

Combustion de mélanges, combustibles classiques/biomasse

Etude des modifications induites au niveau de la composition des fumées et des cendres





ETUDE N° 00-0219/1A

**COMBUSTION DE MELANGES, COMBUSTIBLES
CLASSIQUES/BIOMASSE**

**ETUDE DES MODIFICATIONS INDUITES AU NIVEAU DE
LA COMPOSITION DES FUMÉES ET DES CENDRES**

RAPPORT FINAL

septembre 2001

J.-C. GOUDEAU - Laboratoire de Combustion et de Détonique ENSMA POITIERS

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Combustion de mélanges, combustibles classiques/biomasse. Etude des modifications induites au niveau de la composition des fumées et des cendres, 2001, 63 p, n°00-0219/1A.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2001

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| RESUME | 1 |
| INTRODUCTION | 2 |
| I - REGLEMENTATION SUR LES REJETS POLLUANTS DE LA COMBUSTION DE LA BIOMASSE ET DE L'INCINERATION DES DECHETS | 4 |
| II - COMBUSTION DES SOLIDES – TECHNOLOGIES UTILISEES | 8 |
| 1 – LE FOUR A GRILLES : | 8 |
| 2 – LES FOURS A LIT FLUIDISE : | 10 |
| 3 – LE FOUR ROTATIF : | 12 |
| 4 – LES FOURS A CHARBON PULVERISE : | 13 |
| III - COMBUSTIBLES FOSSILES | 15 |
| 1 - LE CHARBON | 15 |
| 2 - LES COMBUSTIBLES LIQUIDES..... | 17 |
| 3 - LES COMBUSTIBLES GAZEUX | 18 |
| IV - MONOCOMBUSTION DE LA BIOMASSE | 22 |
| 1 – COMBUSTION EN FOURS A GRILLES : | 24 |
| a) Influence de la composition de la biomasse : | 24 |
| b) Influence du mode d'alimentation du four : | 26 |
| c) Emissions polluantes : | 27 |
| 2 – COMBUSTION EN FOURS A LIT FLUIDISE : | 28 |
| a) Fusibilité des cendres – frittage – Encrassage : | 32 |
| 3- -SYNTHESE SUR LES POLLUANTS ISSUS DE LA MONOCOMBUSTION DE LA BIOMASSE : | 35 |
| 4 - CONCLUSION | 36 |
| V – COCOMBUSTION CHARBON – BIOMASSE | 38 |
| 1 – CHAUDIERE A CHARBON PULVERISE : | 39 |
| a) Performance thermique de la chaudière – Granulométrie - Polluants..... | 39 |
| b) Effet du type de brûleur et du mode d'injection des combustibles sur la cocombustion et sur les polluants émis..... | 42 |
| c) Etagements du comburant et du combustible : | 45 |
| 2 – FOURS A LIT FLUIDISE : | 46 |
| a) Effet de l'étagement du comburant : | 48 |
| b) Comparaison Lit Fluidisé Dense (LFD)et Lit Fluidisé Circulant (LFC) | 49 |
| 3 – FOURS A GRILLES: | 49 |
| 4 - SYNTHESE SUR LES POLLUANTS EMIS EN COCOMBUSTION : | 51 |
| 5 - CONCLUSION : | 52 |
| CONCLUSION | 54 |
| BIBLIOGRAPHIE | 57 |

RESUME

Les craintes de réchauffement de la planète, à cause des émissions de gaz à effet de serre, se précisent suite aux nombreuses catastrophes climatiques de ces dernières années. Cette situation relance le débat sur les sources d'énergie en général et sur les bioénergies en particulier. La biomasse est une réalité quantitative de la biosphère. Les bioénergies d'origine agricole et forestière représentent 5 % de la consommation annuelle d'énergie en France. La biomasse peut donc constituer une alternative crédible aux énergies fossiles courantes dont l'utilisation participe significativement à l'augmentation de l'effet de serre. Les caractéristiques physico-chimiques et énergétiques de la biomasse rendent sa combustion difficile à l'échelle industrielle. La combustion de mélanges biomasse – combustibles fossiles présente un double avantage économique et environnemental. Sur le plan économique, cette cocombustion permet une valorisation de la biomasse dont le coût reste compétitif par rapport aux combustibles fossiles. Les études de cocombustion charbon – biomasse montrent que ce mélange permet un abattement des oxydes d'azote et de soufre. Cette réduction dépend du type de technologie utilisé et des conditions opératoires. Ces études sont réalisées sur des installations déjà existantes et initialement conçues pour la combustion du charbon seul. De ce fait de nombreuses modifications sont faites pour les adapter aux besoins de la cocombustion. Cette étude bibliographique révèle le besoin d'études supplémentaires sur la cocombustion de mélanges biomasse – combustibles fossiles classiques. En effet des essais menés sur des dispositifs semi-industriels spécialement conçus pour ce type d'étude permettraient d'accroître les possibilités de valorisation de la biomasse à l'échelle industrielle.

Mots clés : Biomasse, Charbon, Cocombustion, NO_x, SO₂

INTRODUCTION

La multiplication des catastrophes climatiques survenues pendant la dernière décennie relance les craintes sur les émissions de gaz à effet de serre. De plus, les fluctuations incontrôlées des prix du pétrole et la volonté affichée de certains pays industriels de diversifier leurs sources d'approvisionnement en énergie soulèvent à nouveau le débat sur les énergies renouvelables.

La biomasse est dans ce cadre une solution envisageable et intéressante. Les bioénergies d'origine agricole ou forestière issues des ressources naturelles renouvelables représentent 3 % du bilan énergétique de l'Union Européenne. En ce qui concerne la France, 5 % de sa consommation annuelle d'énergie, soit 10 millions de tonnes équivalent pétrole sont issus de ce type d'énergie [ADEME, 1998].

Les procédés de valorisation de la biomasse sont multiples. Ils vont de l'épandage à la gazéification en passant par la combustion et la liquéfaction. Dans cette étude, nous nous limiterons à la valorisation par la combustion. Ce procédé très usité continue de subir en permanence des modifications permettant de l'adapter aux unités industrielles et de réduire les émissions polluantes.

L'usage de la biomasse en substitution des combustibles fossiles ou encore en mélange avec ceux-ci permettrait de réduire la consommation de ces combustibles coûteux et dont les gisements ne sont pas inépuisables. La combustion de ce mélange permettrait aussi de pas augmenter les émissions en dioxyde de carbone ainsi que des oxydes d'azote et de soufre qui contribuent à l'augmentation de l'effet de serre et aux pluies acides. En effet, la combustion de la biomasse conduit à la formation de CO₂, mais le bilan global est nul car la quantité rejetée pendant la combustion correspond à celle captée par le résidu agricole pour sa croissance. Il est ainsi possible d'entretenir un cycle viable au plan économique et environnemental.

La présente étude à caractère bibliographique est consacrée à l'analyse des modifications induites par la cocombustion biomasse – combustibles fossiles sur les émissions gazeuses et solides. La littérature relate essentiellement la cocombustion charbon – biomasse.

La première partie de ce rapport présente les diverses technologies utilisées pour la combustion des déchets solides. La combustion de la biomasse seule ou en mélange avec les combustibles fossiles se fait en général dans des dispositifs tels que les fours à grilles, les fours à lit fluidisés ou encore les chaudières à charbon pulvérisés. Il est souvent nécessaire de modifier ces dispositifs pour réaliser cette cocombustion.

