inférieure ou égale à 300 kW, fonctionnant à partir de combustibles solides :

- bois (bûches, copeaux, briquettes, sciures)
- houille, lignite, coke ou anthracite.

La norme EN 303.5 ne concerne donc pas les chaudières fonctionnant à partir de céréales.

La norme EN NF 303.5 définit des exigences concernant la construction, la sécurité, la conception et les exigences de performances de la chaudière, qui permettent ainsi de caractériser et d'évaluer le fonctionnement de la chaudière :

- Exigences de construction : ces exigences portent notamment sur les matériaux utilisés lors de la fabrication de l'appareil, et sur les contrôles de fabrication.
- Exigences de sécurité et de conception : différents paramètres doivent être vérifiés, en particulier le fonctionnement des thermostats de régulation et de sécurité de la chaudière, les températures de surface de l'appareil et la capacité du cendrier de l'appareil.
- Exigences de performances : les performances de l'appareil sont caractérisées en particulier par le rendement et les émissions dans les produits de combustion, la puissance utile minimale, l'autonomie.

Les exigences de performances décrites par la norme sont réparties en trois classes (classe 1 à 3, respectivement du moins au plus performant) et concernent le rendement, le tirage et les émissions de CO, COV (composé organique volatile correspondant à des imbrûlés) et poussières. Pour satisfaire aux exigences d'une classe, toutes les limites de rendement et d'émissions (émissions de CO, d'imbrûlés gazeux CnHm et poussières) de cette classe doivent être respectées. Les seuils définis pour caractériser le rendement de l'appareil et les émissions sont précisés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1 : Rendement de la chaudière

Classe	Rendement (%)
Classe 1	47 + 6 log Q _n
Classe 2	57 + 6 log Q _n
Classe 3	67 + 6 log Q _n

Avec Q_n :
puissance utile
nominale en kW

Source : AFNOR (NF EN 303.5)

Par exemple, pour une chaudière de 100 kW, le rendement doit être de 59 % pour être conforme à la classe 1, 69 % pour la classe 2 et 79 % pour la classe 3.

Tableau 2 : Limites d'émissions

Charge ment	Combustible	Puissance (kW)	Limites d'émissions								
			CO			OGC			Poussières		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
mg/m³ à 10 % de O₂											
Manuel	Biogène	<= 50	25,000	8,000	5,000	2,000	300	150	200	180	150
		50 à 150	12,500	5,000	2,500	1,500	200	100	200	180	150
		> 150 à 300	12,500	2,000	1,200	1,500	200	100	200	180	150
	Fossile	<= 50	25,000	8,000	5,000	2,000	300	150	180	150	125
		50 à 150	12,500	5,000	2,500	1,500	200	100	180	150	125
		> 150 à 300	12,500	2,000	1,200	1,500	200	100	180	150	125
Automatique	Biogène	<= 50	15,000	5,000	3,000	1,750	200	100	200	180	150
		50 à 150	12,500	4,500	2,500	1,250	150	80	200	180	150
		> 150 à 300	12,500	2,000	1,200	1,250	150	80	200	180	150
	Fossile	<= 50	15,000	5,000	3,000	1,750	200	100	180	150	125
		50 à 150	12,500	4,500	2,500	1,250	150	80	180	150	125
		> 150 à 300	12,500	2,000	1,200	1,250	150	80	180	150	125

La norme NF EN 303.5 définit également les instruments de mesure, les combustibles à utiliser et la méthodologie des essais.

En raison de l'absence de toute réglementation européenne ou nationale pour les chaudières à céréales de petite puissance, la quasi totalité des constructeurs indiquent, sur leurs plaquettes commerciales, que leurs chaudières biomasse (à bois

et/ou à céréales) sont conformes à la norme EN 303.5. Cependant, tous ne précisent pas à quelle classe de la norme leurs installations sont conformes. Enfin, si les chaudières des divers constructeurs respectent bien les seuils imposés lorsqu'elles utilisent du bois, elles dépassent souvent les limites indiquées pour les poussières lorsqu'elles consomment des céréales (cf. les résultats des tests réalisés par le Danish Technological Institute sur une quinzaine de chaudières à céréales).

3.3.1.4. Point sur les dioxines

La circulaire du 24 février 1997, relative aux plans départementaux d'élimination des déchets ménagers et assimilés, impose à toutes les installations nouvelles d'incinération de déchets non dangereux, la valeur limite de **0.1 ng/Nm³** de fumées. Par ailleurs, l'arrêté du 20 septembre 2002, relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux (qui traduit en droit français la directive européenne du 4 décembre 2000) impose désormais à toutes les installations existantes la valeur limite de **0.1 ng/Nm³** de fumées à compter du 28 décembre 2005.

Mais aucun texte portant sur les installations de combustion de biomasse ne traite de valeur limite en terme de dioxine.

3.3.2. Le point sur les seuils limites d'émissions existants au Danemark, en Autriche, Allemagne et Suède

Seuls, ces trois pays européens présentent une avance toute relative concernant les seuils limites d'émissions autorisés dans leur pays en matière d'installations de combustion à partir de céréales.

Au Danemark, Il n'existe à ce jour aucune norme concernant les chaudières à céréales de puissance inférieure à 120 kW mais ce sujet est actuellement en discussion au Danemark. Pour de plus grandes puissances, il existe cependant les seuils suivants :

Pour les chaudières Paille de 1 à 50 MW	
mg/m ³ à 10 % de O ₂	
Poussières	40
CO	625
NO _x	300

Pour les chaudières Grains de 120 kW à 1 MW	
mg/m ³ à 10 % de O ₂	
Poussières	300
CO	500
Nox*	300

* uniquement pour les chaudières grains > 1 MW

En Autriche, il n'existe jusqu'à ce jour, aucune valeur limite mais le BLT et le Biomass Logistics Technology (BLT) travaillent actuellement à l'élaboration d'une norme nationale qui devrait voir le jour avant l'été 2006, avec la volonté d'étendre ultérieurement leur norme au niveau européen. Bien qu'encore non validées, les limites d'émissions pour les installations de combustion de chaudières agricoles de puissance inférieure à 400 kW pourraient être les suivantes :

CO = 500 mg/MJ ;

Carbone Organique = 40 mg/MJ ;

NO_x = 300 mg/MJ ;

Poussières = 60 mg/MJ

En Allemagne : Actuellement, la réglementation n'autorise pas la combustion de grains de céréales dans des chaudières de puissance inférieure à 100 kW mais une prévision de la loi est prévue pour 2006 ou, au plus tard 2007. Dans cette perspective, le FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) travaille sur un programme de tests initié en 2003 sur 10 chaudières à grains de céréales de moins de 100 kW. Les premiers résultats seront disponibles en mai 2006.

En Suède : La réglementation concernant la combustion de céréales est incluse dans la législation sur les combustibles solides. Les niveaux d'émissions autorisés sont les suivants :

Chaudières de puissance < 50 kW	OGC : < 150 mg/Nm ³ à 10 % d'O ₂
Chaudières de puissance > 50 kW	CO : < 500 mg/Nm ³ à 13 % de CO ₂ Particules : < 350 mg/Nm ³ à 13 % de CO ₂
Chaudières de puissance > 500 kW	Particules : 100 à 350 mg/Nm ³ à 13 % de CO ₂ (selon la taille et la localisation de la chaudière) : chaque chaudière reçoit un niveau qui lui est propre de la part des autorités

Remarque : en rouge : obligations
en marron : recommandations

Cette législation est en cours de révision.

3.3.3. Résultats de tests d'émissions réalisés par le Danish Technological Institute sur des chaudières à céréales de petite puissance

Puisqu'il n'existe pas encore d'obligation de respecter des seuils d'émissions pour les chaudières de petites puissances, peu de tests ont été, à ce jour, réalisés sur ce type d'installations.

L'Austrian Bioenergy Center et Biomass Logistics Technology (BLT) travaillent en partenariat depuis 3 ans sur deux projets d'étude et de mesures concernant :

5 chaudières céréales de 28 à 45 kW :

- > 3 à partir de grains de céréales (blé/orge),
- > 1 à partir de granulés de paille,
- > 1 à partir de maïs plante entière

3 chaudières paille et miscanthus de 35 kW

Le résultat des mesures : émissions de CO, NO_x, O₂, CO₂, poussières ainsi que les teneurs en chlore et soufre des combustibles devraient être rendus publics à partir de mai 2006.

De la même façon, le FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe) travaille sur un programme de tests initié en 2003 sur 10 chaudières à grains de céréales de moins de 100 kW dont les premiers résultats devraient être disponibles en mai 2006.

Seuls, les danois, par l'intermédiaire du Danish Technological Institute de Aarhus, réalisent régulièrement depuis plusieurs années des tests de combustion sur des chaudières céréales (grains et pailles) distribuées sur le marché danois. Ces tests visent principalement à mesurer le rendement, les émissions de monoxyde de carbone (CO), les poussières et la température des fumées.

Les chaudières indiquées dans les tableaux suivants sont toutes globalement performantes même si certaines présentent de meilleurs résultats que d'autres en matière de rendement, de CO et/ou de poussières.

GRAINS de céréales										
Fabricant	Modèle	Puissance (kW) Minimum - Nominale	Température des fumées (°C)	Energie (Rdts)	CO (mg/m3)	Poussières (mg/m3)	Conso elec(W)	Energie (Rdts)	Emissions de CO	Emissions de poussières
Baxi	Multi-Heat 2.5	7.6 - 23	78 - 140	87-88	113-1 694	290	70	B	C	D
Baxi	Multi-Heat 4.0	11.1 - 36	110 - 197	88-90	218-430	240	90	A	A	C
P&H Energy	PH 97	18.7 - 87	68 - 147	86-90	20-50	300	350	B	A	D
Refo	REFO 40	9.1 - 35	68 - 164	88-86	9-225	244	235	B	A	C
Reka	HKRST - FSK 30	9.8 - 33	84 - 146	77-89	250-1 870	203	500	C	D	A
Twin Heat	Cpi 12 m	2.8 - 11	80 - 133	80-84	169-577	215	100	B	A	B
Twin Heat	M20i + A2 m	5.1 - 22	77 - 151	82-87	71-281	337	110	B	A	D
Twin Heat	M40i + A4 m	10.8 - 40	74 - 149	86-84	283-464	296	110	C	A	D
Twin Heat	M80i + A8 m	22 - 70	88 - 138	85-90	59-594	338	111	B	A	D

PAILLE											
Fabricant	Modèle	Manuelle/ Automatique	Puissance (kW)	Température des fumées (°C)	Energie (Rdts)	CO (mg/m3)	Poussières (mg/m3)	Conso elec(W)	Energie (Rdts)	Emissions	Emissions de poussières
Alcon	AKT 450	Manuelle	461	172	88	795	-	2000	D	C	-
Alcon	AKU 250	Manuelle	235	160	87	1 963	267	1000	D	F	C
Hans Schmidt	HSM 35	Manuelle	303	202	79	1 688	408	1500	F	F	E
K.F. Halmfyr	KF 106	Manuelle	175	204	77	754	165	1100	F	C	A
K.F. Halmfyr	KF 107	Manuelle	213	174	84	1 075	267	1100	E	D	C
K.F. Halmfyr	KF 108	Manuelle	337	273	79	1 713	573	1100	F	F	F
Lin-Ka	Linka 100 Max	Automatique	24 - 93	101 - 160	82-84	283-3 695	464	3500	D	F	E
Overdahl	K 120	Manuelle	63	207	75	2000	241	400	F	F	C
Overdahl	K 150	Manuelle	168	218	83	1 075	153	780	E	D	A
Passat	HO 180	Automatique	53 - 187	89 - 150	84-88	213-763	473	6800	C	A	E
Reka	HKRST 60	Automatique	15 - 54	81 - 154	77-85	213-631	318	500	D	A	D

A Du meilleur

F Au moins bon

3.3.4. Résultats de tests d'émissions réalisés en Allemagne (Carmen / LfU)

3.3.4.1. Résultats de tests réalisés sur des chaudières de 4 à 25 kW :

Substance	Unité	Gaz naturel	Mazout	Bois naturel	Paille	Céréales
CO	mg/m ³	26	56	5,182	170	200
	mg/MJ	7	13	3,628	120	140
NO_x als	mg/m ³	70	200	100	330	600
	mg/MJ	19	46	69	230	420
SO₂	mg/m ³	2	320	7		100
	mg/MJ	0,5	77	5		70
HCl	mg/m ³			1	60	50
	mg/MJ			0,7	42	35
Poussières	mg/m ³	0,1	9	33	170	150
	mg/MJ	0,03	2,1	23	120	105
Dioxines, furannes	mg/m ³	0,006	0,005	0,07	0,7	
	mg/MJ	0,0017	0,0011	0,051	0,5	

Source : C.A.R.M.E.N./ LfU

3.3.4.2. Résultats de tests réalisés sur trois installations de 600 à 11 000 kW (source LfU)

Ce projet de recherche et développement a été réalisé par l'Office Fédéral de protection de l'Environnement Bavarois (LfU) sur trois installations de combustion de biomasse de puissance comprise entre 600 et 11 000 kW équipées de systèmes d'épuration des fumées volontairement différents. Les trois installations sont en service depuis quelques années : la première produit à la fois de la chaleur et de l'électricité pour un bâtiment administratif d'une ville de la région et pour le process d'un gros industriel, la seconde fournit de l'énergie à une société commerciale, la troisième fonctionne en réseau de chaleur pour alimenter un petit village.

Les deux principaux objectifs de ce projet ont été :

1. de mesurer les émissions de ces trois installations ;
2. d'évaluer l'efficacité des trois systèmes de filtration des gaz.

Tableau I: Caractéristiques des installations

	Installation 1	Installation 2	Installation 3
Type:	CHP	Heating	Heating
Puissance thermique :	11 MW	1 MW	0,6 MW
Système de filtration des fumées :	Filtre électrique	cyclone bag filter	cyclone electric filter
Combustibles :	Copeaux de bois et/ou plante entière tritcale	Copeaux de bois et/ou plante entière tritcale	Copeaux de bois et/ou paille grise

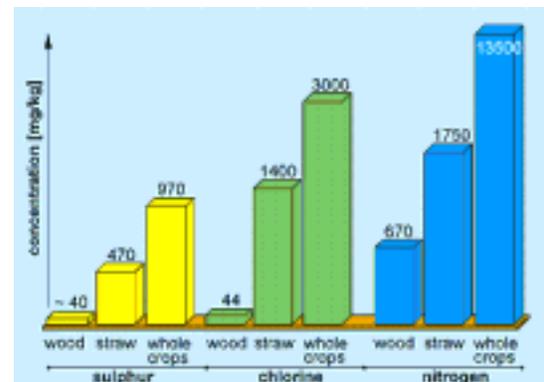
Pour la mesure des émissions, 8 tests ont été réalisés en utilisant différents combustibles, selon le tableau suivant :

Tableau II : Programme expérimental

Installation	séries	Bio-combustible	% d'humidité
Installation 1	1	Copeaux de bois	43 %
	2	Copeaux de bois (90 %) + Plante entière (10 %)	37 %
Installation 2	3	Copeaux de bois	49 %
	4	Plante entière	11 %
Installation 3	5	Copeaux de bois	13 %
	6	Copeaux de bois (60 %) + Paille grise (40 %)	25 %
	7	Paille grise	9 %
	8	Paille grise	9 %

A) Composition des bio-combustibles en entrée chaudière :

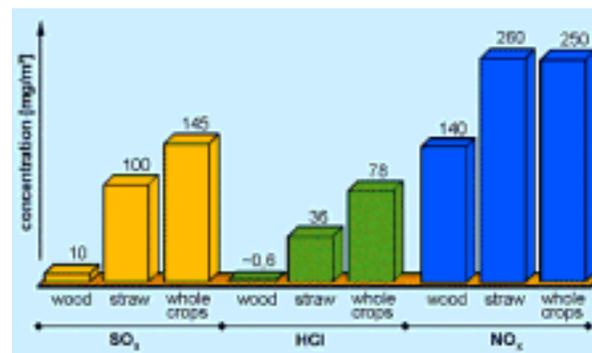
La figure 1 : présente la teneur moyenne en soufre (S), chlore (Cl) et azote (N) des copeaux de bois, des granulés de plantes entière et de la paille utilisés dans ces trois installations de combustion. Les teneurs en S, Cl et N sont très faibles dans le cas des copeaux de bois. En revanche, la paille et, davantage encore la plante entière contiennent des teneurs en S, N et Cl élevées par rapport au bois.