La description de la structure physico-chimique des combustibles fossiles classiques et plus particulièrement du charbon fait l'objet de la deuxième partie du rapport. Ce combustible est caractérisé par un pouvoir calorifique nettement plus élevé que celui de la biomasse ainsi que par sa richesse en carbone et en soufre. Ces éléments sont susceptibles de se transformer lors de la combustion en espèces polluantes, CO, SO_x, NO_x.

Le troisième chapitre traite de la monocombustion de la biomasse. Les résultats des études réalisées sont présentés selon le type de technologie utilisée.

Les propriétés physico-chimiques de la biomasse et plus particulièrement des résidus végétaux agricoles (faible masse volumique, faible P.C.I., richesse en espèces volatiles et teneur élevée de cendres) rendent leur conditionnement et leur combustion moins aisés que ceux du charbon. Les difficultés rencontrées varient selon la technologie utilisée.

Les caractéristiques de la cocombustion charbon – biomasse sont présentées dans le dernier chapitre de ce rapport en fonction du type de dispositif expérimental utilisé. Pour chaque dispositif, les effets du mode d'alimentation de la chaudière, de l'étagement du combustible et/ou du comburant sont étudiés. Les modifications que cette cocombustion permet d'obtenir sur les émissions solides et gazeuses sont décrites.

I - REGLEMENTATION SUR LES REJETS POLLUANTS DE LA COMBUSTION DE LA BIOMASSE ET DE L'INCINERATION DES DECHETS

En matière de norme sur les polluants issus de la combustion en général, il faut distinguer les normes de rejet concernant la combustion des combustibles fossiles classiques (charbon, pétrole, gaz) de celles de l'incinération des déchets. Dans ce dernier cas, la réglementation est fonction de la puissance de la technologie utilisée, de la nature du déchet et du fait que l'incinération s'accompagne ou pas d'une récupération d'énergie.

La réglementation sur les rejets dans l'air appliquée à la combustion de la biomasse est résumée dans le tableau de la page 7 [S. BOUVOT-MAUDUIT]. Quant aux normes de rejet concernant l'incinération des déchets et la co-incinération de ceux-ci avec la biomasse, nous nous sommes inspirés de la **Directive 2000/76/CE** du parlement européen et du **Conseil du 4 décembre 2000** sur l'incinération des déchets. Cette directive constitue le document dont devront s'inspirer largement les pays membres de l'Union Européenne dans l'établissement des lois nationales en matière d'environnement. Elle a pour objectif de prévenir ou de limiter dans toute la mesure du possible les effets négatifs de l'incinération et de la co-incinération des déchets sur l'environnement et en particulier la pollution due aux émissions dans l'air, le sol, les eaux de surface et les eaux souterraines, ainsi que les risques qui en résultent pour la santé des personnes. L'article 2 de cette directive stipule qu'elle s'applique aux installations d'incinération et de co-incinération. Toutefois, sont exclues du champ d'application de la présente directive les installations où sont traitées exclusivement les déchets suivants :

- déchets végétaux agricoles et forestiers,
- déchets végétaux provenant du secteur de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée,
- déchets végétaux fibreux issus de la production de la pâte vierge et de la production du papier au départ de la pâte, s'ils sont co-incinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée,
- déchets de bois à l'exception de ceux susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds.

L'article 7 de cette directive fixe les valeurs des charges et des seuils critiques des substances polluantes telles que les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO), les poussières, les métaux lourds et les dioxines. Les installations d'incinération et de co-incinération doivent être conçues, construites, équipées et exploitées de manière à ce que les valeurs limites d'émissions de ces substances ne soient pas dépassées dans les gaz d'échappement. Les résultats des mesures (qui doivent être effectuées en continu) pour vérifier le respect des valeurs limites d'émission doivent être rapportées aux conditions normales de température et de pression (273 K, 101,3 kPa) et une teneur en oxygène de 11 %, gaz secs.

L'article 7 de la directive fixe les limites ci-dessous en fonction des types d'installation :

Fours à Ciment :

☞ Jusqu'au 1^{er} janvier 2008, les autorités compétentes peuvent accorder des dérogations pour les **NO_x** pour les fours à ciment existant utilisant le procédé en voie humide ou pour les fours à ciment qui brûlent moins de 3 tonnes de déchets par heure à condition que le permis prévoit pour le NO_x une valeur limite d'émission totale n'excédant pas **1200 mg.m⁻³**.

☞ Jusqu'au 1^{er} janvier 2008, les autorités compétentes peuvent accorder des dérogations pour les **poussières** pour les fours à ciment existant utilisant le procédé en voie humide ou pour les four à ciment qui brûlent moins de 3 tonnes de déchets par heure à condition que le permis prévoit pour les poussières une valeur limite d'émission totale n'excédant pas **50 g.m⁻³**.

Installations de Co-incinération

☞ Jusqu'au 1^{er} janvier 2008, les autorités compétentes peuvent accorder des dérogations pour les NO_x et le SO₂ pour les installations de co-incinération existantes d'une capacité comprise entre **100 et 300 MWth** utilisant la technique du lit fluidisé et brûlant des combustibles solides à condition que le permis prévoit pour ce procédé une valeur n'excédant pas **350 mg.Nm⁻³** pour le **NO_x** et **850 à 400 mg.Nm⁻³** (décroissance linéaire de 100 à 300 MWth) pour le **SO₂**.

☞ En ce qui concerne la biomasse, les autorités compétentes peuvent accorder des dérogations pour les NO_x pour les installations de co-incinération existantes d'une capacité comprise entre **100 et 300 MWth** utilisant la technique du lit fluidisé et brûlant de la biomasse, à condition que le permis prévoit pour ce procédé une valeur n'excédant pas **350 mg.Nm⁻³** (pour une teneur en oxygène de 6 %).

Valeurs limites journalières en fonction de la quantité de déchets incinérée

NOx :

☞ Pour des installations d'incinération existantes dont la capacité nominale est inférieure ou égale à 6 Tonnes par heure, l'autorité compétente peut accorder des dérogations pour le NOx à condition que le permis prévoit que les moyennes journalières n'excèdent pas **500 mg.m⁻³**

☞ Si la capacité nominale est supérieure à 6 Tonnes par heure mais reste inférieure à 16 Tonnes par heure, l'autorité compétente peut accorder des dérogations pour le NOx à condition que le permis prévoit que les moyennes journalières n'excèdent pas **400 mg.m⁻³**.

☞ Si la capacité nominale est supérieure à 16 Tonnes par heure mais reste inférieure à 24 Tonnes par heure et ne produit pas de rejets d'eaux usées par heure, l'autorité compétente peut accorder des dérogations pour le NOx à condition que le permis prévoit que les moyennes journalières n'excèdent pas **400 mg.m⁻³**

Poussières :

☞ Jusqu'au 1^{er} janvier 2008, l'autorité compétente peut accorder des dérogations pour les poussières pour les installations d'incinération existantes, à condition que le permis prévoit que les moyennes journalières n'excèdent pas **20 mg.m⁻³**.

CO :

☞ Les valeurs limites d'émission suivantes ne doivent pas être dépassées pour les concentrations de monoxyde de carbone dans les gaz de combustion (en dehors des phases de démarrage et mise en arrêt) :

- **50 mg.m⁻³** de gaz de combustion comme moyenne journalière,
- **150 mg.m⁻³** de gaz de combustion pour au moins 95 % de toutes les mesures correspondant à ds moyennes de dix minutes, ou **100 mg.m⁻³** de gaz de combustion pour toutes les mesures correspondant à des moyennes sur trente minutes prises au cours d'une même journée de 24 heures.