B) Emissions of SO_x, HCl and NO_x

Les émissions de NO_x de la paille et de la plante entière sont plus de deux fois supérieures à celles du bois.

La formation de NO_x peut provenir de la teneur en azote du combustible mais elle peut également être issue de l'azote contenu dans l'air de combustion, appelé « NO_x thermique » et toujours associé à des températures de combustion élevées. Dans le cas présent, la température de combustion



des trois installations biomasse n'est pas très élevé. Les émissions élevées de NO_x issues de la combustion de paille et de plante entière s'expliquent donc bien par la composition des combustibles en entrée chaudière. Cette composition, par ailleurs relativement plus élevée en soufre et en chlore de la paille et de la plante entière est également à l'origine des émissions d'oxyde de soufre et de chlorure d'hydrogène plus importantes.

Afin de limiter les émissions de NO_x, il est nécessaire de brûler des céréales avec de faibles teneurs en azote ; cela est possible notamment en réduisant les intrants azotés et en évitant l'utilisation de « raccourcisseurs » (hormones notamment utilisées pour accélérer la croissance des cultures de céréales) dont un des effets secondaires est d'augmenter la teneur en azote dans les grains de céréales.

C) Emissions de CO et de substances organiques (formaldéhyde, BTX, phénole)

Une combustion de bonne qualité, c'est à dire aussi complète que possible des gaz de combustion, est essentielle pour obtenir de faibles niveaux d'émissions. Elle dépend principalement de la température dans la chambre de combustion, de la turbulence des gaz de combustion et l'excès d'oxygène.

Les chaudières biomasse modernes sont considérées comme performantes en terme de combustion lorsqu'elles émettent moins de 100 mg/m³ de CO (Monoxyde de carbone).

	Installation 1		Installation 2		Installation 3			
mg/m ³ à 11% d'O	Bois	(0.9 B + 0.1 PE)	B	PE	B	(0.6 B + 0.4 PG)	PG	PG
CO	67	64	242	20	817	122	676	973
Formaldéhydes	0.09		0.28		0.31			
BTX	0.25		0.4		1.6			
Phénole	0.5		1.6		2.2			

Où B = bois ; PE = Plante Entière ; PG = Paille Grise et BTX = Benzène/Toluène/Xylène.

Les mauvais résultats obtenus dans la troisième installations sont significatifs d'un mauvais système d'alimentation de la paille et de problème de mesure mais le LfU, à travers ces tests, confirme l'importance de la régularité de la combustion non seulement pour réduire les émissions de CO mais encore pour limiter les émissions de substances organiques, dont l'évolution est liée à celle de monoxyde de carbone. Le LfU insiste enfin sur l'importance d'équiper systématiquement tout type de chaudière biomasse de sonde fumées, notamment pour mesurer les émissions de CO, témoin incontestable de la qualité de combustion de l'installation.

D) Poussières

mg/m ³	Installation 1		Installation 2		Installation 3			
	Bois	(0.9 B + 0.1 PE)	B	PE	B	(0.6 B + 0.4 PG)	PG	PG
Poussières	2.9	9.3	4.6	19	61	124	174	187

Le système d'épuration des installations 1 et 2 fonctionne bien, son rendement est de 98 %. En revanche, les résultats de la troisième installation montre, avec des émissions de poussières > 150 mg/m³ dans le cas de la paille que le système de filtration n'est pas suffisamment efficace, puisque de rendement évalué à 78 % seulement.

E) Dioxine et furannes

ng TE/m ³	Installation 1		Installation 2		Installation 3			
	Bois	(0.9 B + 0.1 PE)	B	PE	B	(0.6 B + 0.4 PG)	PG	PG
Dioxine et furanes	0.021		0.121		0.105			
Dioxine et furanes	0.07	0.011	0.05	0.085	0.039	-	0.048	

PCDD/F (1) = Mesure post-chambre de combustion (avant filtres)

PCDD/F (2) = Mesure dans fumées propres (après les filtres).

Même si les émissions de dioxines et furannes sont légèrement plus importantes dans le cas de la combustion de plante entière et de paille, ces émissions, en sortie de

filtres, demeurent bien inférieures au seuil de 0.1 ng TE/m^3 (seuil acceptable selon la 43^{ème} conférence des Ministres sur l'environnement -1994).

3.4. L'ALLUMAGE

La principale différence entre les grains de céréales et la paille ou le bois réside au niveau de l'allumage de la chaudière : en effet, cette étape est rendue difficile avec des combustibles céréales en raison de la cuticule entourant le grain, particulièrement dure et résistante au feu. La gestion de cette phase est donc spécifique à ce type de chaudière :

- ⇒ Si l'allumage de la chaudière est **manuel**, celui-ci sera réalisé une fois pour toutes en début de saison (sauf problème particulier) à l'aide de petit bois. Lorsque la température de consigne est atteinte, la chaudière passe alors en « mode veille » ou « maintien de feu » : la chaudière n'est donc jamais complètement éteinte pendant la période de chauffe. Lors de la phase de maintien de feu, la combustion est très mauvaise (on est alors très loin de la puissance nominale de la chaudière) et les émissions ainsi que la nuisance olfactive sont importantes.
- ⇒ Si la chaudière est équipée d'un allumage **automatique** (décapeur thermique puissant en général), la chaudière s'éteint lorsque la température de consigne est atteinte. La phase de maintien de feu, polluante, est alors évitée ; cependant, une consommation en électricité relativement importante est réalisée à chaque allumage. Cette solution semble cependant être à privilégier.

Un grand nombre de chaudières possèdent également un dispositif d'aide à l'allumage : la partie supérieure du brûleur est constituée d'un matériau réfractaire comme la céramique afin d'augmenter la chaleur. Attention cependant à ne pas recouvrir l'ensemble du brûleur ou de la chambre de combustion de ce type de matériau afin de ne pas atteindre une température qui favoriserait la formation de mâchefer et de polluants atmosphériques comme les NO_x .



Photo 4 : Partie supérieure du brûleur en céramique

3.5. CENDRES

La production de cendres représente environ 3 à 6 % lors de la combustion de céréales, contre 0,6 à 1,5 % seulement dans la cas du bois. Ces cendres peuvent

empêcher une alimentation en air correcte et des problèmes de régulation. Il est donc essentiel de nettoyer et de « décendrer » la chaudière à céréales aussi fréquemment que nécessaire.

Une chaudière à céréales, plus encore qu'une chaudière à bois, nécessite de fonctionner en régime établi, régulier, avec une régulation calquée sur la température extérieure et des cycles répétitifs analogues. Toute régulation brutale, saccadée ainsi que des coupures fréquentes de la chaudière à céréales sont à éviter car ces conditions anormales ou irrégulières de fonctionnement engendrent des problèmes de distillation des grains, de pyrolyse du blé, de fumées surchargées en acide et donc des risques accrus de corrosion des éléments de la chaudière et de diminution notable de la durée de vie des installations ainsi que du rendement.

L'utilisation d'une chaudière à céréales est un peu plus complexe et un peu moins « pratique » que celle d'une chaudière à bois mais peut être plus performante et moins coûteuse. Simplement, la chaudière à céréales ne supporte pas « l'à peu près ».

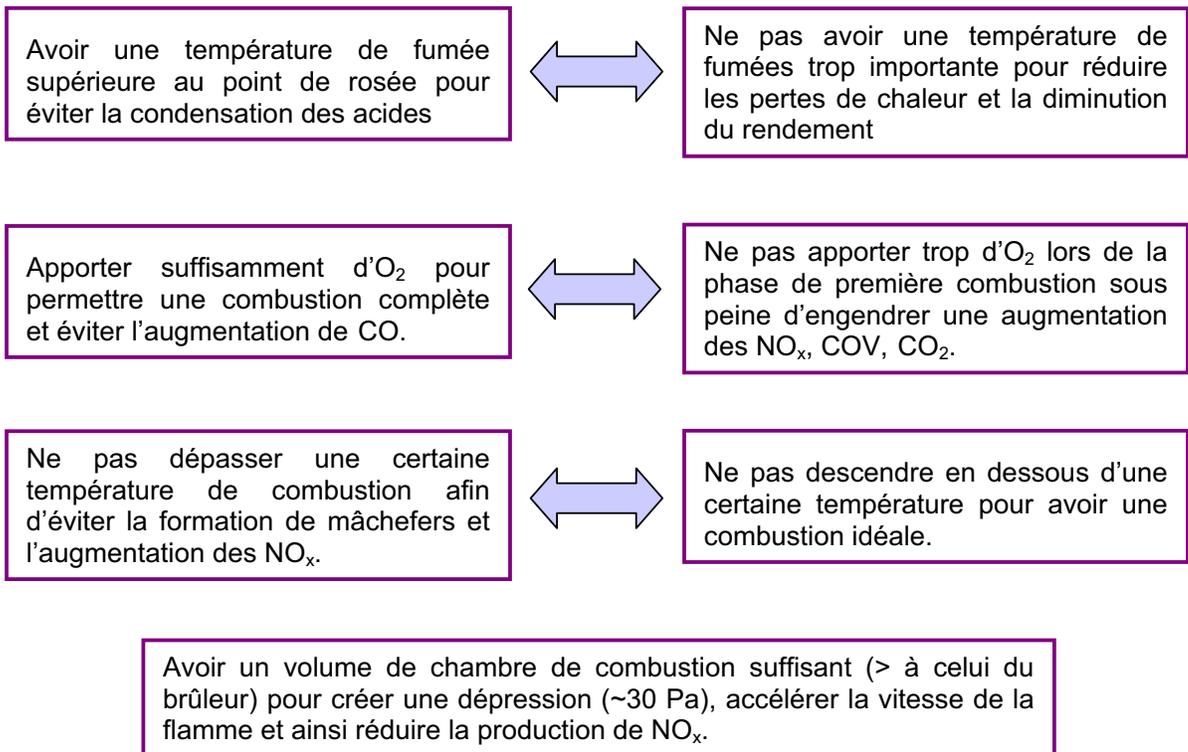
3.6. RESUME DES PRINCIPAUX ENJEUX

Les trois principaux enjeux sont :

1. Les émissions, en particulier celles de Poussières et de NO_x ;

2. Les mâchefers (liés à la faible température de fusion des cendres et à la teneur en silice des céréales) ;

3. La corrosion (liée à la teneur en chlore et surtout en soufre des céréales).



4. LES EQUIPEMENTS DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ FRANÇAIS

4.1. ENERGIE SYSTEME

Références et expérience : Plusieurs chaudières à blé, triticale et orge. Aucune chaudière paille.

Puissance nominale : 6 kW à 200 kW.

Combustible(s) : La grande majorité des chaudières brûlent des grains de blé et/ou de triticale, 4 à 5 chaudières fonctionnent à partir de grains de maïs et 2 à partir de grains d'orge⁶.

Rendement : > à 94 % avec 18 à 25 ppm de CO lors de la combustion.

Modèles : Deux modèles distincts existent mais fonctionnent avec un brûleur strictement identique. Seule l'alimentation les différencie : l'une est conçue pour l'utilisation de grains de céréales, de bois déchiquetés et autres noyaux de fruits, avec un décuteur rotatif et une dizaine de programmes, l'autre est spécifiquement dédiée à la combustion de céréales en grain seuls, avec un tube de 50 mm au niveau de l'alimentation.

Caractéristiques : les chaudières Energie-Système à foyer sec ont la particularité d'être conçues avec un brûleur vertical suspendu, situé à l'extérieur de la chaudière, permettant d'éviter tout contact entre la flamme ou les braises et la paroi de la chaudière.

Les cheminées sont en céramique et les chaudières Energie-Système sont équipées, depuis quelques mois, d'un dépoussiéreur.

Le système de régulation est basé sur la mesure de la température et du taux d'oxygène des fumées à partir de deux sondes : une sonde fumées et une sonde à oxygène lambda. La régulation consiste alors à faire varier deux paramètres : la vitesse de l'extracteur de fumée et le débit de combustible pour obtenir une teneur moyenne en oxygène de 8 à 9 %⁷.

Afin de trouver une solution pour diminuer, voire éviter les problèmes liés à la présence de mâchefers, Energie-Système a entrepris, au cours de l'été 2005, une campagne de mesure et de tests sur ses chaudières, tests réalisés par un laboratoire indépendant en collaboration avec l'Université de Limoges. Depuis, Energie-Système ajoute un produit qui fragmente le mâchefer en petits morceaux inférieurs à 2 cm. Pour des raisons de confidentialité, Energie-Système n'a pas souhaité divulguer le nom de ce produit destiné à enrober les grains.

PV d'essais : Oui

⁶ Les chaudières Energie-Système ne sont pas conçues pour brûler des graines de colza dont le pouvoir calorifique est tel que la dépression au niveau du brûleur serait insuffisante pour assurer le mélange « intime » d'air nécessaire à la combustion de ce type de céréale.

⁷ En deçà d'une concentration en oxygène de 7 %, la température de combustion peut augmenter au risque de détruire le brûleur.

4.2. REKA

Références et expérience : Reka est un constructeur de chaudières biomasse danois doté de 25 années d'expérience dans le domaine de la combustion de bois et de céréales. En France, Reka a commencé depuis un an seulement et dispose d'une centaine de chaudières céréales installées dans des gammes de puissance allant de 10 à 160 kW. Au cours de l'année 2006, Reka doit installer une chaudière à paille de 2 600 kW.

Puissance nominale : 10 kW à 6 500 kW.

Combustible(s) : les chaudières Reka sont toutes conçues avec la même chambre de combustion et sont donc capables de brûler indifféremment bois, plaquettes, granulés, sciures, copeaux, pailles, grains de céréales, miscanthus, etc . ; il suffit pour cela de choisir le programme et le système d'alimentation adaptés.

Rendement : le rendement des chaudières varie selon le type et surtout l'humidité des combustibles utilisés, de 87 % à 92 %.

Modèles : Deux gammes existent : une première pour les céréales, la paille, le bois et tout type de combustible biomasse jusqu'à 30 % d'humidité, une seconde pour les combustibles de 30 à 55 % d'humidité (bois et résidus de presse, par exemple).

Caractéristiques : les chaudières Reka à foyer sec sont automatiques, à grilles mobiles et ont la particularité d'avoir une chambre de combustion relativement importante. Elles sont toutes dotées d'un système d'évacuation continu des cendres et d'un système d'allumage automatique. Les cheminées en acier corten sont isolées de laine de roche de manière à éviter les problèmes de condensation (le retour d'eau est de 57° C minimum. Conçues pour que la température dans la chambre de combustion ne dépasse pas 900°C, ces chaudières n'auraient pas le problème de mâchefers que certaines chaudières concurrentes semblent avoir. Equipées d'un stockage tampon, les chaudières Reka sont dimensionnées de sorte que les fumées ne descendent pas en dessous de 25 % du régime continu et pour maintenir une température des fumées supérieure à la température de point de rosée.

Selon les gammes de puissance, les chaudières Reka sont équipées de filtres de façon à respecter les limites définies par les normes et directives :

- > 1000 kW : température des fumées d'environ 140°C / filtre à manche ;
- De 100 à 1000 kW : fumées de 170 à 200 °C / filtres multi-cyclones (optionnel) ;
- < 100 kW : fumées de 120 à 150° C / pas de filtre.

PV d'essai : oui

Pays d'origine : Danemark

Distributeur en France : Reka France

4.3. COMPTE R

Références et expérience : 9 chaudières paille sont en service en Pologne depuis 2002 mais le constructeur français ne dispose pas de retour d'information concernant ces installations. En France, à Salives (Bourgogne), Compte R vient juste de mettre en service une chaudière mixte paille/bois de 4,6 MW pour chauffer le CEA du Valduc. Cette chaudière est exploitée par Agro-énergie.

Puissance nominale : 4,6 MW

Combustible(s) : Mixte bois / paille (humidité inférieur à 20 %). Consommation de 24 tonnes de paille/jour, soit 60 balles et capacité de stockage du silo = 5 jours (soit 300 balles).

Rendement : le rendement des chaudières varie selon le type et surtout l'humidité des combustibles utilisés de 82 à 84 %

Caractéristiques : La chaudière Compte R est en phase d'expérimentation. Elle est constituée d'une grille inclinée et mobile en fonte. La température de combustion est d'environ 950 °C. La chaudière est équipée d'un filtre de façon à respecter les limites définies par les normes et directives. Ce filtre est un prototype (confidentiel) de traitement des fumées en phase d'expérimentation (cyclone à effet Vortex). La régulation de la chaudière se fait grâce à l'utilisation de sondes fumées et lambda. Enfin, la chaudière est équipée de systèmes d'évacuation automatique des cendres et des suies.