☞ L'autorité compétente peut accorder des dérogations pour les installations d'incinération utilisant la technologie à lit fluidisé, pour autant que la dérogation prévoit une valeur limite d'émission de **100 mg.m⁻³** (moyenne horaire) pour le CO.

☞ Les états membres de l'Union Européenne peuvent fixer des règles régissant les dérogations prévues dans la présente directive

Récapitulatif de la réglementation "combustion - incinération" concernant les rejets dans l'air, appliquée à la biomasse

* Pour plus de précisions se référer aux textes cités

| Sujet | chaudières de chauffage P<300 kW | Combustion biomasse pure 2<P<20 MW , autre "biomasse" 0,1<P<20 MW | Combustion, P > 20 MW | rejets incinération | rejets ICPE | Bientôt abrogés ? | | |
|----------------------------------|---|---|---|---|---|--------------------------|---|--|
| | | | | | | Combustion, P> 50 MW | Incinération OM | Incinération DIS |
| Référence réglementaire * | Norme europ EN 303,5 (obligatoire le 20/08/04) | Arr 25 jul 97 | Projet arrêté "GIC" | Dir 4 déc 00 | Arr 2 fév 98 | Arr 27 juin 1990 | Arr 25 janv 91 | Arr 10 oct 96 |
| Rubrique ICPE | # | 2910 | 2910 | | | 2910 | 322 B 4 | 167 C |
| Concentration (mg/Nm3, gaz secs) | 10 % O2 | 11 % O2 | 11 % O2 | 11 % O2 | à préciser par l'arrêté d'autorisation | 6 % O2 | 11 % O2 | 11 % O2 |
| particules | 150 à 200 classe Ià 3, manuel ou automatique | 100 ou 150 P < ou > 4 MW | 50 | 10 | 40 ou 100 effluents < ou > 1 kg/h | 50 à 100 P < ou > 500 MW | 30 ou 100 combustible >3 t/h ou 1 à 3 ou <1 t/h ou 200 | 10 |
| CO | 1200 à 25000 classe Ià 3, manuel ou automatique | 250 | 200 si 20 < P<100 MWth si 100 < P< 300 MWth si P > 300 MWth 150 100 | 50 | # | # | 100 | 50 |
| Nox | # | 500 | 400 si 20 < P<100 MWth si 100 < P< 300 MWth si P > 300 MWth 300 200 | 200 ou 400 si combustible e < ou > 6 t/h | 500 si effluents >25 kg/h | 650 à 1300 | # | # |
| COV | 80 à 300 classe Ià 3, manuel ou automatique | 50 en CH4 | 110 en C total si Cov > 2 kg/h | 10 en COT | 150 si effluents >2 kg/h | # | 20 | 10 en COT |
| HAP | # | # | 0,1 | | | | | |
| Sox | # | 200 | 200 | 50 | 300 si effluents >25 kg/h | 400 à 2000 | 300 SO2 | 50 en SO2 |
| HCl | # | # | # | 10 | 50 si effluents > 1 kg/h | # | 50 ou 100 combustible >3 t/h ou 1 à 3 ou <1 t/h ou 250 | 10 |
| HF | # | # | # | 1 | 5 | # | 2 ou 4 ou # combustible >3 t/h ou 1 à 3 ou <1 t/h | 50 |
| dioxine | # | # | # | 0,1 10 ⁻⁶ | # | # | # | 0,1 10 ⁻⁶ |
| Métaux | # | # | 0,1 Cd+Hg+Tl As+Se+Te 1 si P<100MW; 5 sinon | 0,05 Cd+Tl Hg 0,05 Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V | 0,2 si Cd+Hg+Tl > 1 g/h si As+Se+Te > 5g/h 1 si Sb+Cr+Co+Cu+Sn+Mn+Ni+V+Zn > 25 g/h | # | 1 combustible>1t/h Pb+Cr+Cu+Mn +Ni+As 0,2 Cd+Hg | 5 Sb+Co+Pb+Cr+Cu+Mn+N i+As+V+Sn+Se+Te+Zn |

: pas de valeur donnée

C : concentration

$$C_{\text{corrigé}} = C_{\text{mesuré}} * \frac{(21 - O_2 \text{ réf})}{(21 - O_2 \text{ mesuré})}$$

$$C_{\text{gaz sec}} = \frac{100 C_{\text{gaz humide}}}{(100 - H)}$$

$$C(\text{ng} / \text{Nm}^3) = C(\mu\text{m}) * \frac{M_{\text{moléculaire}} (\text{g} / \text{mol})}{22,41 / \text{mol}}$$

Date mise à jour : juillet 2001

II - COMBUSTION DES SOLIDES – TECHNOLOGIES UTILISEES

La combustion des déchets est un procédé assez ancien qui permet d'en réduire le volume et de récupérer de l'énergie. La maîtrise de cette technologie en foyer fermé est beaucoup plus récente. En effet, les premiers incinérateurs de résidus urbains datent du début du siècle dernier en Europe. Cette technologie s'est ensuite développée avec l'accroissement inexorable de la quantité de déchets urbains pendant tout le 20^{ème} siècle. Elle permet de réduire le volume de ces déchets de l'ordre de 90 %, de réaliser une valorisation énergétique de ces déchets et de restreindre la mise en décharge aux seuls déchets ultimes.

La valorisation énergétique de la biomasse par la combustion a bénéficié du développement de la chaîne de traitement thermique des déchets. Cette chaîne de traitement est composée de cinq éléments :

- le système d'alimentation de l'équipement de combustion,
- l'équipement de combustion (les différents types de four)
- un éventuel système de récupération d'énergie,
- un dispositif d'analyse et de traitement des fumées,
- un espace de stockage des résidus solides après stabilisation.

Les formes et caractéristiques variables des solides à brûler requièrent des dispositifs de combustion différents. Les technologies les plus utilisées sont les fours à grilles, les fours à lit fluidisé et les fours rotatifs. Nous ajouterons à cette liste les fours à charbon pulvérisé qui sont très utilisés dans les essais de cocombustion que nous décrirons dans les chapitres suivants.

1 – LE FOUR A GRILLES :

C'est le procédé d'incinération le plus utilisé pour les déchets urbains. Le schéma de principe est représenté sur la figure 1.

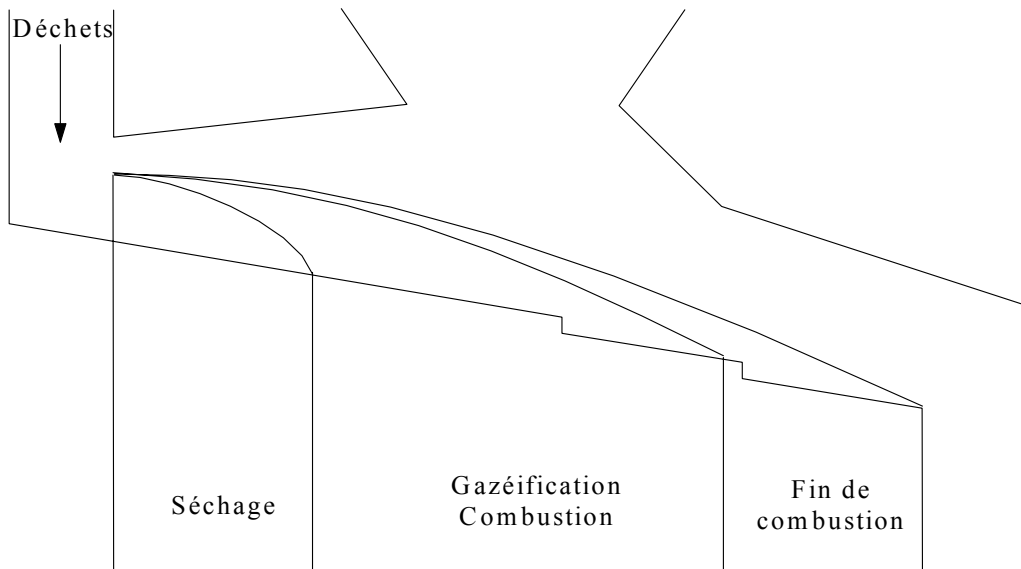


Figure 1 : Schéma de principe d'un four à grilles

En règle générale, la zone de combustion peut être divisée en 3 parties comme l'indique la figure 1. La répartition de l'air primaire sous la grille est faite au moyen de caissons dont le nombre varie suivant les installations.