PV d'essai : Non (mais tests en cours)

Pays d'origine : France

Distributeur en France : Compte R

4.4. HS

Références et expérience : HS existe depuis plus de 10 ans et depuis 2000 en France.

Modèle : Chaudière Multiheat

Puissance nominale : Multiheat 15 → 13 kW | → Puissances données pour la
Multiheat 25 → 23 kW | combustion de céréales (>
Multiheat 40 → 37 kW | avec des granulés de bois)

Combustible(s) : Grains de céréales (toutes céréales), granulés de paille, granulés de bois, soja, tourteau de colza et de tournesol, déchets divers (ex. coquilles de noix), noyaux, ... Eventuellement bois déchiqueté (avec en option une roue de brassage dans le silo). Les céréales peuvent être brûlées directement sauf le maïs (qui doit le plus souvent être séché), les autres combustibles également ; ils peuvent même être légèrement sales. Leur hygrométrie ne doit pas dépasser 15 %.

Rendement : 85 % pour la chaudière Multiheat utilisant des céréales.

Caractéristiques : La chambre de combustion est composée d'un acier particulier (AISI316L) et d'un briquetage spécifique (composition et forme).

L'alimentation en combustible se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin qui entraîne le combustible du silo jusqu'à l'intérieur de la chambre de combustion (foyer). Le silo fourni avec la chaudière procure une autonomie d'une à 4 semaines (suivant les conditions). Il peut lui être rajouté un silo annuel.

L'alimentation en air se fait de manière forcée par l'intermédiaire d'un ventilateur. La quantité d'air injectée est normalement déterminée par la chaudière suivant des valeurs préétablies, en fonction du type de combustible, de la puissance et de la charge (paramètres réglés par l'utilisateur). Il est également possible (en option) d'ajouter une sonde lambda qui mesure le taux de monoxyde de carbone (CO) dans les fumées ; le réglage de la quantité d'air nécessaire se fait alors automatiquement.

Une sonde de température mesure la température des fumées (relativement basse : 160 – 170°C) ; en cas d'anomalie une alarme est donnée, puis la chaudière s'arrête.

La chaudière a trois modes de fonctionnement ; elle fonctionne tout d'abord à 100 % de sa puissance. Quand la température est proche de la température de consigne, elle fonctionne à 30 % de sa puissance, puis quand la température de consigne est atteinte, elle se met en position de veille ou de maintien de feu : les braises sont entretenues ce qui évite les rallumages intempestifs.

L'allumage se fait manuellement avec du petit bois, une seule fois en début de saison de chauffe.

La cheminée est en céramique ou en matière plastique PVDF ; un faible tirage est suffisant (dépression de 10 Pascal) grâce à la ventilation forcée.

Afin de diminuer les problèmes liés à la production de mâchefer, une pierre en alliage de fonte (à changer régulièrement) est ajoutée en bout de vis d'alimentation et, en tournant avec la vis, remue les braises dans le foyer ; le mâchefer est alors repoussé sur les côtés.

Le dépoussiérage se fait manuellement avec une brosse environ toutes les deux semaines. C'est une opération très rapide.

Les récupérateurs de chaleur (tubulaires) sont situés autour et au-dessus de la chaudière (récupération de la chaleur de combustion et de la chaleur des fumées).

Une option concernant la production d'ECS (eau chaude sanitaire) est disponible et presque toujours demandée. En été, l'ECS est alors produite soit par des panneaux solaires soit par une résistance électrique.

PV d'essai : Oui (laboratoires Bundesanstalt für Landtechnik (Autriche) et DANAK(Danemark))

Pays d'origine : Danemark

Distributeur en France : HS France

4.5. VETO

Références et expériences : Veto existe depuis un an et demi en Suède et depuis quelques mois en France.

Puissance nominale : de 30 à 300 kW.

Combustible(s) : tourbes, granulés de bois, bois déchiqueté, grains de céréales, ...
L'hygrométrie peut aller jusqu'à 25 %.

Rendement : entre 87 et 89 %

Caractéristiques : Le brûleur, situé à l'extrémité de la vis d'alimentation (vis sans fin) à l'intérieur de la chambre de combustion, fait partie du système d'alimentation. C'est un brûleur fixe pour les petites puissances et mobiles à partir de 80 kW. Il est en acier réfractaire. L'alimentation en air primaire se fait par un ventilateur et arrive sous le brûleur. Cet air permet d'activer la combustion du combustible solide et de refroidir la tête du brûleur. L'air secondaire sert à brûler les gaz de combustion. La température de combustion est de 1200 – 1400°C.

La régulation se fait manuellement de visu : le constructeur donne un certain nombre de conseils à l'utilisateur à qui il fournit également une assistance technique quand c'est nécessaire. Le réglage se fait au niveau du ventilateur. Il est possible d'ajouter une sonde lambda (en option).

Une sonde permet de mesurer la température des fumées, ce qui permet entre autres de détecter les anomalies lors de la combustion (encrassement de la chaudière, extinction lors d'une coupure de courant par exemple, ...).

La chaudière comprend la chambre de combustion, les échangeurs (plans) et le serpentin pour la production d'ECS. La production d'ECS est de série jusqu'à 100 kW. La chaudière a deux modes de fonctionnement : elle fonctionne à sa puissance nominale pour atteindre la température de consigne puis se met en veille (maintien des braises).

Le constructeur effectue un certain nombre de recommandations en ce qui concerne la cheminée mais n'impose rien à l'utilisateur, sauf une certaine isolation. Le tirage est naturel, la cheminée doit être assez grande, sa hauteur dépendant de son diamètre et de la puissance de la chaudière.

Le mâchefer est littéralement poussé par le combustible neuf arrivant dans le brûleur et tombe alors dans le cendrier situé sous le brûleur. Puisque le brûleur n'est pas situé au fond de la chambre de combustion, le feu n'est pas étouffé. Les cendres tombent de la même façon. Il est possible d'ajouter une vis de décendrage automatique puissante qui casse le mâchefer pour les grosses chaudières.

L'allumage est manuel et se fait une fois par saison de chauffe.

L'alimentation en combustible se fait par une vis sans fin mue par un moteur puissant alimenté en triphasé. Il existe différentes sortes de silos.

Trois systèmes de sécurité sont mis en place en ce qui concerne les risques d'incendie (dont deux peuvent fonctionner même en cas de coupure de courant).

Ce sont des chaudières « simples mais robustes ».

PV d'essai : oui (laboratoires VTT (Finlande), DANAK (Danemark))

Pays d'origine : Suède

Distributeur en France : FSI Franskan

4.6. ECOTEC

Références et expériences : EcoTec existe depuis 5 – 6 ans en Suède.

Modèle : AgroTec

Puissance nominale : 22 kW.

Combustible(s) : avoine, pellets de bois principalement.

Rendement : 90 %

Caractéristiques : Le brûleur est un organe extérieur (la tête de combustion étant interne à la chambre de combustion).

L'alimentation en combustible se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin qui relie le silo et le brûleur.

L'alimentation en air se fait grâce à un ventilateur fixé sur le brûleur. La régulation de l'apport en air primaire et secondaire se fait par l'ouverture ou la fermeture d'un clapet sur le ventilateur. Les réglages se font manuellement suivant la puissance et le combustible grâce à un appareil qui analyse la composition des fumées.

L'allumage est manuel. La chaudière démarre à 30 % de sa puissance pendant une dizaine de minutes puis travaille à 100 % de sa puissance. Lorsque la température de consigne est atteinte, la chaudière passe en mode veille.

Le mâchefer est évacué du brûleur en étant poussé par le combustible neuf arrivant.

Le décendrage peut être automatique (option), mais se fait généralement manuellement. Le dépoussiérage est manuel.

Plusieurs systèmes de sécurité sont mis en place contre les risques incendie.

La production d'ECS est de série.

La cheminée fait l'objet d'une série de recommandations : elle doit être en inox spécial (304), la taille dépend de la puissance essentiellement et le tirage est naturel (pas d'extraction d'air).

PV d'essai : Non

Pays d'origine : EcoTec

Distributeur en Belgique (très peu de ventes en France) : Tecclém

4.7. VERNER

Références et expériences : Existe depuis 2 ans.

Puissance nominale : 25 ou 50 kW

Combustible(s) : Tous grains de céréales, granulés de bois, éventuellement paille pelletisée, ...

Rendement : 92 %

Caractéristiques : Le brûleur est une unité située dans la chambre de combustion. La chambre de combustion est recouverte de plaques en céramique qui permettent d'augmenter la chaleur de combustion.

L'alimentation en combustible se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin qui relie le silo et le brûleur.

L'alimentation en air se fait grâce à un ventilateur fixé sur la chaudière. La régulation de l'apport en air primaire et secondaire se fait par l'ouverture ou la fermeture d'un clapet sur le ventilateur. Les réglages se font manuellement suivant la puissance et le combustible grâce à une sonde de température située au niveau des fumées et un appareil qui analyse la composition des fumées. Une sonde lambda est disponible en option.

L'allumage est automatique. La chaudière démarre à 30 % de sa puissance pendant une dizaine de minutes puis travaille à 100 % de sa puissance. Lorsque la température de consigne est proche, elle travaille de nouveau à 30 % de sa puissance. Elle n'a pas vraiment de mode de veille et s'éteint généralement au bout d'un certain temps quand la température de consigne est atteinte.

Le mâchefer est évacué grâce à une grille mobile. Il n'y a presque aucune production de mâchefer avec ces chaudières.

Le décendrage peut être automatique (option), mais se fait généralement manuellement. Le dépoussiérage est manuel.

Plusieurs systèmes de sécurité sont mis en place contre les risques incendie.

La cheminée fait l'objet d'une série de recommandations : elle doit être en inox spécial (304), la taille dépend de la puissance essentiellement et le tirage est naturel (pas d'extraction d'air).

PV d'essai : Non

Pays d'origine : République Tchèque

Distributeur en Belgique (très peu de ventes en France) : Teccllem

4.8. VIADRUS

Références et expériences : Existe depuis 3 - 4ans.

Puissance nominale : 4 ou 48 kW

Combustible(s) : avoine, granulés de bois principalement.

Rendement : 86%

Caractéristiques : Le brûleur est un organe extérieur (la tête de combustion étant interne à la chambre de combustion).

L'alimentation en combustible se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin qui relie le silo et le brûleur.

L'alimentation en air se fait grâce à un ventilateur fixé sur le brûleur. La régulation de l'apport en air primaire et secondaire se fait par l'ouverture ou la fermeture d'un clapet sur le ventilateur. Les réglages se font manuellement suivant la puissance et le combustible grâce à un appareil qui analyse la composition des fumées.

L'allumage est automatique. La chaudière démarre à 30 % de sa puissance pendant une dizaine de minutes puis travaille à 100 % de sa puissance. Lorsque la température de consigne est atteinte, elle passe en mode veille.

Le mâchefer est évacué en étant poussé par le combustible neuf entrant dans le brûleur.

Le décendrage et le dépoussiérage se font manuellement.

Plusieurs systèmes de sécurité sont mis en place contre les risques incendie.

La cheminée fait l'objet d'une série de recommandations : elle doit être en inox spécial (304), la taille dépend de la puissance essentiellement et le tirage est naturel (pas d'extraction d'air).

PV d'essai : oui

Pays d'origine : République Tchèque

Distributeur en Belgique (très peu de ventes en France) : Tecclém

4.9. ARCA

Références et expériences : Existe depuis fin 2003 en Italie et 2004 en France. Une dizaine de chaudières environ a été vendue en France.

Modèle : Chaudière Granola

Puissance nominale : 55 kW

Combustible(s) : Blé et maïs. Leur hygrométrie peut atteindre 14 % (il est en général nécessaire de sécher le maïs avant utilisation dans la chaudière).

Rendement : variable suivant l'installation, le tirage, le combustible, donc ne veulent pas s'engager sur un chiffre. Il est bien sûr supérieur à 65 %.

Caractéristiques : La chambre de combustion est en acier et en ciment (matériau réfractaire). Il n'y a pas de brûleur en tant que tel : l'ensemble de la combustion se déroule dans la chambre de combustion.

La chaudière est isolée par de la laine de verre pour limiter les pertes de chaleur.

L'alimentation en combustible se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin qui entraîne le combustible du silo jusqu'à l'intérieur de la chambre de combustion (foyer).

L'alimentation en air se fait de manière forcée par l'intermédiaire d'un ventilateur aspirant.

Les paramètres de régulation sont pré-réglés, mais doivent être affinés par l'installateur lors de l'installation en fonction de la température des fumées et de la couleur de la flamme. La température recommandée des fumées est de 165 – 170 °C.

Le mode de fonctionnement de la chaudière est le suivant : 100 % au démarrage, puis environ 60 % lorsque la température de consigne est atteinte de manière à maintenir le feu.

L'allumage se fait manuellement avec du petit bois et de papier, une seule fois en début de saison de chauffe.

La cheminée peut être en aluminium et doit respecter un certain diamètre. Un tirage relativement important est nécessaire ; pour cela, la dépression doit être au minimum de 0,3 mbar.

Le nettoyage, manuel, doit être fréquent : une fois tous les deux ou trois jours pour le mâchefer, une fois par semaine pour le décendrage et les conduits de fumées. D'autre part, il est recommandé de faire effectuer par un professionnel, dans le cadre d'un contrat d'entretien par exemple, une fois tous les deux à trois mois, le nettoyage complet des conduits de fumées en démontant la partie supérieure de la chaudière.

Les récupérateurs de chaleur sont situés au niveau du conduit : récupération de la chaleur des fumées.

Une option concernant la production d'ECS (eau chaude sanitaire) est disponible et presque toujours demandée. L'utilisation d'un ballon tampon est d'ailleurs particulièrement recommandée et pourra même faire l'objet d'une condition d'application de la garantie. Le risque d'incendie est quasiment nul grâce au fonctionnement par aspiration du ventilateur.

Un stage de formation technique est dispensé aux clients (installateurs et grossistes) et le constructeur accompagne le client chez le particulier si nécessaire.

PV d'essai : Non

Pays d'origine : Italie

Distributeur en France : Arca France

4.10. BENEKOV

Références et expériences : Existe depuis 4 ans au Danemark et en suède et depuis 3 ans en France.

Modèle : Pelling 27 et V-Ling 50

Puissance nominale : de 10 à 35 kW

Combustible(s) : Toutes céréales, granulés de bois. L'hygrométrie peut atteindre 14 – 15 %.

Rendement : 80 – 85 %

Caractéristiques : La chambre de combustion est en partie composée de céramique. Le brûleur est interne.

L'alimentation en combustible se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin qui entraîne le combustible du silo jusqu'au brûleur.

L'alimentation en air se fait de manière forcée par l'intermédiaire d'un ventilateur dont la puissance est régulée en fonction du type de combustible.

Les paramètres de régulation sont fixés par l'installateur en fonction notamment du type de céréales.

Un futur modèle, probablement commercialisé en milieu d'année 2006, proposera en option une sonde lambda.

La température des fumées se situe aux alentours de 160°C. Pour éviter les problèmes de corrosion, des systèmes de by-pass et de chicanes sont conçus pour maintenir la température des fumées suffisamment élevée.

Pour éviter la formation de mâchefer, il est conseillé d'ajouter de calcium au combustible au moment du stockage. Il n'y a pas de grille mobile.

Fonctionnement : La chaudière fonctionne à 100 % de sa puissance jusqu'à atteindre la température de consigne ; elle passe ensuite en mode maintien de feu.

L'allumage se fait manuellement avec du petit bois et de papier, une seule fois en début de saison de chauffe.

La cheminée doit respecter les consigne de taille (tirage de 0,3 mbar idéalement) et de composition (céramique).

Le décendrage se fait manuellement ou par vis.

L'option concernant la production d'ECS (eau chaude sanitaire) existe.

Le risque d'incendie n'est pas plus élevé : l'ouverture d'un clapet se fait automatiquement dès que la température dans le silo atteint une valeur donnée.

PV d'essai : oui

Pays d'origine : République Tchèque

Distributeur en France : Nideck

4.11. HEIZOMAT

Références et expérience : Le modèle « céréales et combustibles difficiles » existe depuis 2 ans.

Modèle : RHK-AK

Puissance nominale : de 33 à 800 kW

Combustible(s) : Toutes céréales, granulés de bois, sciure ... Spéciale combustibles difficiles. Hygrométrie :

Rendement : > 90 %

Caractéristiques : Le brûleur est interne.