Pour les unités à forte capacité de traitement, il s'agit généralement d'un ensemble four - chaudière. Il en existe plusieurs types qui diffèrent par la forme, la taille ou encore l'inclinaison de la grille, imprimant ainsi des mouvements différents aux déchets. Les dimensions de grilles dépendent du pouvoir calorifique du combustible et de la charge. Le foyer est dimensionné en fonction de la taille des grilles, et de considérations thermodynamiques pour une vitesse de gaz donnée afin d'obtenir le temps de séjour nécessaire à une combustion complète. La géométrie du foyer est un paramètre déterminant pour le type d'écoulement des gaz de combustion souhaité. Les configurations possibles de l'écoulement du flux gazeux sont schématisées sur la figure 2.

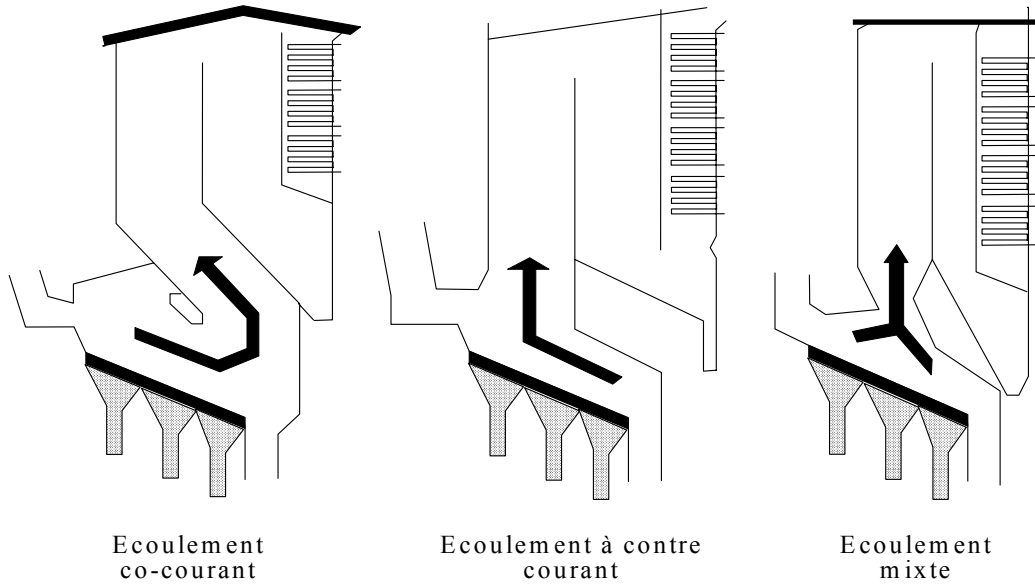


Figure 2 : Configurations possibles de l'écoulement du flux gazeux dans un four à grilles.

Ce dispositif présente l'avantage d'admettre des biomasses hétérogènes de taille assez variable et haute teneur en humidité (jusqu'à 65 %) [TILLMAN, 1987]. Il permet une bonne combustion du résidu charbonneux, ce qui diminue la proportion des poussières dans les flux gazeux. En revanche, ce type de four nécessite un équipement supplémentaire pour la réduction des NOx. Il ne présente pas une bonne homogénéisation de la température de combustion en raison des positions successives du combustible sur la grille.

2 – LES FOURS A LIT FLUIDISE :

Ces fours sont de technologie plus récente et sont adaptés à des combustibles solides homogènes et de petites tailles. Ils sont ainsi peu utilisés pour la combustion des déchets.

Le principe consiste à faire brûler un solide dans un lit de matériaux inertes mis en suspension par une injection d'air à sa base. Les fours à lit fluidisé sont de trois types (figure 3): lit fluidisé dense, lit fluidisé circulant et lit fluidisé rotatif. Dans le premier, la fluidisation du support granuleux n'est obtenue qu'à la base du four (figure 3a). Ce procédé permet un bon mélange entre le combustible solide et le matériau inerte. La vitesse de l'air ascendant est alors de l'ordre de 1 à 2 m.s⁻¹. En raison de cette vitesse, les risques d'érosion sont moindres que dans le lit

fluidisé circulant et dans le lit fluidisé rotatif (Figure 3b et 3c) où la vitesse de l'air atteint 10 ms^{-1} . Dans le lit fluidisé circulant, le combustible gazeux est mieux mélangé et soumis à un temps de séjour dans la chambre de combustion plus long, ce qui favorise une meilleure combustion et la diminution des imbrûlés.