L'alimentation en combustible se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin qui entraîne le combustible du silo jusqu'au brûleur.

L'alimentation en air secondaire se fait de manière forcée par l'intermédiaire d'un ventilateur dont la puissance est réglée grâce à une sonde lambda.

Une sonde mesurant la température des fumées est installée d'origine.

Il n'y a pas de grille mobile. Le décendrage est automatique, par l'intermédiaire d'une chaîne, ainsi que le nettoyage de l'échangeur.

Fonctionnement : La chaudière fonctionne à 100 % de sa puissance jusqu'à atteindre la température de consigne ; elle passe ensuite en mode maintien de feu.

L'allumage est manuel mais il peut être automatique (en option).

Il est possible de produire l'eau chaude sanitaire.

En ce qui concerne les problèmes de corrosion et de mâchefer, des dispositifs spéciaux sont mis en place (le distributeur n'a pas souhaité donner plus de précision).

PV d'essai : Oui (12 chaudières testées par l'institut BLT de Wieselburg (Autriche))

Pays d'origine : Allemagne

Distributeur en France : Nideck

5. RETOURS D'EXPERIENCE

5.1. EXPERTS

Plusieurs entretiens ont été réalisés avec des experts dans le domaine de la combustion de produits issus de cultures annuelles :

- Marie Rönnbäck, du SP - Swedish Testing and Research Institute (Suède);
- Bengt-Erik Löfgren, de la société de conseil Åfab (Suède) ;
- M. Perche de l'association ALDECA (Association libre de développement des combustibles agricoles) (France).

Les informations qui ont été recueillies ont été incluses au rapport dans les différentes parties correspondantes. Pour une information plus complète, les résumés des deux premiers entretiens sont joints en annexe.

Voici la liste complète des contacts établis avec des experts lors de cette étude :

Organisation	Nom	Téléphone	E-mail	Pays
CARMEN (Coordination Office for Renewable Raw Materials)	DR Ruth Broekeland		rb@carmen-ev.de	Allemagne
FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.)	Dr Andrej Stanev		a.stanev@fnr.de	Allemagne
	Mr Birger Kerckow	03843-6930125	b.kerckow@fnr.de	Allemagne
Biomass Logistics Technology (BLT)	Mr Heinrich Prankl	+ 43 74 16 52 175-27	heinrich.prankl@fjblt.bmlfuw.gv.at	Autriche
	Mr Josef Rathbauer		Josef.Rathbauer@fjblt.bmlfuw.gv.at	Autriche
	Mr Leopold Lasselsberge		Leopold.Lasselsberger@fjblt.bmlfuw.gv.at	Autriche
Austrian Bio-Energy	Mr Manfred Woergetter		Manfred.Woergetter@fjblt.bmlfuw.gv.at	Autriche
Elsam	Mr Bo Sander	+ 45 79 23 33 33	bos@elsam-eng.com	Danemark
Pellets for Europe (Programme Européen)	Mr Jonas Dahl	+ 45 72 15 78 12	jxd@force.dk	Danemark
ADEME Bourgogne	Mr Azière	03 80 76 89 76		France
Arvalis	Mr André Lebras	01 64 99 22 00 01 64 99 22 43	a.lebras@arvalisinstitutduvegetal.fr	France
Chambre d'agriculture du Bas-Rhin	M. Huss, M. Gintz	03 88 19 17 17	r.huss@bas-rhin.chambagri.fr; c.gintz@bas-rhin.chambagri.fr	France
ALDECA (Association libre de développement des combustibles agricoles)	Thierry Perche	06 81 94 10 57 1 Rue d'Arceuil - 77176 Nandy		France
INRA	Christine AUBRY Elisabeth REMY		caubry@inapg.inra.fr; elisabeth.remy@inapg.inra.fr	France

Organisation	Nom	Téléphone	E-mail	Pays
STEM (Agence Suédoise de l'énergie)	Ms Norrman	00 46 16 544 2000	pia.norrman@stem.se	Suède
SVEBIO (Swedish Bioenergy Association)			info@svebio.se	Suède
JTI – Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering	M. Ola Palm	Head of R&D ; environmental engineering	ola.palm@jti.slu.se	Suède
	Åke Nordberg		ake.nordberg@jti.slu.se	
Swedish University of Agricultural Sciences - Bioenergy technology centre	Head of Department, Associated Prof. Bengt Hillring		bengt.hillring@bioenergi.slu.se	Suède
Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF) The Swedish Farmers' Foundation for Agricultural Research	Eva Pettersson		eva.pettersson.2@lrf.se	Suède
AFAB Älvdalens Fastbränsleteknik AB (consultancy firm)	Bengt- Erik Lofgren		bengt@afabinfo.com	Suède
Swedish National Testing and Research Institute	Marie Rönnbäck		marie.ronnback@sp.se	Suède
IEA - International Energy Agency	Assistant Task 32 Leader Jaap Koppejan		jaap.koppejan@tno.nl	Suède
IVL Swedish Environmental Research Institute	Susanne Paulrud		infomanager@ivl.se	Suède

5.2. CONSTRUCTEURS

Des entretiens téléphoniques ont été conduits avec les constructeurs suivants ou leur distributeur en France : Arca (Italie), Benekov (République Tchèque), Compte R (France), Energie Système (France), Heizomat (Allemagne), HS Baxi (Danemark), Reka (Danemark) et Veto (Suède). Tecclém (revendeur belge) a été contacté pour des informations sur les chaudières EcoTec (Suède), Verner (République Tchèque) et Viadruss (République Tchèque).

Les informations recueillies sur les chaudières ont été réunies sous forme de « fiches constructeurs » (cf. § 4. LES EQUIPEMENTS). Les informations plus générales ont été intégrées au rapport.

Voici la liste complète des contacts établis avec les constructeurs / distributeurs lors de cette étude :

Constructeur / Distributeur	E-mail	Téléphone	Adresse
Compte R	bruno.chieze@compte-r.com	04 73 95 01 91 04 73 95 18 20	ZI DE VAUREIL 63220 ARLANC
Energie Systeme Sarl	info@energiesysteme.fr	05 55 28 70 41	"L'Espinglette" route Nationale 120 19430 Saint Julien le pèlerin
Reka	reka.france.fr@free.fr	01 34 74 89 17 03 20 79 55 54	38, rue des Bouts de la Ville 78250 Gaillon sur Montcien
Arca	arca.france@wanadoo.fr	04 72 91 54 30	15 RUE LIGNE DE L'EST 69100 VILLEURBANNE
Nideck (Heizomat et Benekov)	dominique.dieda@wanadoo.fr	03 88 87 33 73	* ja dUggY`XY`fYgW]Yf *++%\$`K 5B; 9B6CI F;
HS France	info@hsfrance.fr	03.88.49.27.57	Rue Andersen F-67870 Bischoffsheim
Tecclem Technics (EcoTec, Viadrus, Verner)	tecclem@skynet.be	+32 (0) 9 356 64 23	Rechtstraat, 367c 9160 Lokeren
FSI Franskan (Veto)	fsi3@wanadoo.fr	02 33 31 84 65	N57 Xi 7\öbY & žfi Y`XYg`HggYfUbXg +&*\$`5föcbbUm

6. RECOMMANDATIONS

6.1. RECOMMANDATIONS TECHNIQUES

6.1.1. Alimentation – Approvisionnement

Grains de céréales : Il est essentiel que le futur utilisateur sache clairement à partir de quel(s) combustible(s) il envisage de faire fonctionner sa chaudière car l'alimentation d'une chaudière spécifiquement dédiée à la combustion de grains de céréales doit être alimentée à partir de grains de blé, maïs ou orge «propres», c'est à dire sans morceaux de paille supérieurs à quelques centimètres (fonction du diamètre du tube d'alimentation).

En effet, une des causes les plus fréquentes d'arrêt involontaire de la chaudière n'est pas liée à une panne technique de l'équipement mais plutôt au choix d'une alimentation de la chaudière inappropriée aux combustibles. Il est ainsi fondamental que la granulométrie des combustibles soit compatible avec le système d'alimentation de l'installation.

Paille : Le conditionnement de la paille est fondamental. L'expérience acquise par plusieurs constructeurs de chaudières à paille démontre que les défibreurs ou les systèmes de décompactage de la paille ne sont pas suffisants pour éviter les problèmes d'enchevêtrement de la paille autour des vis. Il est absolument nécessaire de couper la paille en morceaux de 5 à 6 cm et, pour cela, d'avoir en amont de l'installation un système de broyage de la paille.

Des pailles trop longues finissent toujours par former des boules et des fagots, d'où une combustion hétérogène et des pics de monoxyde de carbone (CO).

Une réduction des émissions en sortie de chaudière passe avant tout par un approvisionnement et un lit homogène.

6.1.2. Local dédié

Installer la chaudière dans un local dédié, isolé et où la température est d'environ 18°C est nécessaire afin d'éviter les problèmes de condensation (le retour d'eau est de 57° C minimum).

6.1.3. Installateurs

Les installateurs connaissent souvent mal les spécificités des chaudières céréales ou paille : les problèmes engendrés pour cause de mauvaise installation se situent au niveau de la cheminée (corrosion, mauvais tirage), des circuits de bouclage, des différents réglages. Certains constructeurs dispensent un stage de formation pour les installateurs volontaires. Il pourrait être intéressant d'organiser de tels stages pour former les installateurs pour plusieurs marques de chaudières céréales, évitant ainsi les problèmes lors de l'utilisation.

6.1.4. Réutilisation des cendres

Il est tout à fait possible de réutiliser les cendres produites comme fertilisants, surtout si le soufre et le chlore y ont été piégés (grâce à l'ajout d'additif comme le bicarbonate de soude). La teneur en phosphore (P_2O_5) et potasse (K_2O), ainsi qu'en calcium, magnésium et oligo-éléments (fer, chlore, sodium et silicium) engendrent la possibilité de les valoriser en tant qu'engrais.

6.1.5. Nuisances olfactives

Afin de réduire les nuisances olfactives qui apparaissent principalement lors du démarrage et du fonctionnement à puissance réduite, il est préférable de supprimer le mode « maintien de feu », d'utiliser des ballons d'accumulation ou des filtres olfactifs (filtres biologiques).

6.1.6. Sonde fumée et sonde oxygène

Toutes les chaudières biomasse et davantage encore les chaudières à céréales devraient être équipées d'une sonde fumée et d'une sonde à oxygène, également appelée sonde lambda. Cette dernière a une durée de vie moyenne de 2 à 3 ans et coûte environ 180 €. Ces sondes ont un rôle important pour la régulation de la combustion (allumage, gestion de l'alimentation en combustible et de la puissance de la chaudière).

6.1.7. Nettoyage automatique

Seules, certaines chaudières céréales sont commercialisées avec un système de nettoyage automatique (dépoussiérage de l'échangeur, décentrage du foyer) consistant en une vis sans fin d'évacuation des cendres vers un réceptacle / cendrier. Il semble toutefois que les poussières grasses et collantes, issues de la combustion de céréales, soient relativement difficiles à nettoyer, même à l'aide d'air comprimé). Il convient donc d'avoir une chaudière capable de produire le moins de poussières possibles ou encore, pour les grosses chaudières, d'envisager des systèmes semblables à ceux utilisés dans les usines d'incinération d'ordures ménagères d'économiseur ajouté à la sortie de l'échangeur primaire, avec un système de by-pass pour avoir un rendement constant.

En tout état de cause, à partir d'une certaine puissance, il faudra toujours prévoir un système de filtres.

Les filtres multi-cyclones sont utilisées par certains constructeurs sur des chaudières de puissances comprises entre 100 kW et 1000 kW mais leur efficacité est moindre que celle des filtres à manche utilisés à partir de puissances supérieures à 3 MW mais dont le coût est prohibitif pour des petites et moyennes puissances (de l'ordre de 80 000 à 100 000 €).

6.1.8. Grilles fixes / grilles mobiles

Les chaudières à grilles fixes apparaissent comme mal adaptées à la combustion de céréales, en raison notamment des problèmes de mâchefers, de scories et de poussières qui viennent se coller sur les tubes horizontaux comme verticaux des foyers.

Une **grille mobile et inclinée**, idéalement **équipée de système de refroidissement à l'eau** ou un foyer froid indépendant de la chaudière conviennent mieux à la combustion de céréales.

6.1.9. Mâchefers

Pour réduire la production de mâchefers : ajouter un additif (tel que la chaux vive) pour augmenter la température de fusion des cendres de céréales, utiliser des combustibles dont la culture a été réalisée avec peu d'intrants et ne pas dépasser la température de fusion des cendres lors de la combustion.

6.1.10. Corrosion

Pour réduire les risques de corrosion, il faut veiller à ce que la température des fumées reste au-dessus du point de rosée des acides formés ; cependant si cette température est trop élevée, cela signifie qu'une grande quantité de chaleur s'échappe par la cheminée. Il faut donc trouver une température qui permette d'éviter la condensation des fumées tout en n'abaissant pas trop le rendement.

L'utilisation de matériaux résistants tels que la céramique est indispensable. L'ajout d'additifs paraît être une solution très prometteuse: le bicarbonate de soude (NaHCO_3) par exemple, permet de piéger le Cl et le S avant même qu'ils ne réagissent pour former des acides ; ils se retrouvent alors dans les cendres.

6.2. RECOMMANDATIONS A L'ADEME

1. Réaliser des campagnes de mesures d'émissions (CO, NOx, SOx, Hcl et poussières)

Plusieurs organismes techniques européens travaillent déjà depuis trois à cinq ans à la mesure d'émissions de petites et moyennes installations de combustion de biomasse et devraient obtenir les résultats de ces campagnes d'ici à la fin de l'année 2006. C'est notamment le cas en Autriche avec l'Austrian Bioenergy Center et le Biomass Logistics Technology (BLT) et en Allemagne avec Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR).

Dans un premier temps il serait souhaitable de récupérer les résultats de ces programmes auprès des experts suivants :

❖ Manfred Woergetter ou Leopold Lasselsberger
BLT
Rottenhauser Str. 1
A 3250 Wieselburg
Austria / Österreich
manfred.woergetter@josephinum.at

❖ Dr Andrej Stanev
FNR
Hofplatz 1
18276 Gülzow
Allemagne / Germany
a.stanev@fnr.de

Puis, il apparaît nécessaire de réaliser le même type de programme sur des chaudières différentes de celles testées dans le cadre de ces différents programmes. Les émissions de chaudières de marque française, telles que les chaudières Compte R et Energie Système pourraient être prioritairement étudiées.

2. Etablir des partenariats avec les organismes experts européens

Les différents organisme rencontrés (BLT, Swedish Testing and Research Institute, ...) ont été très intéressés par l'étude et ses conclusions d'une part, mais également par la possibilité d'établir des partenariats avec la France pour mener des recherches en commun sur le sujet. Cf. extrait de mail et demande formulée par le BLT, à titre d'exemple :

Dear Marguerite!

The Austrian farmers are deeply interested in energy grain and energy grain small scale boilers. Due to the well known problems with long term performance (eg with corrosion, slagging and fouling) and emissions (especially particles and fine particles as well as nitrogen oxides) we have initiated a energy grain monitoring projects. Five small scale boilers owned by farmers are observed for two years with respect to costs, maintenance and deterioration as well as emissions. The project is carried out by our affiliate organization "Austrian Bioenergy Centre" (www.abc-energy.at), Gottfried Eder manages this projects and he can give you more information to this monitoring project.

Approval tests are carried out (http://www.blm.bmlfuw.gv.at/bio_nawa/pruef/pruefl.htm) and Leo Lasselsberg (http://www.blm.bmlfuw.gv.at/port/abt_2/fo/lassl.htm) is responsible for that topic. He is also engaged in standardization and legal regulation. He is working in a national expert group which is engaged in national emission limits. As far as I know a draft for emission limits for energy grain combustion was worked out. In principle this work in progress and the results are confidential. Because of the need for a Europe-wide standardization I ask Leo Lasselsberger to send an information on the discussed emission limits (including information on the expert group and the title of the federal regulation) as soon as possible.

With best regards

Manfred Wörgetter

PS: May I express out interest in further work on this topic? Can you consider to include this interest in your report to ADEME? Is it possible to get a copy of the study or of the summary at the end of your project?

3. Réaliser des campagnes de mesures de polluants non réglementés (dioxines)

En raison de la faible quantité d'études portant sur les émissions de dioxines issues de la combustion de chaudières à céréales et de l'importance d'un tel polluant, si la filière devait se développer, il pourrait être pertinent de mettre en oeuvre un programme de mesure des émissions de dioxines dans des installations de moyenne à grande puissance (en commençant, par exemple par la chaudière mixte paille-bois de marque Compte R de 4,6 MW et par la chaudière paille Reka de 2,6 MW qui doit être installée dans le courant de l'année).

4. Réaliser une étude sur l'efficacité des systèmes de traitement des fumées

Dans la perspective relativement proche du développement d'installations de combustion et/ou de gazéification de biomasse de puissance de plus en plus importante (Cf. projets des pétroliers en matière de bio-raffineries), une étude portant sur un état de l'art mondial des technologies existantes pour épurer les gaz de combustion d'installations de biomasse pourrait être utile. Cette future étude devant également recueillir les avancées réalisées dans des installations d'incinération d'ordures ménagères.

5. Réaliser une campagne d'information sur le marquage CE auprès de l'ensemble des fabricants de chaudières biomasse

La plupart des fabricants de chaudières céréales, notamment ceux de chaudières de petites puissance (< 2 MW) n'ont pas connaissance des projets d'homogénéisation des normes européennes et des différents types de marquage CE. Il pourrait être utile de les informer des échéances et obligations prévues par la réglementation ainsi que de leur communiquer les coordonnées des laboratoires notifiés par les Etats membres (CETIAT et CTIF).

6. Groupe de travail

La création d'un groupe de travail comprenant un maximum d'acteurs de la filière semble délicate, notamment en ce qui concerne les constructeurs : ceux qui ont déjà effectué un certain nombre de recherches sur le sujet et qui sont techniquement les plus avancés seront bien sûr réticents. Il peut donc être plus judicieux d'établir des partenariats avec les constructeurs désirant lancer un programme de recherche et les différents organismes experts.

BIBLIOGRAPHIE

Titre	Forme de la source bibliographique	Auteurs	Date de publication	Secteur	Type de matériel	Type de culture annuelle	Forme du combustible	Commentaires / critères	Intérêt
"Fragen und Probleme der Stroh- und Getreideverbrennung" (Questions et problèmes de la combustion de la paille et des céréales)	Présentation d'étude 30 p.	C.A.R.M.E.N. (Dr R. Strickland)	2003 (18/01/2003)	Tous	Chaudière	Toutes céréales	Toutes	+ Publication récente + Crédibilité de la source + Adéquation avec le sujet	⊕
"Heizen mit Getreide" (Chauffage avec les céréales)	Etude 16 p.	C.A.R.M.E.N. (Dr R. Strickland)	2004 (13/09/2004)	Tous	Chaudière	Toutes céréales	Toutes	+ Publication récente + Crédibilité de la source + Adéquation avec le sujet	⊕
"Biomass combustion and co-firing : an overview" (Combustion et co-combustion de la biomasse - exposé général)	Etude 16 p.	International Energy Agency (IEA) Bioenergy	avt 2002	Domestique, collectif et industriel	Chaudière chauffère	Biomasse (bois, grain, paille, ...)	Toutes	+ Crédibilité de la source - Très général (peu voir pas de détail)	⊕
"Energieeffiziente Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiteren halmgutartigen Biomasse" (Utilisation énergétique de la paille, des céréales végétales et une autre biomasse halmgutartige)	Collectif présentations, étude, tests (*) 145 p.	F.N.R. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. : agence spécialisée des matières renouvelables)	2001 (mai 2001)	Tous	Chaudières	Toutes céréales	Toutes	+ Crédibilité de la source - Disponibilité - Pas de réelle adéquation	⊕
"AFAB's ANALYS AV LANTBRUKETS ROLL SOM ENERGIPRODUCENT" (Analyses du rôle de ragnouture dans la production d'énergie - par AFAB)	Etude 25 p.	AFAB (Swedish consulting company)	2000 (octobre 2000)	Production à la ferme	Chaudière	Toutes céréales	Toutes	+ Publication récente - pas de réelle adéquation + Entretien prévu avec les auteurs	⊕
AFAB's overview	Présentation générale 3 p.	AFAB (Swedish consulting company)	2000	Essentiellement à la ferme	Chaudière	Toutes céréales	Gran	+ Publication récente + Adéquation du sujet - Peu détaillé	⊕
"Addressing the constraints for successful replication of demonstrated technologies for co-combustion of biomass/waste"	Etude 12 p.	ENERGIE (European Commission)	2000	Medium scale power plant	Non spécifiée	Toutes céréales	Non spécifiée	- Publication peu récente - Hors sujet	⊕
"Faisabilité écologique de la valorisation énergétique de la paille en Ile-de-France"	Etude 117p.	Disagro	2001 (août 2001)	utilisation à la ferme, chauffage urbain, cogénération, co-combustion	Chaudière	Toutes céréales	Paille	+ Partie "environnement" importante (compositions, émissions, bilans...) - Pas d'informations techniques	⊕

Titre	Forme de la source bibliographique	Auteurs	Date de publication	Secteur	Type de matériel	Type de culture annuelle	Forme du combustible	Commentaires / critères	Intérêt
"Etude d'unités de production d'électricité à partir de biomasse"	Etude 103 p.	ADEME Angers Dpt Valorisation non-alimentaire des cultures	1997	industriel, tertiaire	Chaudières	Biomasse (écorce, liqueurs noires, boues d'épuration, bois de rebut, paille, paquettes bois, tourbe, bagasse)	Toutes	- 2 exemples seulement <20 MW - Pas d'exemple avec la paille <20 MW - Publication peu récente	☹️
"Les cultures ligno-cellulosiques et herbacées pour la production de biomasse à usage non alimentaire"	Fiches	ADEME (TCP (conseillers de France) Agricoles	1998	-	-	- Toutes (espèces annuelles, résidus de récolte, espèces pérennes)	-	+ Caractéristiques de chaque plante	☹️
"La Combustion - N° spécial Biomasse Actualités"	Article 4 p.	Biomasse Actualités BIDOT J.F., HOLLE J.F., REGUET A., REGUET A., SEQUIN D., SEALMONT O., FEUILLOLEY P., DAYROL F., REYNEIX M., SORBON R., ROBERT P., MONTAGNE P.	1985 (juin 1985)	Domestique agricole	Chaudière domestique à déchets agricoles	Céréales	Paille, rafle de maïs	+ Adéquation du sujet - Publication datant de 20 ans	☹️
"Les chaudières domestiques à paille : bilan d'un an d'essais sur plateforme"	Article 6 p.	GRIN rural (FEUILLOLEY P.)	1984 (sept 1984)	Domestique	Chaudière	Toutes céréales	Paille : cotés, granulés	- Publication datant de 21 ans	☹️
"Utilisation de la paille pour le chauffage individuel"	Articles 8 p.	AFME	1984	Domestique	chaudière	Toutes céréales	balles de paille, paille broyée, granulés	+ Description de tous les types de chaudières existant en 1984 - Publication datant de 21 ans	☺️
"La combustion de la paille"	Articles 7 p.	Biomasse Actualités	1982 (juillet 1982)	industriel, domestique	hautiers	Céréales	Paille	- Publication datant de 23 ans	☹️
"Faire feu de tout grain"	Dossier d'articles 8 p.	La France agricole	2005 (21 octobre 2005)	Domestique	Chaudière poêle	Céréales	Grains	+ Publication très récente + Informations diverses - Peu détaillé	☹️
"Etude sur les inserts à alimentation automatique"	Etude 42 p.	LNE (Laboratoire national d'Essais)	1996 (01 octobre 1996)	Domestique	insert (appellation un peu usurpée - plutôt poêle)	Céréales (maïs et blé), bois	Grains, granulés, paquettes	+ Eléments intéressants sur les résultats et la méthodologie + Seul support sur les poêles/inserts - Cité sur 2 modèles en particulier - très spécifique - Publication qui date	☹️

ANNEXES

A.1 Equivalences énergétiques

Produit	kWh/t	tep/t
Grain (MS)	4,941	0.417
Grain (85 % MS)	4,200	0.355
Paille (MS)	4,706	0.397
Paille (85 % MS)	4,000	0.338
Plante Entière	4,823	0.407
Plante Entière (85 % MS)	4,100	0.346
Pétrole (Fuel domestique)	11,834	1.000

Source : Arvalis

1 balle ronde = 350 kg de paille = 140 litres de fuel

1 tonne de paille = 400 litres de fuel

1 tonne de graines de céréales = 420 litres de fuel

1 tonne de paille = 2.3 stères de bois de chauffage

3 tonnes de pailles = 1 tep

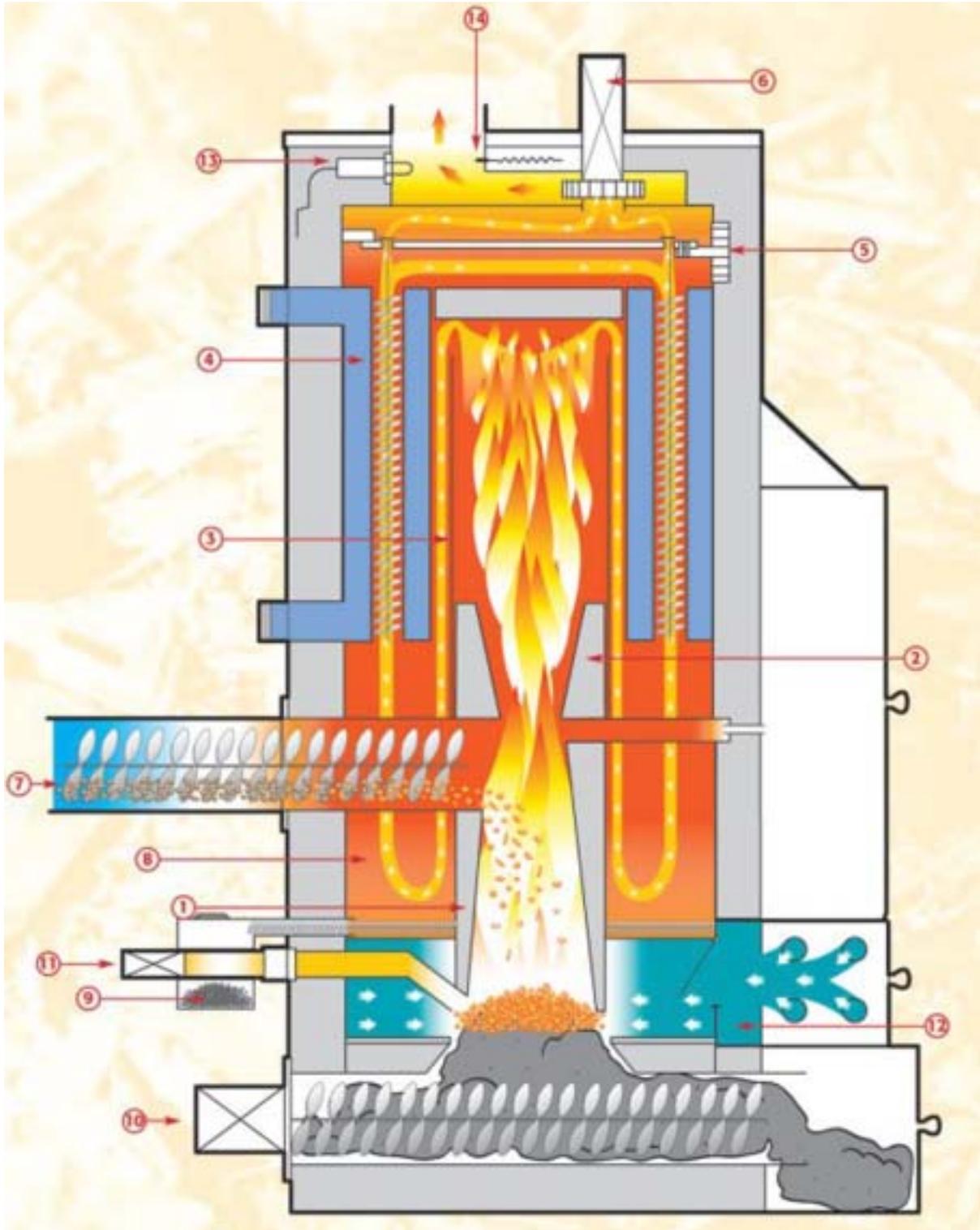
Ratios fioul/biomasse	Grains de blé (15 % d'humidité)	Grains de maïs (15 % d'humidité)	Bois déchiqueté (25 % d'humidité)	Granulés de bois (< 10 % d'humidité)
Energie massique*	2.8	2.7	3.3	2.6
Energie volumique**	3.1	3.2	9.2	3.1
Equivalence*** (en t biomasse / m3 fioul)	2.4	2.3	2.8	2.2
Prix kWh	1.6	2.1	1.7	1.1

* 1 tonne de fioul contient 2.8 fois la quantité d'énergie d'une tonne de blé.

** 1 m3 de fioul contient 3.1 fois la quantité d'énergie d'1 m3 de blé.

*** Il faut 2.2 kg de blé pour avoir la même quantité d'énergie que dans 1 litre de fioul.

A.2 Schémas des chaudières des différents constructeurs Energie Système



① Le brûleur :

C'est un cylindre en acier dans lequel est coulé du béton, tous deux réfractaire permettant ainsi de supporter une température de 1350°C.

A sa base, de nombreuses rainures permettent l'arrivée d'air primaire et secondaire et assurent une combustion presque parfaite d'une part, et d'autre part, interdisent toute montée anormale en température.

② La tuyère :

Elle est placée à la partie supérieure du brûleur et a pour rôle d'augmenter la vitesse de la flamme et d'assurer son expansion dans la chambre de combustion.

③ Le pot de combustion :

Construit en acier réfractaire, il a pour but d'améliorer la combustion lors des démarrages car il devient très vite incandescent et évite en grande partie les imbrûlés gazeux.

De plus, toutes les particules lourdes vont retomber à la base du pot et refaire un trajet dans la flamme. En outre, il permet d'éviter tout contact entre la flamme et le corps de la chaudière.

④ L'échangeur de chaleur :

Il est à trois parcours de gaz et permet d'obtenir des températures de fumées très basses tout en étant d'un encombrement réduit.

Les tubes de fumées sont munis de turbulateurs amovibles.

Cet échangeur est particulièrement performant puisque la température des fumées ne dépasse pas 140°C sur certains modèles.

⑤ Turbulateurs :

Dans chaque tube de fumées sont disposés des turbulateurs ayant pour but de faciliter l'échange thermique et permettre le nettoyage.

Ces turbulateurs sont fixés sur une couronne actionnée par un moto-réducteur dont la gestion est assurée par un microprocesseur.

⑥ L'extraction de fumées :

C'est un choix de notre société depuis de nombreuses années.

Une chaudière en dépression présente beaucoup d'avantages et, pour commencer, celui de ne pas propager le feu au silo de stockage.

Si les joints des portes ne sont pas étanches, par exemple, il n'y aura pas de dégagement de fumées, ni de CO avec tous les dangers que cela représente.

Elle est constituée d'un moteur haute température et d'une turbine à réaction, qui sont montés sur une boîte à fumées amovible, permettant ainsi l'accès total au corps de chauffe. Le moteur, à vitesse variable, piloté par un variateur, est asservi à la sonde lambda et géré par le microprocesseur.

⑦ Vis d'alimentation brûleur :

C'est une vis sans fin classique fonctionnant séquentiellement et mue par un moto-réducteur de 90 watts.

Elle n'entraîne qu'une très petite quantité de combustible tombant de l'extracteur, elle n'est jamais pleine et, de ce fait, le risque de retour de feu est pratiquement inexistant.

⑧ Chambre de décantation :

Elle permet, par diminution de la vitesse des gaz, le dépôt des particules imbrûlées et de recueillir les poussières tombées des tubes de fumées lors du fonctionnement automatique des turbulateurs.

Une vis sans fin évacue ces poussières dans un cendrier.

⑨ Dépoussiérage automatique de l'échangeur :

Une vis en inconnel mue par un moto-réducteur assure l'évacuation des poussières et des imbrûlés dans un cendrier situé à l'arrière de la chaudière et pouvant être à droite ou à gauche selon l'implantation.

⑩ Décendrage automatique du foyer :

Il s'agit d'une vis sans fin qui entraîne les cendres se trouvant sous le brûleur et ce, dans le cendrier situé à l'avant de la chaudière. L'ensemble est mû par un moto-réducteur de 90 watts et est commandé automatiquement à partir de l'armoire.

Lorsque le cendrier est plein il s'extrait du tube de décendrage.