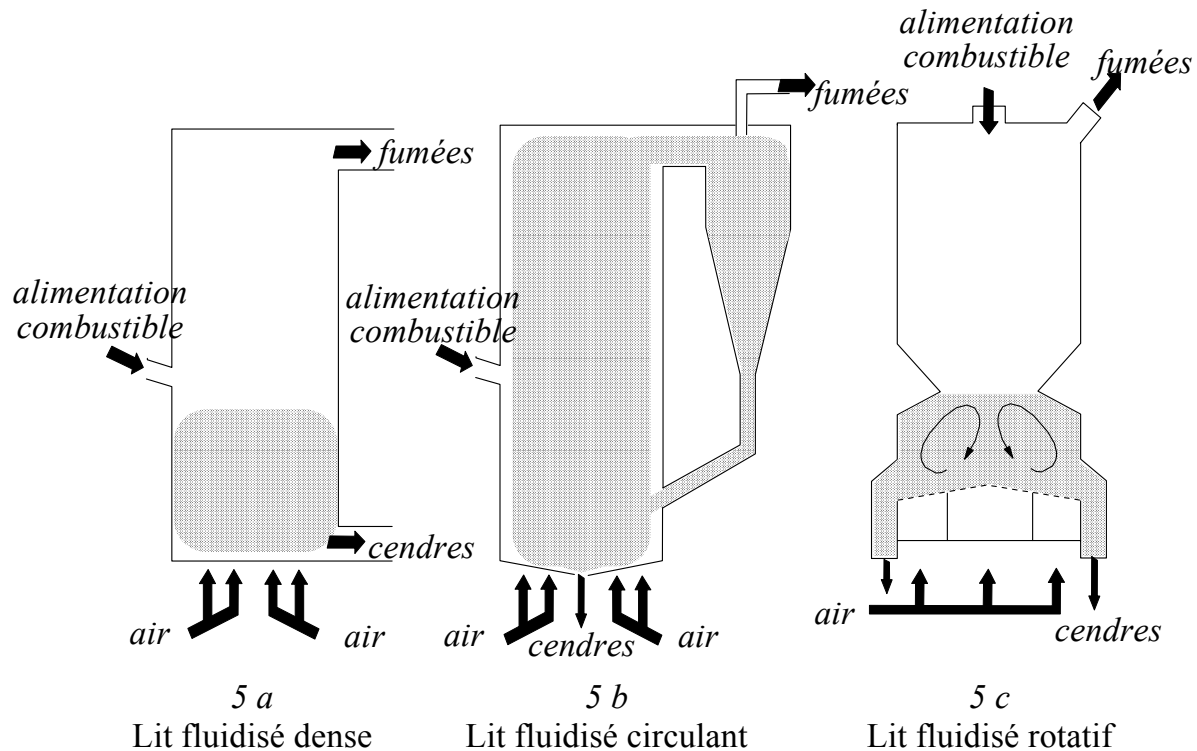


Figure 3 : Schémas de principe des fours à lit fluidisé

Dans l'ensemble, ce procédé présente l'avantage d'assurer un bon mélange entre combustible et comburant et par suite une bonne homogénéité des températures et donc des conditions de combustion dans le four. Il émet peu de NO et beaucoup de N_2O [HAHNEL 1999]. La conception de certains de ces fours permet une récupération d'énergie de l'ordre de 15 % à 20 % de plus par rapport à d'autres dispositifs.[BAGEAT]. Par contre, les fours à lit fluidisé rejettent beaucoup de poussières et de particules entraînées par la fluidisation, d'où la nécessité d'un conditionnement spécifique des combustibles et d'un système de purification des fumées. Cette technologie est plus sensible aux risques d'encrassement et de corrosion des parois internes du four ainsi qu'à la défluidisation du lit par frittage du lit inerte.

3 – LE FOUR ROTATIF :

C'est probablement le système le plus polyvalent pour l'incinération des déchets. En effet, il admet tous les déchets quelle qu'en soit la nature et l'état physique (solide, boueux, liquide ou gazeux). En général, le four rotatif est couplé à une chambre de post-combustion fixe qui assure la combustion complète en phase gaz (figure 4).

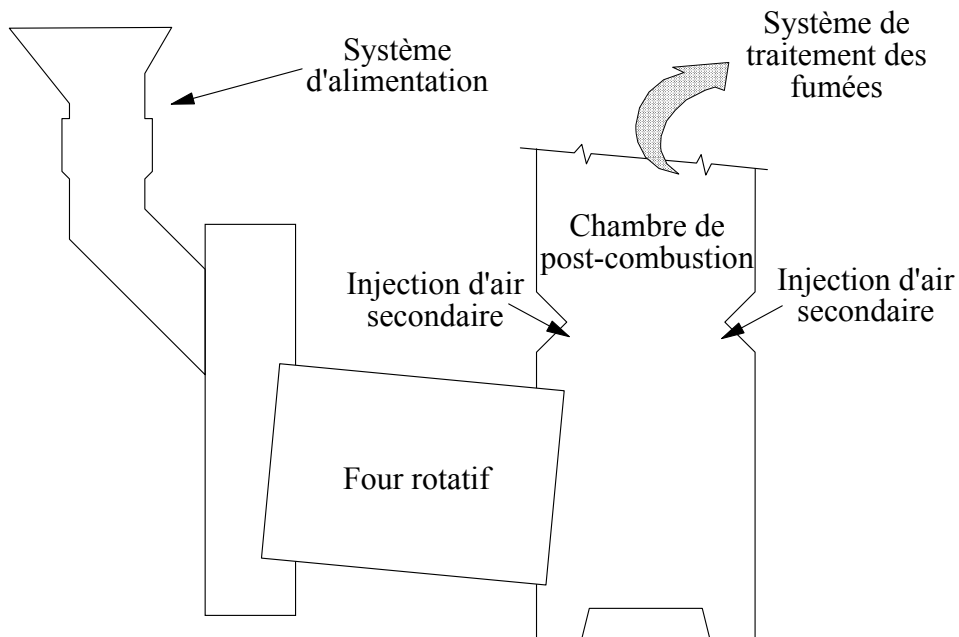


Figure 4 : Schéma de principe du four rotatif.

Ce dispositif peut être complété par un système de récupération d'énergie et un système de dépoussiérage. Les deux principaux types de four rotatif sont dits à co-courant et contre courant et se distinguent par les positions du brûleur et de l'injecteur d'air.

Le four rotatif permet de travailler à température élevée, nécessaire pour l'incinération des déchets industriels, avec un éventuel brûleur d'appoint dans la chambre de post combustion. Dans le cas de combustibles à faible pouvoir calorifique comme la biomasse, le tambour peut lui même être équipé d'un brûleur auxiliaire. Les caractéristiques spécifiques de ce type de four permettent d'assurer un temps de séjour du combustible solide aussi long que nécessaire, d'où un

très faible taux d'imbrûlés et une oxydation assez poussée des produits de dévolatilisation et de pyrolyse dans la chambre de post combustion. Toutefois, ce dispositif est peu utilisé en Europe car il est lourd de mise en œuvre (problème d'étanchéité entre le tambour en mouvement, l'alimentation et la post combustion qui sont fixes) et nécessite un entretien régulier.

4 – LES FOURS A CHARBON PULVERISE :

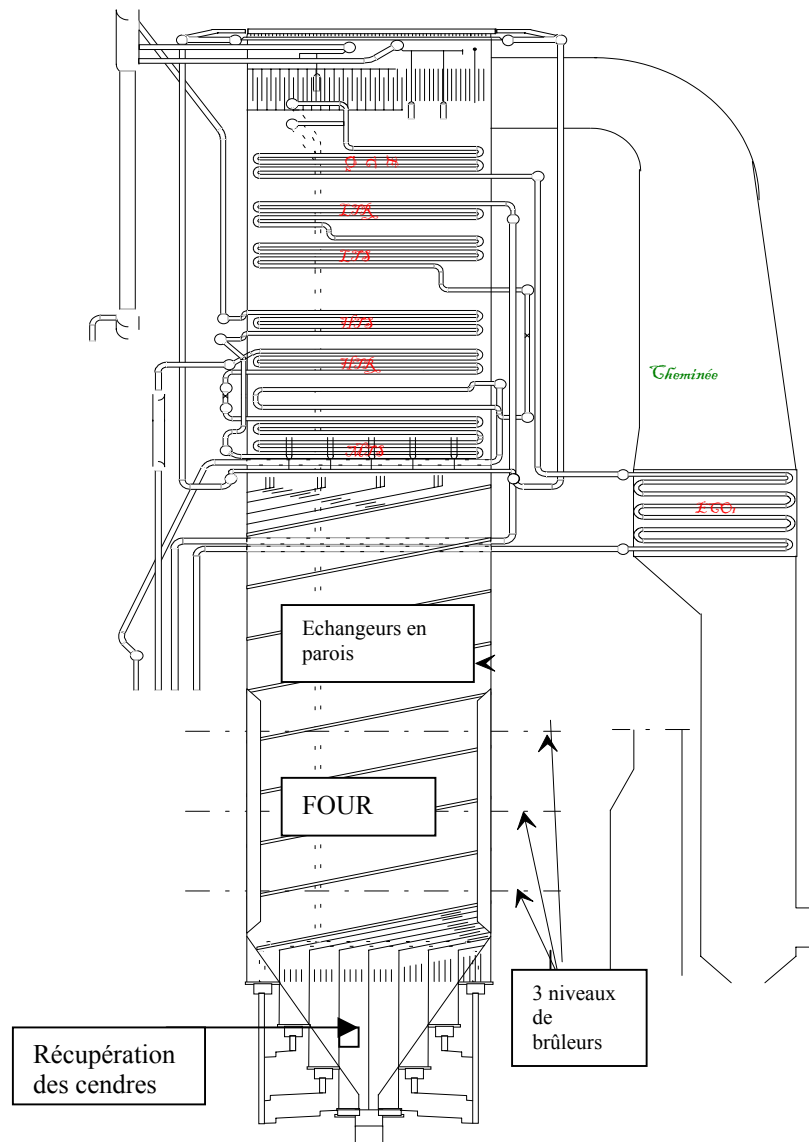
Le principe est de pulvériser des particules fines et assez homogènes dans le four afin de réaliser une combustion homogène semblable à celle du gaz.

L'équipement d'une chaudière à charbon pulvérisé comprend une centrale de pulvérisation et une installation de combustion.

La centrale de pulvérisation est équipée généralement avec de gros broyeurs. Elle sèche, broie et collecte le charbon qui est envoyé par tuyauteries, à l'aide d'air comprimé, dans les silos de réserve d'où il est repris pour l'alimentation des chaudières. La centrale de pulvérisation peut être assez éloignée des chaudières.

L'installation de combustion est constituée de brûleurs installés sur les parois de la chambre de combustion (brûleurs en parois) ou dans les angles de la chambre de combustion (système KSG). Dans ce second cas de figure, les quatre axes sont tangents à un cercle fictif pour provoquer un mouvement rotationnel de toute la masse des gaz de combustion. La figure ci-dessous représente le schéma de principe d'une chaudière à charbon pulvérisé équipée de 12 brûleurs en parois.

Figure 5 : Schéma de principe d'une chaudière à charbon pulvérisé.



III - COMBUSTIBLES FOSSILES

Ce chapitre présente les principales caractéristiques physico-chimiques des combustibles fossiles les plus couramment utilisés : le gaz, les fuels et le charbon.

1 - LE CHARBON

Aux époques géologiques reculées, les végétaux tombés dans les marais ou recouverts par des glissements de terrain ont été ainsi mis à l'abri de l'air. Ils ont ensuite subi l'action combinée de hautes températures et de fortes pressions ainsi que de certains processus biochimiques amenant une lente transformation appelée « carbonisation ». Plus le combustible ainsi formé est ancien, plus sa teneur en carbone augmente tandis que diminuent ses teneurs en hydrogène et oxygène. Cette « ancienneté » permet de distinguer plusieurs types de charbons et de les répartir en trois classes [BELAKHOWSKY]. Du plus récent au plus ancien, on distingue :

- *La Tourbe* : c'est une substance spongieuse extrêmement humide dont les plus anciennes couches ne remontent pas au-delà de l'éocène. Les débris végétaux sont encore reconnaissables. C'est un très mauvais combustible car même après un séchage préalable, la teneur en eau atteint encore près de 75 %.
- *Les Lignite* : elles ont subi un plus long processus de carbonisation. Elles forment une classe hétérogène allant d'une presque tourbe à une presque houille. Leur degré d'humidité est variable et peut atteindre 70 %. Elles s'oxydent facilement et peuvent s'enflammer spontanément.
- *Les Houilles* : elles remontent au carbonifère. La houille la plus ancienne est l'anhracite. Elle constitue le meilleur combustible car elle a un haut pouvoir calorifique et est très peu humide.

L'analyse du combustible charbon est assez difficile tant les gisements, les origines (bois, feuilles, fleurs ou spores) et les conditions de formation (végétaux enfouis plus ou moins profondément) sont différentes. Toutefois deux types d'analyses sont communément effectuées, une analyse sommaire et une analyse élémentaire.

L'analyse sommaire consiste en un chauffage du charbon brut à 100°C sous vide, puis la pyrolyse du charbon sec à haute température et enfin le brûlage du coke en présence d'oxygène. Cette

succession de manipulations permet de déterminer la teneur en eau, l'indice de matières volatiles et les teneurs en carbone fixe et en cendres du charbon.

L'analyse élémentaire qui consiste en la combustion complète sous oxygène pur d'un échantillon de charbon sec et si possible dépourvu de tout élément minéral, permet de mesurer les pourcentages de CO₂, H₂O, SO₃, O₂, et N₂ dans les fumées. De ces pourcentages, on déduit ceux des éléments : C, H, S, N et O.

Les cendres proviennent donc du charbon lui-même, mais surtout des matières minérales stériles qui lui sont souvent mélangées. Ces matières affaiblissent la qualité du combustible en abaissant la température de combustion ainsi que son rendement. De plus, les cendres, par ailleurs fusibles à haute température, ont pour inconvénient d'attaquer les parois réfractaires des fours et des foyers, provoquant la corrosion de celles-ci.

La classification normalisée française des charbons repose sur l'étude de deux éléments : la teneur en matières volatiles qui fournissent des gaz combustibles et la teneur en coke, résidu solide obtenu après dévolatilisation et qui est utilisé comme combustible et pour la fabrication de l'acier. Le tableau ci-dessous résume les résultats de cette classification [BELAKHOWSKY].

| Classe | Désignation | Aspect du coke | C (%) | H (%) | S (%) | O (%) | N (%) |
|--------|----------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| I | Flambant sec | Pulvérulent | 81 | 5 | 1 | 12 | 1 |
| II | Gras longues flammes | Fondu Friable | 88,8 | 5,2 | 1 | 4 | 1 |
| | Gras proprement dit | Fondu Boursoufflé | 89 | 5,2 | 1 | 3,8 | 1 |
| | Gras courtes flammes | Fondu dur | 89,5 | 5 | 1 | 3,5 | 1 |
| III | Demis gras | Agglutiné | 90 | 4,5 | 1 | 3,5 | 1 |
| | Quart gras | Friable | 90,5 | 4,2 | 1 | 3,5 | 1 |
| IV | Maigre anthraciteux | Pulvérulent | 91,3 | 3,7 | 1 | 3 | 1 |
| | Anthracite | Pulvérulent | 94 | 2 | 1 | 2 | 1 |

Tableau 1: classification normalisée du charbon

Il ressort de ce tableau que les houilles ayant un bon pouvoir cokéfiant, c'est à dire fournissant après pyrolyse un coke de bonne qualité sont celles de la classe II.

Le pouvoir calorifique est également un paramètre important du combustible. Le tableau ci-dessous donne les valeurs moyennes des pouvoirs calorifiques supérieur (P.C.S) et inférieur (P.C.I) de quelques types de charbons sur matière humide comparés à celui du bois [BELAKHOWSKY].

| DESIGNATION | P.C.S. (kJ.kg ⁻¹) | P.C.I. (kJ.kg ⁻¹) |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Bois | 19674 | 18418 |
| Tourbes | 22500 | 21349 |
| Lignite | 29616 | 28465 |
| Flambant sec | 34011 | 33279 |
| Flambant gras | 35686 | 34953 |
| Gras proprement dit | 36523 | 35372 |
| Gras courtes flammes | 36523 | 35372 |
| Demi gras | 36418 | 25330 |
| Quart gras | 36313 | 25330 |
| Maigre anthraciteux | 36000 | 35162 |
| Anthracite | 34744 | 34325 |
| Coke | 33593 | 33488 |

Tableau 2 : Pouvoirs calorifiques de quelques charbons et du bois sur matière humide

2 - LES COMBUSTIBLES LIQUIDES

Il y a en France deux combustibles liquides principaux :

- le fuel domestique (FOD), clair mais teinté en rose, peu chargé en soufre, utilisable à la température ordinaire. Il est principalement utilisé pour le chauffage des pavillons, des petits immeubles, des ateliers ainsi que pour le transport.