⑪ Allumage automatique :

Il est constitué par un générateur d'air chaud indépendant, géré par le microprocesseur avec sécurité en cas de surchauffe.

⑫ Entrée d'air :

Elle est constituée par deux volets d'air assurant une distribution parfaite autour du brûleur.

Ces volets s'ouvrent par dépression lorsque la chaudière fonctionne et ne comportent, de ce fait, aucun réglage.

⑬ Sonde à oxygène (lambda) :

Elle est située au niveau de la sortie des fumées dont elle contrôle en permanence le taux d'oxygène. Elle pilote l'extracteur de fumées dont la vitesse varie en fonction des données, de manière à avoir un taux d'O₂ le plus faible possible.

Parallèlement, elle gère l'arrivée de combustible en augmentant ou diminuant les temps d'alimentation.

Elle est associée à une sonde de température de fumées afin d'assurer une gestion parfaite de la combustion. Elle est montée de série sur tous les modèles.

⑭ Sonde fumées :

Elle permet de piloter l'allumage d'une part et, d'autre part, de gérer la puissance de la chaudière. Elle protège également le corps de chauffe contre toute élévation anormale de la température.

HS France

Chaudière Multiheat

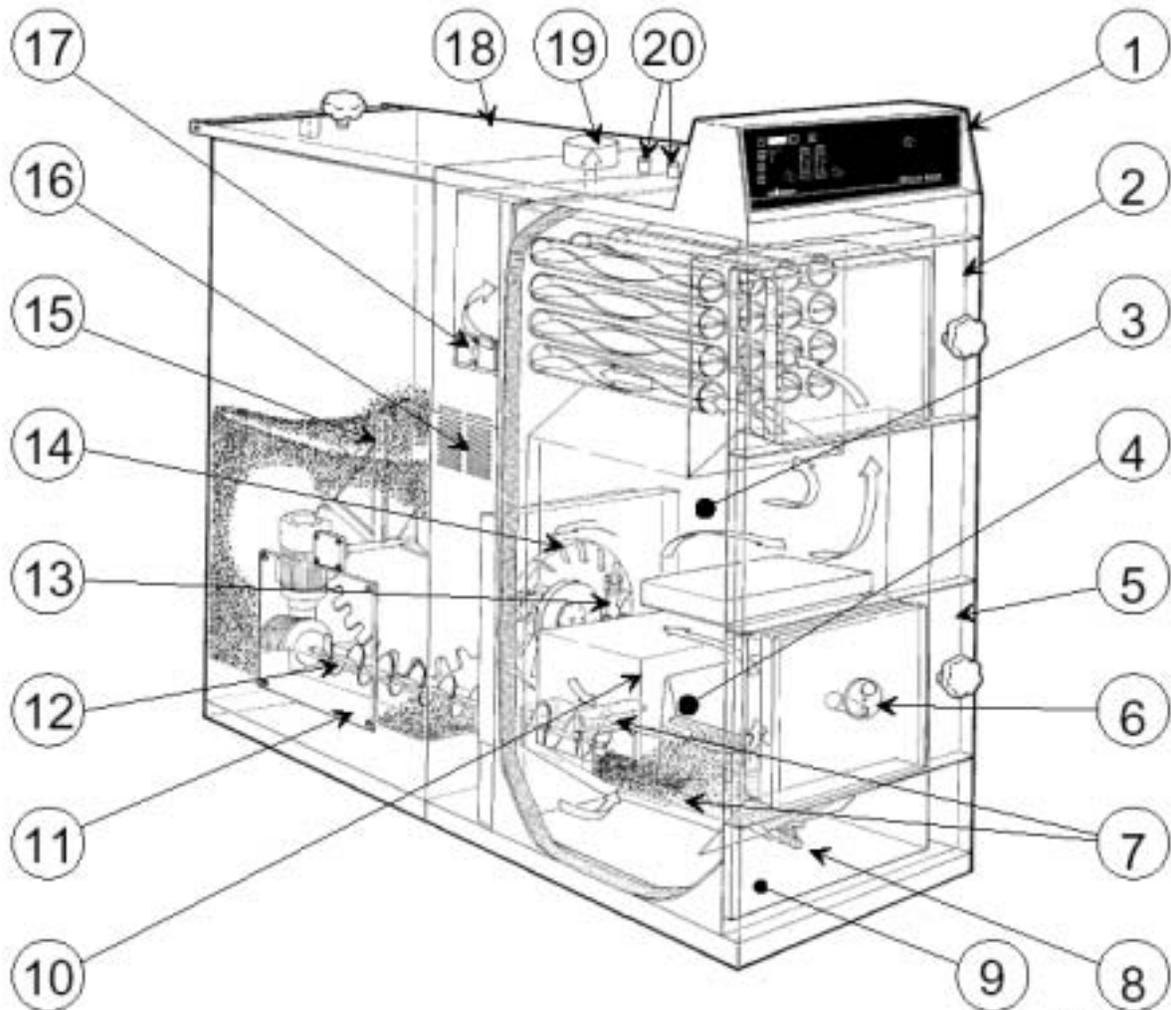
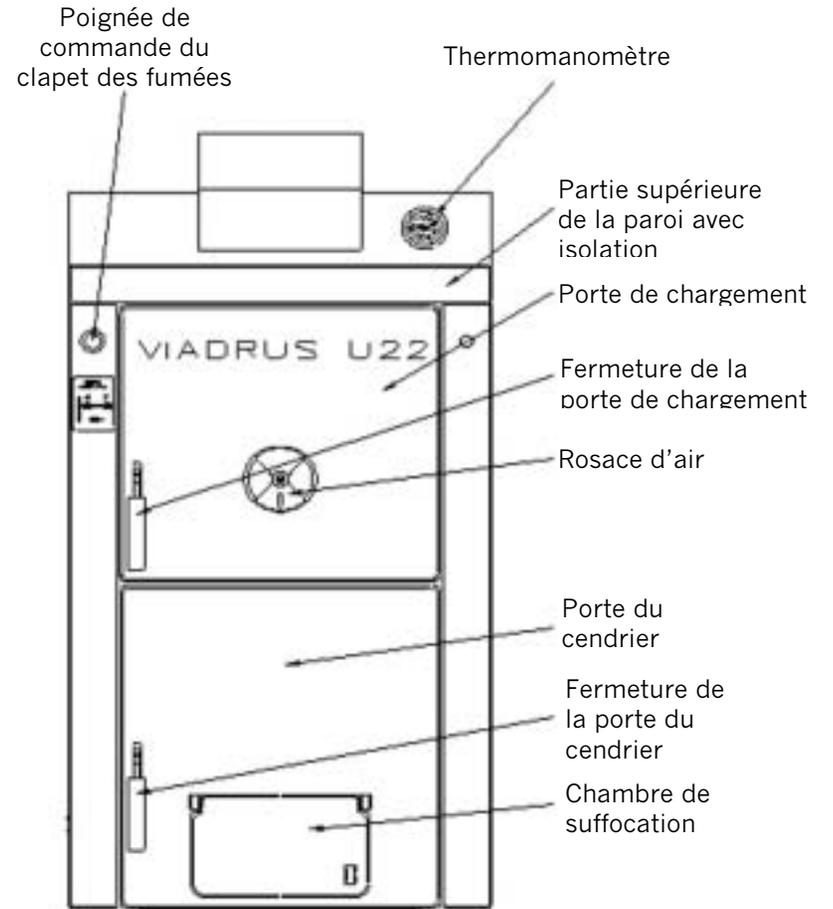
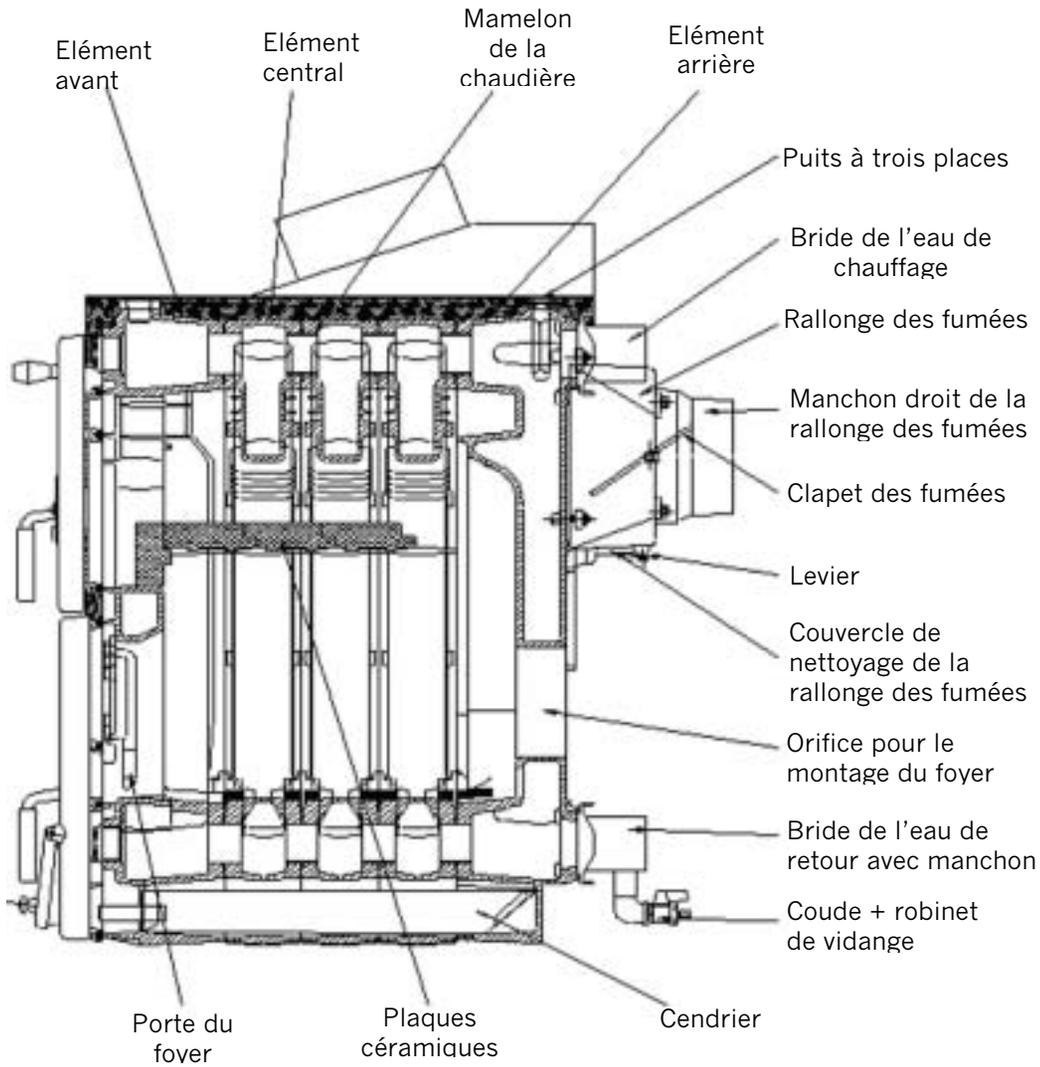


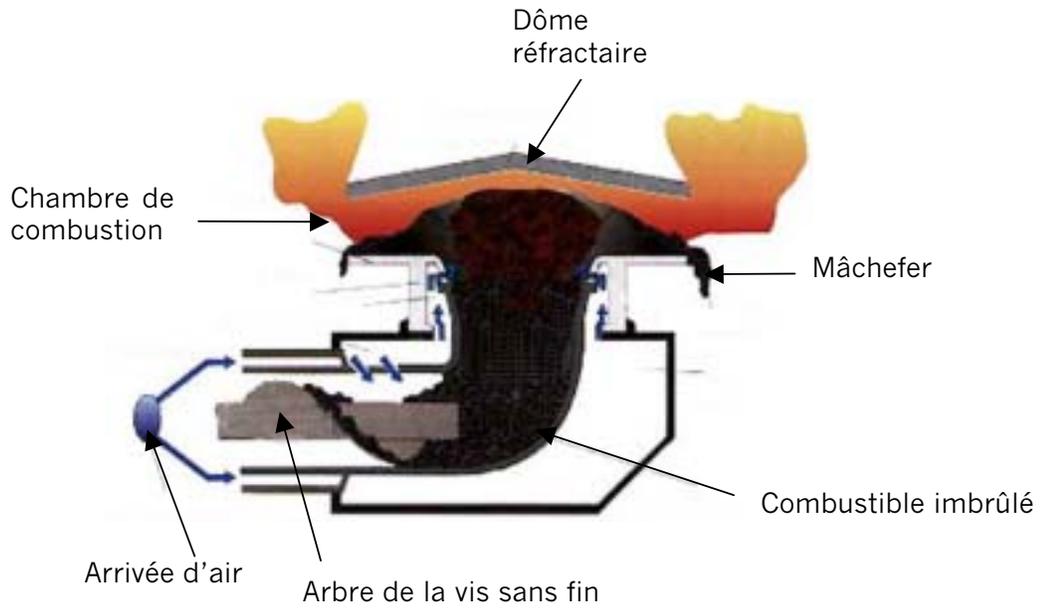
fig nr. 1.1

- | | |
|--|--|
| 1. Tableau chaudière | 14. Ventilateur |
| 2. Porte de décendrage supérieure | 15. Bras mélangeurs |
| 3. Chambre de combustion, partie supérieure | 16. Entrées d'air comburant (côté droit et gauche) |
| 4. Tunnel de combustion | 17. Trappe de décendrage (côté droit et gauche) |
| 5. Porte de décendrage inférieure | 18. Trappe de remplissage du magasin |
| 6. Éilleton de contrôle de la combustion | 19. Buse de fumées |
| 7. Orifices d'air de la combustion | 20. Départ et retour chaudière |
| 8. Robinet de vidange chaudière (pour le type 2.5, entre le magasin et la chambre de combustion) | |
| 9. Purge des canaux d'air (pour le type 2.5, juste au-dessus du socle sur le côté droit) | |
| 10. Tunnel réfractaire (cœur de la combustion) | |
| 11. Trappe de visite du magasin (côté droit et gauche) | |
| 12. Vis d'alimentation du combustible | |
| 13. Sécurité hydraulique anti-retour de flamme | |

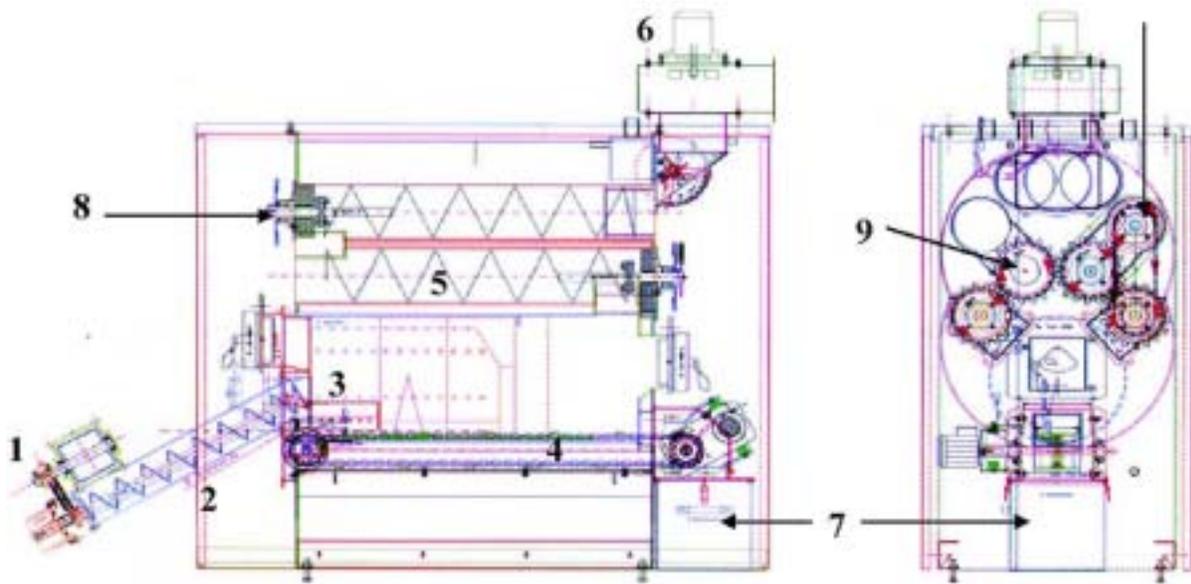
Viadrus



Benekov

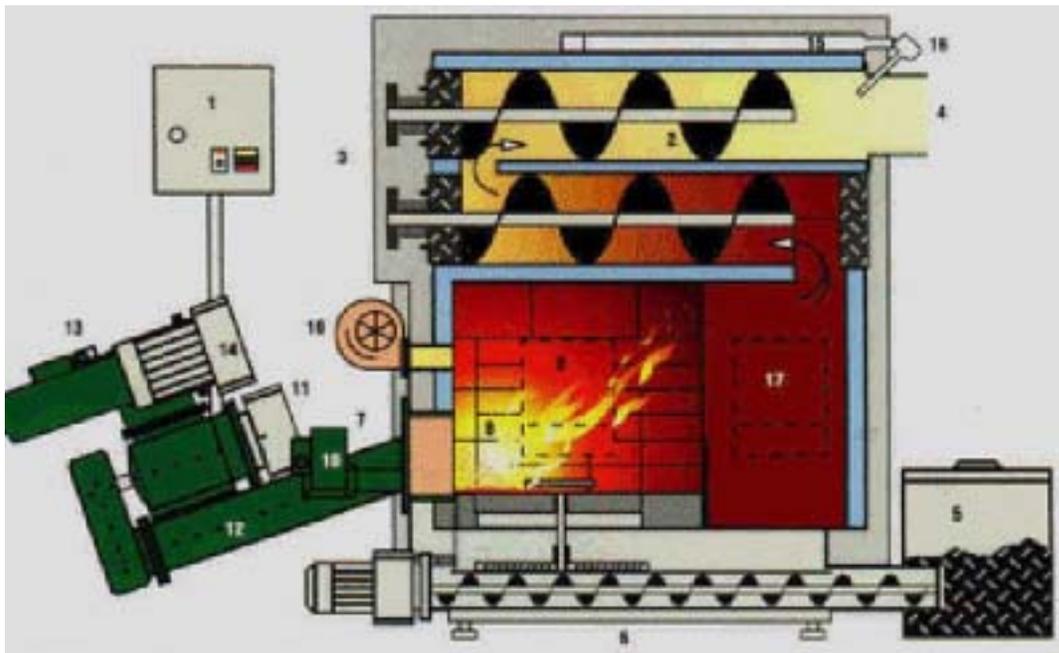


Heizomat



- 1 Ecluse
- 2 Vis d'alimentation
- 3 Brûleur / foyer
- 4 Chaîne de décendrage
- 5 Turbulateur nettoyage auto des échangeurs