- le fuel lourd n° 2 (FO.2), épais, noir, chargé en soufre et qui est utilisé après préchauffage. C'est le combustible industriel type.

Ces deux types de fuel sont des produits issus de la distillation du pétrole brut. Le fuel lourd est formé des molécules les moins volatiles (température d'ébullition > 370°C, plus de 30 atomes de carbone dans la molécule). Le fuel domestique fait partie de la coupe moyenne (température d'ébullition comprise entre 180°C et 370°C, de 20 à 30 atomes de carbone). Suivant la complexité du schéma de raffinage, on peut avoir trois types de fuel lourd (FO 2, fuel lourd naturel, lourd reconstitué) et deux types de fuel domestique (FOD naturel et FOD de craquage).

Les caractéristiques physiques des fuels sont la viscosité, le pouvoir calorifique, la densité. La viscosité caractérise la fluidité des liquides. Pour se rapprocher des conditions de mise en œuvre, la viscosité est déterminée généralement à 100°C pour les fuels lourds et à 20°C pour les fuels domestiques. On détermine aussi un paramètre de sécurité qui est le point éclair. Il indique la température minimale à laquelle le fuel doit être porté pour que les vapeurs émises s'allument en présence d'une flamme dans les conditions normalisées et varie avec la température. Le tableau ci-dessous rassemble quelques valeurs caractéristiques ainsi que la composition centésimale et le taux de CO₂+SO₂ dans les fumées sèches.

| Caractéristiques | FOD | FO 2 |
|--|--------------|--------------|
| Densité à 15°C | 0,844 | 1,01 |
| Viscosité(10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹) à 20°C à 100°C | < 7,5 - | - < 40 |
| P.C.I.(kJ.kg⁻¹) | 41900 | 39500 |
| (% en masse) | | |
| C | 85,9 | 85,9 |
| H | 13,3 | 10,5 |
| S | 0,3 | 3 |
| N | 0,25 | 0,25 |
| O | 0,25 | 0,36 |
| Fumées sèches (m ³ .kg ⁻¹) | 10,4 | 10 |
| CO ₂ +SO ₂ (% dans fumées sèches) | 15,5 | 16 |

Tableau 3: caractéristiques principales des fuels
(sources Norme NF T.60101 et M07030)

La combustion des fuels entraîne la pollution de l'air par émission de SO₂ et de NO_x dans les fumées. De plus, le soufre s'oxyde totalement en SO₂, puis partiellement en SO₃ (5 % environ) qui se condense en acide sulfurique sur les parois dont la température est inférieure au point de rosée (soit en général 160°C pour FO 2 et 100°C pour le FOD). Cette condensation entraîne la corrosion des installations.

3 - LES COMBUSTIBLES GAZEUX

Aujourd'hui dans de nombreux pays industrialisés, la fabrication de gaz pour les distributions publiques à partir du charbon ou par craquage et reformage d'hydrocarbures a

complètement cessé au profit du gaz naturel. Celui-ci est un hydrocarbure gazeux, essentiellement du méthane dont les gisements coïncident ou non avec ceux du pétrole en fonction des migrations dans le sol au cours des périodes géologiques. L'industrie emploie également le gaz de cokerie (cokeries sidérurgiques et minières), sous-produit de la fabrication du coke métallurgique. Par ailleurs, l'industrie pétrolière distribue les hydrocarbures gazeux facilement liquéfiables à température ambiante que sont le butane et le propane.

Les données sur la composition et les caractéristiques de divers gaz sont très variables. En effet, la diversification, chaque jour recherchée, des approvisionnements de gaz naturel, les différences dans les gaz de cokeries et de haut fourneau suivant les lieux et les procédés de production, les variations de composition de mélanges commerciaux de propane et de butane font que les valeurs sont susceptibles d'évoluer constamment.

Si on considère tous les mélanges possibles repérés par exemple, par la teneur en combustibles gazeux dans le mélange depuis 0 % (air pur) jusqu'à 100 % (gaz pur), il apparaît que la combustion ne peut s'amorcer et se propager que pour une plage de valeurs appelée plage d'inflammabilité. Les limites de cette plage sont :

- la limite inférieure d'inflammabilité en deçà de laquelle le mélange est trop pauvre en combustible pour brûler (l'excès d'air est trop grand)
- la limite supérieure d'inflammabilité au delà de laquelle le mélange est trop riche en gaz (le défaut d'air est trop important) pour que la combustion puisse se développer.

Le tableau ci-dessous donne des valeurs de limites d'inflammabilité de mélanges air – combustibles gazeux exprimés en proportion volumétrique de ces gaz dans le mélange.

| Nature du Gaz | Limite inférieure (%) | Limite supérieure (%) |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Algérie (Fos) | 4,9 | 13,9 |
| Algérie (Montoir) | 4,7 | 13,7 |
| Mer du Nord | 5,2 | 14,5 |
| Russie | 5,1 | 14,1 |
| Propane commercial | 2,4 | 9,3 |
| Butane commercial | 1,8 | 8,8 |
| Gaz manufacturé de cokerie | 4,6 | 32 |

Tableau 4: Limites d'inflammabilité des gaz industriels (G.D.F. BT 104. 1992)

La teneur maximale instantanée en H₂S des gaz naturels en transport et en distribution publique fixée par arrêté est de 15 mg.Nm⁻³. Quant à la teneur maximale instantanée en soufre total, elle est de 150 mg.Nm⁻³.

Les tableaux ci-dessous donnent les compositions et les caractéristiques de combustion respectives des combustibles gazeux usuels.

| Nature du gaz | H ₂ (%) | CO (%) | CH ₄ (%) | C ₂ H ₄ (%) | C ₂ H ₆ (%) | C ₃ H ₆ (%) | C ₃ H ₈ (%) | C ₄ H ₈ (%) | C ₄ H ₁₀ (%) | O ₂ (%) | N ₂ (%) | CO ₂ (%) |
|-----------------------|-----------------------|-----------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Algérie(Fos) | - | - | 91,2 | - | 6,5 | - | 1,1 | - | 0,2 | - | 1 | - |
| Algérie (Montoir) | - | - | 88,6 | - | 8,2 | - | 2 | - | 0,6 | - | 0,6 | - |
| Mer du Nord | - | - | 88,2 | - | 5,4 | - | -1,2 | - | 0,4 | - | 3,2 | 1,4 |
| Russie | - | - | 96,2 | - | 1,2 | - | 0,3 | - | 0,1 | - | 1,8 | 0,3 |
| Propane commercial | - | - | - | 0,5 | 2 | 30 | 65,5 | - | 2 | - | - | - |
| Butane commercial | - | - | - | 3,2 | - | - | 6,1 | 21,8 | 68,6 | - | - | - |
| Gaz de cokerie | 50,2 | 9 | 24,9 | 2 | 0,8 | - | - | - | - | - | 9,5 | 3,2 |

Tableau 5 : Composition type des combustibles gazeux usuels (G.D.F. B.T 104. 1992)

Ce tableau donne les compositions types qui ont permis de calculer les diverses caractéristiques de quelques combustibles usuels. Ces compositions n'ont qu'une valeur indicative.

| Nature du gaz | Pouvoir calorifique inférieur (MJ.m ⁻³) | Masse volumique à 0°C (kg.m ⁻³) | CO ₂ total (m ³ .m ⁻³) | H ₂ O total (m ³ .m ⁻³) | CO ₂ max (%) |
|-----------------------|--|--|---|--|----------------------------|
| Algérie (Fos) | 42,3 | 0,78 | 1,09 | 2,08 | 11,9 |
| Algérie (Montoir) | 44 | 0,81 | 1,13 | 2,13 | 12 |
| Mer du Nord | 41,1 | 0,82 | 1,07 | 2,01 | 12 |
| Russie | 39,9 | 0,75 | 1,01 | 1,98 | 11,8 |
| Propane commercial | 99 | 1,98 | 3,06 | 3,77 | 14,1 |
| Butane Commercial | 128,4 | 2,60 | 4,04 | 4,82 | 14,3 |
| Gaz de cokerie | 19,9 | 0,55 | 0,45 | 1,09 | 11,2 |

Tableau 6 : Caractéristiques de combustion des combustibles gazeux usuels(G.D.F. B.T 104. 1992).