- 6 Extracteur de fumée
- 7 Boîte à cendres
- 8 Engrenage d'entraînement des vis
- 9 Moteur d'engrenages



A.3 Entretien avec M.Rönnbäck du SP Swedish Testing & Research Institute -

Marie Rönnbäck fait partie du département « Energy Technology » du SP Swedish Testing and Research Institute. Elle a travaillé sur différentes études portant sur la combustion de céréales, et notamment de l'avoine. En effet, l'avoine est majoritairement utilisée en Suède lorsqu'il s'agit de combustion de céréales : cette céréale y est en effet abondante et peu chère. Sans tenir compte de l'aspect financier, l'avoine est une céréale très intéressante pour la combustion puisque la température de fusion de ses cendres est élevée (~1300°C contre ~ 800°C pour l'orge, le seigle et le blé) ce qui conduit à la formation de moins de mâchefer. L'avoine est également plus facile à allumer que la plupart des autres céréales.

Pour Marie Rönnbäck, les difficultés techniques liées à la combustion de céréales sont majoritairement les trois suivantes (sans ordre particulier) :

- la formation de mâchefer ;
- les éléments corrosifs ;
- les émissions.

➤ La formation de mâchefer :

Différents procédés sont possibles pour en diminuer la formation :

- rendre mobiles certaines parties pour brasser les cendres ;
- ajouter du calcium (sous différentes formes comme par exemple CaO) et du phosphore : le point de fusion des cendres se trouve alors élevé et la formation de mâchefer évitée.

➤ Les éléments corrosifs :

Le soufre et le chlore qui composent en partie les céréales se combinent lors de la combustion avec, respectivement, l'oxygène et l'hydrogène pour former des SO_x et de l'acide chlorhydrique. Ils se combinent également avec des métaux et se retrouvent alors dans les cendres, mais cette deuxième réaction se produit beaucoup moins que la première.

La température de condensation de SO₂ est plus basse que celle de l'acide chlorhydrique ; ce dernier est moins corrosif.

Afin d'éviter les problèmes de corrosion, il est nécessaire d'apporter une grande importance au choix des matériaux constitutifs de la chaudière mais surtout de la cheminée (la température de la cheminée étant plus basse, le phénomène de condensation y est plus important). Il faut donc veiller à ce que la température dans la cheminée (en bas et à un mètre eu-dessous du haut) et celle du retour d'eau dans la chaudière soient suffisamment hautes :

- au bas de la cheminée : $T \geq 180^{\circ}\text{C}$ (+ 20°C au dessus de ...) ;
- à un mètre en-dessous du haut de la cheminée : $T \geq 70^{\circ}\text{C}$ (+20°C au dessus de ...) ;
- dans le retour d'eau : $T \geq 70^{\circ}\text{C}$ (ceci est réalisé à l'aide d'une vanne).

L'addition de calcium pour piéger le soufre et le chlore pourrait être envisageable et doit être testée. Ces éléments se retrouveraient alors dans les cendres. Dans les installations de grande taille, l'adjonction de calcium et de NaHCO₃ est déjà utilisée : NaHCO₃ est ajouté au gaz de combustion et au combustible.

Le tirage est extrêmement important. Les dimensions de la cheminée ont donc une influence sur le bon déroulement des opérations, mais le plus important est de prévoir une deuxième arrivée d'air qui permet à une certaine quantité d'air de la pièce d'entrer dans la cheminée. Le réglage de cette seconde arrivée permet d'obtenir un tirage constant. La température des fumées est bien sûr diminuée lors de l'admission d'air ambiant, mais l'air étant plus sec, aucun problème de corrosion ne se pose à ce moment.

➤ Les émissions :

Les gaz de combustion étant acides, lorsque l'on arrive à éviter la condensation de ces gaz (donc la corrosion du matériel), un autre problème se pose : le rejet de ces substances dans la nature. Il faudrait provoquer la condensation des gaz de combustion afin de les récupérer et de les traiter. Ces procédés sont déjà à l'œuvre dans des installations de grande taille comme celles d'incinération de déchets municipaux mais coûtent trop cher pour être mis en place dans des installations de petite taille. Le passage des fumées dans un puits souterrain permettrait de provoquer leur condensation ; cette possibilité technique reste à étudier.

Les rejets sont également constitués de particules notamment de métaux sous forme d'aérosols (100 à 400 mg/Nm³) ainsi que de NO_x (les quantités sont cependant minimales, surtout si on les compare aux émissions des voitures par exemple).

Une construction plus adaptée, des conditions opératoires mieux maîtrisées et un lavage des gaz de combustion pourraient permettre des rejets moins problématiques.

➤ Pour Marie Rönnbäck, ce domaine, très nouveau, pose encore des questions fondamentales quant à sa mise en place. Celles-ci devront absolument être résolues pour continuer dans cette voie.

Il est de plus indispensable de développer une réglementation stricte, surtout en ce qui concerne les émissions : à l'heure actuelle il est généralement admis que la combustion de céréales dégage peu d'hydrocarbures imbrûlés et trop de gaz acides et de particules, mais aucune législation ne rend obligatoire l'analyse de la composition des fumées ni ne fixe des taux de rejets maximum.

Enfin, Marie Rönnbäck pense qu'il n'est peut être pas souhaitable de faire de la combustion de céréales un domaine à part entière : utiliser ces techniques lors de productions excédentaires ou à la ferme semble adapté, mais les problèmes techniques et environnementaux ne justifient pas que l'on cultive certaines céréales spécifiquement pour la production de chaleur.

A.4 Entretien avec Bengt-Erik Löfgren d'ÄFAB – Résumé

ÄFAB est une société de conseil spécialisée dans les bioénergies appliquées aux petites et moyennes puissances. Leur activité comprend la réalisation de tests sur des produits, la recherche de solution à des problèmes techniques ainsi que la formation. Bengt-Erik Löfgren est le directeur de ÄFAB.

Le contexte

M. Löfgren a tout d'abord rappelé que la surproduction de céréales en Suède est d'environ 20 %, ce qui représente un million de tonnes par an, soit 2,2 millions de tonnes paille y compris. Si l'on prend en compte les cultures qui pourraient être mises en place sur les terres laissées en jachère, la quantité de biomasse (céréales, salix, ...) qui pourrait potentiellement être utilisée pour la production d'énergie atteint les 5 millions de tonnes par an qui pourrait produire environ 20 TWh par an. La Suède est pourtant déjà l'un des pays d'Europe qui produit le plus d'énergie à partir de la biomasse (environ 25 %).

Cette situation n'est pas propre à la Suède uniquement et ne peut que prendre encore plus d'ampleur : les régions d'Europe de l'Est comprenant notamment l'Ukraine et la Biélorussie, très propices à l'agriculture, sont capables de produire suffisamment de céréales pour l'Europe entière, si toutes les terres exploitables sont cultivées.

La nécessité de trouver des débouchés autres que l'alimentation, humaine ou animale, pour cet excédent de production ressort clairement de ces remarques. Puisqu'il est possible de produire de l'électricité et de la chaleur de nombreuses façons, il est normal de laisser la priorité à la production de biocarburants. Cependant, l'excédent de production ne peut être entièrement valorisé de cette façon. De plus, certaines céréales peuvent permettre des synergies entre les différentes pistes de valorisation : le colza par exemple est utilisé pour produire du biocarburant. Le résidu, le tourteau de colza, peut alors être employé pour produire du biogaz ou encore comme matière première pour l'élaboration d'agropellets qui seront brûlés afin de produire de l'électricité ou de la chaleur.

Du point de vue des producteurs, il est plus intéressant financièrement de substituer les céréales au combustible qu'ils utilisent habituellement pour se chauffer. Cela ne pose pas de problème vis à vis des autres filières de valorisation car même en cas d'utilisation massive par tous les agriculteurs, l'excédent de production ne serait pas complètement utilisé (en Suède).

Les agropellets

Bengt-Erik Löfgren a ensuite longuement insisté sur l'idée de produire des agropellets (granulés composés de grains de céréales et de déchets agricoles divers) plutôt que d'utiliser directement les grains de céréales. Ceci est un changement qu'il faudra obligatoirement réaliser si l'on veut ouvrir le marché à tous les types de consommateurs (et non uniquement les agriculteurs).

Les agropellets ont une densité deux fois plus importante que les grains, ce qui implique une production d'énergie double pour le même poids. L'énergie nécessaire à la production de ces agropellets est de l'ordre de 5 % du PCI des grains, ce qui représente une perte faible. D'autres avantages sont :

- facilitation du transport ;
- maîtrise des ajouts d'additifs ;
- homogénéité et constance du combustible.

Enfin, et surtout, si l'agropellet présente les mêmes caractéristiques que les pellets de bois, il peut alors être utilisé dans des chaudières à granulés de bois ; les technologies existent déjà et sont performantes, ce qui permet une entrée sur un marché bien plus large et de manière beaucoup plus rapide.

Sur le plan financier, l'utilisation d'agropellets n'est alors intéressante que si le coût final du produit est inférieur ou égal au prix des granulés de bois. Les agropellets sont par exemple constitués de céréales, de tourteau de colza, de déchets agricoles et d'additifs :

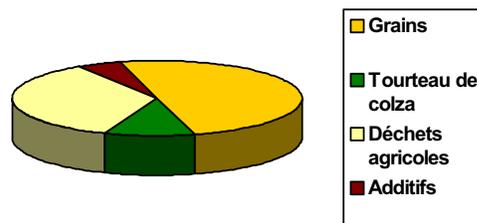


Figure 4 : Constitution d'un agropellet : exemple

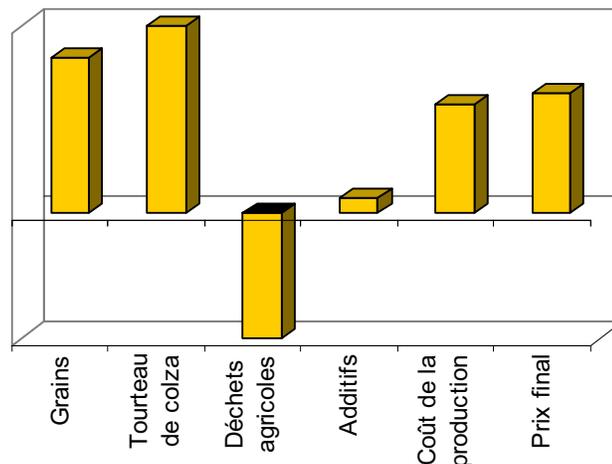


Figure 5 : Prix des éléments constitutifs d'un agropellet

- Initialement, la tonne de céréales coûte aux alentours de 100 €.
- Le tourteau de colza, plus cher que les céréales, est utilisé pour l'alimentation animale avec une surproduction d'environ 5 % (en Suède). Il contient encore 12 à 17 % d'huile, ce qui permet une augmentation du PCI du combustible ainsi que l'allongement de la durée de vie des équipements utilisés lors de la combustion ; l'allumage est également facilité, ce qui lève une barrière importante. Ces qualités contrebalancent donc son prix initial. Un inconvénient important est sa forte teneur en soufre.

- Les déchets agricoles comprennent tous les « sous produits » de la récolte : graines portées par le vent, son, paille, ... Ces produits, à l'exception de la paille, ne sont pas valorisés à l'heure actuelle et le producteur doit s'en « débarrasser ». Si l'on imagine qu'ils doivent payer un certain prix pour cette tâche, l'ajout de ces déchets permet alors de faire baisser le prix de l'agropellet. La sciure peut également être un déchet (non agricole) utilisé.

Si l'on ajoute le prix de la transformation des ces différents éléments en agropellets, il est évident que la balance financière n'est pas encore réalisée. Il est donc nécessaire de trouver le moyen de baisser le prix de ces granulés, à la suite de quoi, ils pourront être utilisés sur le marché, de la même façon et dans les mêmes équipements que les granulés de bois.

Les combustibles

A propos des différentes céréales

Pour les mêmes raisons que Marie Rönnback, Bengt-Erik Löfgren travaille plus souvent avec l'avoine comme combustible. Il souligne que l'avoine et l'orge sont a priori les céréales les plus adaptées pour la production de chaleur pour trois raisons :

- la température de fusion de leurs cendres est plus élevée, la formation de mâchefer ne se produit donc quasiment jamais ;
- la quantité de cendres produites est moins importante que pour d'autres céréales ;
- leur culture demande moins d'engrais : ils contiennent donc moins d'azote notamment, ce qui permet une formation réduite de NO_x ;
- leur cuticule est dure et moins résistante au feu.

La combustion de différentes céréales dans la même chaudière est tout à fait possible si l'appareil est conçu pour ; il existe également des chaudières élaborées spécialement pour un type de céréales en particulier (par exemple l'avoine), auquel cas les performances seront meilleures que pour l'appareil multi combustibles. Cependant, cette option est souvent appréciée des agriculteurs qui apprécient la souplesse de l'appareil.

Composition

Les céréales sont principalement constituées de glucides et de protéines. La graine est entourée d'une cuticule essentiellement constituée de cellulose, le son ; c'est la cuticule qui rend l'allumage difficile.

Le bois, quant à lui est principalement composé de cellulose (40 à 50 %), lignine (20 à 30 %) et hémicellulose (15 à 25 %).

Enfin, la paille a une composition plus proche de celle du bois que de celle des graines, puisqu'elle est riche en cellulose notamment. C'est pourquoi elle est plus facile à brûler que les grains. Elle contient de plus moins de soufre mais autant de chlore que les grains ; par contre, le point de fusion de ces cendres est plus bas (ceci n'étant pas en réel problème si l'on ajoute des additifs).

Remarque : le chanvre a une composition extrêmement proche de celle du bois.

La paille

On l'a vu, la paille semble mieux se prêter à la combustion que les grains, au vu de sa composition. Cependant, elle est beaucoup moins utilisée à cette fin que les grains pour une raison principale : les difficultés de maniement.

En effet, l'utilisation de balles entières demande des équipements adaptés, tant pour le transport, le stockage, le système d'alimentation que pour la chaudière dont les dimensions doivent être plus importantes. D'autre part, si la paille est coupée, il faut acquérir un équipement spécial, dont le prix est relativement élevé. Pour toutes ces raisons, la paille est majoritairement utilisée dans des installations de grandes puissances : 1MW au minimum.

De plus, la combustion de balles entières n'est pas très bonne : elle se fait des bords vers l'intérieure et n'est donc pas constante : les émissions sont plus élevées et le rendement plus faible.

Il est par contre très intéressant d'inclure la paille dans la composition des agropellets, puisque c'est un bon combustible.

La plante entière

La combustion de plantes entières est réalisée uniquement pour des chaudières de grande puissance pour des questions de volume du combustible. La plante entière est un bon combustible. De plus, l'allumage est relativement aisé.

Mode de fonctionnement de la chaudière

Le mode de fonctionnement le plus optimisé est le fonctionnement alternatif : la chaudière fonctionne à 100 % de sa puissance pendant un laps de temps suffisant pour chauffer le contenu d'un ballon d'accumulation, puis s'arrête entièrement (pas de maintien de feu). Lorsque la chaudière est allumée, la température de combustion est toujours élevée ce qui permet une réduction des problèmes de corrosion, et la combustion est complète (chaudière utilisée à sa puissance nominale). Ce fonctionnement implique l'utilisation d'un allumage automatique.

Par exemple, pour chauffer une maison individuelle dont les besoins se montent à 3 kW en été et 10 kW en hiver, avec une chaudière de 18 kW, un ballon de 500 L (soit 30 kWh) serait adapté. Voici le déroulement des phases de fonctionnement :

- Été : puisque la maison a besoin en permanence de 3 kW, la puissance que la chaudière consacre au chauffage du ballon d'accumulation est de 15 kW. Deux heures sont alors nécessaires pour chauffer l'intégralité de l'eau contenue dans le ballon. Au bout de deux heures, la chaudière s'arrête complètement et ne se rallume qu'au bout de 10 heures, le ballon de stockage prenant le relais pendant ce temps en diffusant la chaleur qu'il a accumulée. Elle effectue deux cycles par jour.
- Hiver : puisque la maison a besoin en permanence de 10 kW, 8 kW sont consacrées au chauffage du ballon. La chaudière fonctionne donc pendant presque trois heures puis s'arrête et ne reprend que trois heures plus tard. Elle effectue trois cycles et demi par jour.

La combustion étant moins bonne au démarrage, les émissions atmosphériques le seront aussi mais la durée de cette phase est courte (5 – 10 minutes), ce qui rend ce problème marginal.

D'autre part, les chaudières ne fonctionnant pas selon ce schéma entrent dans une phase de maintien de feu ou veille lorsque la température de consigne est atteinte. Lors de cette phase, les émissions sont particulièrement mauvaises.

Le fonctionnement idéal serait celui qui suit la courbe de besoins de la maison ; cependant, à l'heure actuelle, ce mode de fonctionnement a de très mauvais résultats en terme d'émissions et de corrosion.

Les brûleurs

Le brûleur peut être interne, situé à l'intérieur de la chambre de combustion, ou externe à la chaudière. En ce qui concerne la combustion, les émissions et la formation de mâchefer, les deux technologies sont équivalentes.

Le brûleur externe

Seule la tête du brûleur pénètre dans la chaudière. Puisqu'il est externe, les pertes de chaleur, principalement par radiation, sont plus importantes et le rendement plus faible.

Les brûleurs externes sont généralement dédiés aux combustibles humides. Les parois sont recouvertes de céramique ce qui permet d'augmenter la température à l'intérieur et de sécher le combustible dans un premier temps.

Si l'on utilise un brûleur externe pour brûler des combustibles secs, la température dans le brûleur va être très élevée (les parois sont constituées de céramique, matériau réfractaire mais le combustible ne contient pas d'eau à faire évaporer), et la formation de NO_x sera plus importante.

Ce type de brûleurs est plus cher (à cause de la céramique qui recouvre les parois), mais les combustibles humides étant généralement moins cher, il n'y finalement pas de grosse différence sur ce plan avec un brûleur interne.

Enfin un brûleur externe est facilement remplaçable en cas d'usure ou si l'on désire changer de combustible et avoir un brûleur adapté au nouveau combustible.

Le brûleur interne

Ces brûleurs sont plus adaptés aux combustibles secs : les parois ne sont pas en céramique réfractaire (à l'exception de la paroi supérieure généralement). La température ne serait donc pas suffisante pour sécher un combustible humide. L'utilité de poser de la céramique sur la paroi supérieure réside dans une aide à l'allumage.

Si l'on recouvrait entièrement le brûleur de céramique, la température serait trop élevée et la formation de NO_x et de mâchefer plus importante.

Dans l'absolu, il est préférable de posséder un brûleur interne, puisque le plus souvent les brûleurs externes sont moins bien adaptés au combustible car les constructeurs de brûleurs font des compromis pour que leur modèle puisse convenir pour le maximum de chaudières.

L'allumage

L'allumage des céréales, c'est-à-dire l'initiation de la combustion, est rendu particulièrement difficile par la présence de la cuticule qui enveloppe la graine, particulièrement dure et résistante au feu.

C'est pourquoi certains constructeurs choisissent de n'allumer la chaudière qu'une fois au début de la saison de chauffe, à l'aide de petit bois, et de la laisser en mode veille lorsqu'elle n'est pas utilisée.

D'autres constructeurs préfèrent utiliser un allumage automatique, qui consommera beaucoup d'énergie (environ 1000 W) pendant un court laps de temps et éteindra complètement la chaudière entre les périodes d'utilisation. L'allumage automatique peut rencontrer des problèmes si le brûleur est mal nettoyé et que de la cendre empêche le contact avec les grains.

La régulation

Il est préférable qu'elle soit entièrement automatisée pour plus de précision quant au réglage des paramètres de combustion et de confort pour l'utilisateur. En effet, il est primordial que la combustion soit la plus régulière possible et donc la flamme la plus stable possible. Pour cela, il est important que le flux d'air et l'apport en combustible soient les plus constants possibles.

Taux d'humidité

Il est important que le taux d'humidité d'un combustible humide ne dépasse pas 10 à 12 % sous peine de moisir pendant le stockage.

En ce qui concerne le séchage du combustible, il est recommandé de valoriser la chaleur des fumées d'échappement pour procéder au séchage. Celui-ci est en effet très cher s'il est réalisé avec du gaz ou du fioul.

Les émissions

Les rejets acides

Si les fumées ne sont pas condensées volontairement afin de récupérer et de traiter les rejets acides, ceux-ci vont se condenser d'eux-mêmes et retomber dans la nature. Ce phénomène ne représente pas un problème important si l'utilisation de chaudières céréales reste marginale. Les fumées de combustion sont environ dix fois plus acides avec des grains qu'avec du fioul ou du bois.

Il existe plusieurs solutions :

- l'ajout de bicarbonate de soude (1 à 2 %) aux grains. Quand les grains sont brûlés, le volume du bicarbonate de soude augmente de manière importante, ce qui rend le mélange poreux. Le soufre et le chlore sont alors piégés dans les trous avant de se combiner et de former des acides. Ces éléments se retrouvent alors dans les cendres, qui peuvent être réutilisées en tant qu'engrais. Le point faible de cette solution est la difficulté de réaliser un mélange correct.

Remarque : l'ajout de bicarbonate de soude a comme effet la baisse de la température de fusion des cendres (formation de mâchefer facilitée) ; c'est pourquoi il faut alors également adjoindre de la chaux vive pour contrecarrer ce phénomène ;

- le passage des fumées de combustion dans un puits souterrain : voir l'entretien avec Marie Rönnback.

L'acide sulfurique provoque plus de dégâts que l'acide chlorhydrique, même s'il est moins corrosif car la température de son point de rosée est plus basse. Pour limiter les problèmes de corrosion de la cheminée, il est important que celle-ci soit constituée de céramique.

Les oxydes d'azote NO_x

Toutes les combustions à haute température et haute pression produisent des NO_x . Leur formation est diminuée si la chambre de combustion est suffisamment grande : la dépression ainsi créée donne une vitesse plus grande aux gaz, et les NO_x n'ont alors pas le temps de se former. Il est également intéressant d'établir une réaction non stoechiométrique (pas assez d' O_2) en premier lieu de manière à empêcher la formation de NO_x ; la réaction doit ensuite être stoechiométrique sous peine de formation de monoxyde de carbone, d'imbrûlés, etc.

Les hydrocarbures

Les émissions d'hydrocarbures imbrûlés, de COV (composés organiques volatiles), de HAP (Hydrocarbures aromatiques Polycycliques), de méthane ne sont plus importantes lors de la combustion de céréales que lors de la combustion de granulés de bois.

Les poussières

Les émissions de poussières et de particules sont élevées. Il n'existe pour l'instant aucune législation (qu'elle soit suédoise ou européenne), mais il est probable que lorsque celle-ci sera fixée, les seuils concernant les poussières et les particules seront difficiles à atteindre.

Il existe différentes technologies de filtres qui peuvent être ajoutés pour nettoyer les fumées des poussières et des particules. Il peut également être intéressant de laver le combustible avant la combustion ; cependant, une partie des particules (environ 25 %) sont formées pendant la combustion (aérosols).

Le tirage

Le tirage joue un rôle important dans le bon déroulement des opérations : il est primordial qu'il soit le plus constant possible. C'est pourquoi, une entrée d'air est aménagée sur le conduit de cheminée : l'air entrant provient de la pièce dans laquelle est située la chaudière.

Si le tirage est trop faible, l'entrée d'air est ouverte : la température des fumées est alors diminuée, mais comme les fumées sont dans le même temps séchées par l'air sec entrant, il n'y a pas plus de problème de corrosion qu'en temps normal. Si le tirage est suffisant ou trop important, l'entrée d'air est fermée.

Les dimensions de la cheminée sont également très importantes : elles doivent être suffisamment grandes pour permettre un tirage correct.

Les principaux problèmes techniques

Très souvent, les problèmes rencontrés par les utilisateurs viennent d'une mauvaise installation de leur chaudière. En Suède comme en France, les installateurs sont peu habitués à installer des chaudières à céréales, et connaissent mal leurs spécificités : problème d'allumage, de corrosion, de formation de mâchefer. Or, une part importante des réglages se fait lors de l'installation. C'est pourquoi, il est primordial

de former les installateurs de manière, notamment, à pouvoir introduire plus d'électronique dans la conception de la chaudière, c'est-à-dire plus d'automatisme.

L'alimentation en combustible et le décendrage sont les deux points faibles des chaudières céréales :

- alimentation en fioul : si le silo n'est pas correctement conçu (murs lisses alors qu'il est préférable qu'ils soient granuleux, mauvaise inclinaison de la partie basse), si des pierres se sont glissées à l'intérieur du silo, etc. il est possible que le tuyau d'amenée du combustible se bouche.
- Décendrage : le décendrage est une opération délicate du fait de l'importante production de cendres lors de la combustion de céréales. De nombreux systèmes de décendrage automatiques existent possédant chacun leurs caractéristiques. S'ils sont mal pensés, les problèmes occasionnés peuvent être lourds à gérer (nettoyages très fréquents) sous peine d'arrêt de la chaudière.
Si le décendrage est manuel, les résultats sont moins bons : alors qu'il est réalisé toutes les 15 minutes environ lorsqu'il est automatique, il n'est fait qu'une fois par jour au maximum quand il est manuel. La combustion est alors moins bonne et le taux d'imbrûlés augmente.

Prix des équipements

Les chaudières à céréales ont pour l'instant un coût plus élevé que les chaudières à granulés de bois : ceci est dû à la part importante de l'électronique constituant la machine (ci celle-ci est automatisée) et aux matériaux utilisés (notamment en prévention des problèmes de corrosion et en réponse aux difficultés d'allumage).

Recommandation générale

Il est important de ne pas chercher à économiser lorsque l'on procède à l'achat de la chaudière. Acheter un équipement plus cher mais de meilleure qualité est un bien meilleur calcul.

A.5 Statistiques agricoles annuelles (SAA) – AGRESTE

Résultats 2004 pour les céréales, oléagineux et protéagineux

CULTURES	SUPERFICIE DEVELOPPEE (ha)			RENDEMENT (100 kg/ha)		PRODUCTION RECOLTEE (tonne)		
	2003	2004	INDICE 2004/2003	2003	2004	2003	2004	INDICE 2004/2003
CEREALES (y c. semences)								
Blé tendre d'hiver	4 494 737	4 817 057	107,2	64	78	28 882 434	37 517 721	129,9
Blé tendre de printemps	29 670	15 700	52,9	58	70	171 266	109 405	63,9
Total blé tendre	4 524 407	4 832 757	106,8	64	78	29 053 700	37 627 126	129,5
Blé dur d'hiver	306 720	400 968	130,7	39	51	1 199 812	2 051 456	171,0
Blé dur de printemps	45 970	5 680	12,4	49	60	227 530	33 875	14,9
Total blé dur	352 690	406 648	115,3	40	51	1 427 342	2 085 331	146,1
Seigle	27 890	33 654	120,7	40	51	112 338	169 979	151,3
Orge et escourgeon d'hiver	1 060 980	1 040 984	98,1	55	70	5 881 790	7 312 477	124,3
Orge et escourgeon de printemps	697 492	589 197	84,5	57	63	3 965 196	3 713 864	93,7
Total orge et escourgeon	1 758 472	1 630 181	92,7	56	68	9 846 986	11 026 341	112,0
Avoine d'hiver	56 643	68 049	120,1	42	49	236 575	331 562	140,2
Avoine de printemps	79 895	57 571	72,1	40	47	318 927	271 784	85,2
Total avoine	136 538	125 620	92,0	41	48	555 502	603 346	108,6
Mais grain	1 634 924	1 766 575	108,1	73	92	11 910 851	16 180 636	135,8
<i>dont maïs-grain irrigué</i>	<i>734 660</i>	<i>755 392</i>	<i>102,8</i>	<i>89</i>	<i>103</i>	<i>6 557 625</i>	<i>7 750 758</i>	<i>118,2</i>
<i>dont maïs-grain non irrigué</i>	<i>900 264</i>	<i>1 011 183</i>	<i>112,3</i>	<i>59</i>	<i>83</i>	<i>5 353 226</i>	<i>8 429 878</i>	<i>157,5</i>
Mais semence	49 615	55 734	112,3	27	35	134 015	197 347	147,3
Total maïs	1 684 539	1 822 309	108,2	72	90	12 044 866	16 377 982	136,0
Sorgho	61 006	47 876	78,5	38	54	230 771	257 144	111,4
Triticale	290 095	327 668	113,0	44	56	1 282 134	1 830 742	142,8
Autres céréales non mélangées	37 052	40 036	108,1	28	35	102 756	140 497	136,7
Mélanges (y c. méteil)	59 883	62 284	104,0	37	43	218 855	270 863	123,8
TOTAL CEREALES (sauf riz)	8 932 572	9 329 033	104,4	61	75	54 875 249	70 389 351	128,3
Riz	19 040	20 160	105,9	56	57	106 723	115 110	107,9
TOTAL TOUTES CEREALES	8 951 612	9 349 193	104,4	61	75	54 981 972	70 504 461	128,2
OLEAGINEUX (y c. semences)								
Colza d'hiver (et navette)	1 071 309	1 118 267	104,4	31	36	3 339 792	3 972 642	118,9
Colza de printemps (et navette)	11 319	7 983	70,5	26	27	29 322	21 926	74,8
Total colza (et navette)	1 082 628	1 126 250	104,0	31	35	3 369 114	3 994 568	118,6
<i>dont colza non alimentaire</i>	<i>300 331</i>	<i>218 329</i>	<i>72,7</i>	<i>32</i>	<i>36</i>	<i>951 769</i>	<i>794 911</i>	<i>83,5</i>
Tournesol	694 405	615 769	88,7	22	24	1 511 740	1 461 508	96,7
Soja	80 747	58 634	72,6	18	25	147 368	147 053	99,8
Lin oléagineux	5 610	6 172	110,0	19	20	10 909	12 558	115,1
Autres oléagineux	1 393	1 130	81,1	13	18	1 754	2 042	116,4
TOTAL OLEAGINEUX	1 864 783	1 807 955	97,0	27	31	5 040 884	5 617 729	111,4
PROTEAGINEUX (y c. semences)								
Féveroles (et fèves)	78 490	79 615	101,4	35	46	275 246	365 574	132,8
Pois protéagineux	365 444	356 705	97,6	44	47	1 613 796	1 680 499	104,1
Lupin doux	11 109	8 983	80,9	22	25	23 958	22 106	92,3
TOTAL PROTEAGINEUX	455 043	445 303	97,9	42	46	1 912 999	2 068 179	108,1