En général, ces combustibles fossiles se démarquent des biomasses par leur richesse en carbone et par leur haut pouvoir calorifique. Les combustibles solides ont un faible taux de matières volatiles. Ces caractéristiques font de ces combustibles d'excellentes sources d'énergie mais dont la combustion rejette des polluants nocifs pour l'environnement, notamment du CO₂ qui ne sera pas recyclé contrairement à la biomasse.

IV - MONOCOMBUSTION DE LA BIOMASSE

Parmi les multiples techniques de valorisation énergétique de la biomasse, la combustion reste la plus ancienne et la plus usitée. Ce procédé subit en permanence des modifications afin de l'adapter aux unités industrielles et de diminuer au maximum les émissions polluantes. Une bonne combustion de la biomasse doit se traduire de la façon suivante :

- une combustion complète du carbone ; ceci nécessite une chambre de combustion permettant un mélange homogène entre comburant et produits de dévolatilisation de la biomasse, un excès d'air optimum et un système approprié de contrôle de la combustion,
- un dispositif permettant la séparation des cendres et des gaz,
- une bonne récupération d'énergie,
- la réduction des NOx par technique primaire (étagement du comburant et /ou du combustible) ou secondaire.

Nous nous intéresserons plus particulièrement ici aux cas du bois et des résidus agricoles qui représentent des gisements très importants.

La combustion du bois :

La préparation du bois pour des utilisations industrielles engendre la production d'un pourcentage élevé de déchets de bois qui sont valorisés en bois de feu. La combustion du bois se déroule en trois phases qui sont :

- la phase de chauffage - séchage entre 100°C et 200°C au cours de laquelle le bois perd son eau libre. L'eau liée qui fait partie de la structure du bois représente 15 % à 20 % de la composition du bois sec (**BEAUMONT 1985**). Jusqu'à 200 °C cette phase est conditionnée par la granulométrie, le taux d'humidité du bois et la technologie de combustion utilisée.
- les étapes de pyrolyse, inflammation et combustion des gaz à partir de 300 °C. La pyrolyse est une décomposition par la chaleur d'une substance organique sous vide ou en atmosphère inerte (sous azote par exemple). Elle engendre la formation de vapeur d'eau et de composés inflammables (H₂, CO, CH₄, ...).

A partir de 300°C à 350°C lorsque le bois est anhydre, les gaz émis par la décomposition du bois peuvent s'enflammer s'il y a présence d'oxygène. L'inflammation et la combustion se chevauchent ensuite jusqu'à consommation complète des matières volatiles produites par la dégradation thermique du bois.

- la combustion lente du résidu charbonneux : ce résidu est constitué essentiellement de carbone. Il s'oxyde au contact de l'oxygène par des réactions de surface. Cette phase est cinétiquement contrôlée par la vitesse de transport de l'oxygène vers la particule. Elle peut occuper environ 50 % à 80 % du temps de combustion du bois selon la granulométrie et la technologie utilisée.

La combustion des résidus végétaux agricoles :

Nous regroupons sous le vocable résidus végétaux agricoles la paille, les cosses de céréales, les rafles de maïs, la bagasse, les noyaux d'olive, les coques de noix de palmier. Certaines propriétés physico-chimiques de ces résidus agricoles rendent leur conditionnement et leur combustion plus difficiles que ceux des combustibles fossiles classiques. Il s'agit principalement du fort taux d'humidité, de la faible masse volumique, d'une teneur élevée en matières volatiles et de la fusibilité des cendres à basse température.

Les résidus agricoles ont un taux d'humidité sur brut pouvant atteindre 40 % à 60 %. Ce taux élevé peut entraîner une faible inflammabilité, ce qui a pour conséquence d'abaisser la température de combustion et donc de nuire au bon déroulement de celle-ci. Cette forte humidité peut également retarder l'étape de dévolatilisation qui est déterminante pour la combustion **(HELLWIG, 1985)**.

La grande majorité des résidus végétaux agricoles a une masse volumique apparente assez faible. La paille et les coques de riz par exemple ont des masses volumiques de 50-120 kg.m⁻³ et 122 kg.m⁻³ respectivement. Ces valeurs sont très inférieures à celles du charbon qui sont en moyenne de l'ordre de 600 kg.m⁻³ à 900 kg.m⁻³. Cette faible masse volumique complique le conditionnement et la combustion de la biomasse. En effet la combustion se fait trop vite et le contrôle de paramètres comme la température ou la vitesse de combustion devient très difficile.

Les résidus agricoles sont riches en espèces volatiles comme l'indique le tableau ci-dessous **(WERTHER.J, 1995)**.

| | Volatiles (%) | Carbone fixe (%) | Cendres (%) |
|--------------|---------------|------------------|-------------|
| Paille | 61,3 | 24,2 | 6 |
| Tournesol | 69,1 | 19,1 | 1,9 |
| Coton | 73 | 16,9 | 3,2 |
| Soja | 69,6 | 19 | 5,1 |
| Arachide | 68,1 | 20,9 | 3,1 |
| Café | 64,6 | 20 | 4,1 |
| Noix de coco | 70,5 | 22 | 3,1 |

Tableau 7: Analyse Globale de quelques résidus agricoles. (WERTHER.J, 1995)

Cette teneur élevée en espèces volatiles se traduit par le fait que lors de la combustion la perte de masse commence à basse température (150°C – 200°C) puis s'accélère très vite pour se stabiliser autour de 500°C. Par comparaison, la perte de masse de la houille commence entre seulement entre 350°C et 400°C pour se stabiliser à 650°C (VON RACZECK, 1992).

Les cosses de céréales constituent la majorité des résidus végétaux agricoles. La culture de ces céréales est faite avec l'ajout d'engrais chimiques dont on retrouve les traces au niveau des cendres de la biomasse sous forme de sels alcalins (GRUBOR, 1995). La température de fusion de ces cendres est assez basse (750°C – 850°C) comparativement à celle des cendres de charbon (1280°C). Cette fusibilité à basse température des cendres issues de la combustion de biomasse provoque la formation d'agglomérats et de des dépôts sur les parois internes du four. Les agglomérats peuvent, dans le cas d'un four à lit fluidisé, entraîner la défluidisation du lit tandis que les dépôts sur les parois du four peuvent réduire le transfert de chaleur et la récupération d'énergie.

Ces difficultés à réaliser la monocombustion de biomasse vont se poser de façon plus ou moins aiguë suivant le type de produit. La composition de la biomasse influence fortement le type de dispositif expérimental à utiliser pour la combustion. Les fours à grilles et les fours à lit fluidisé sont les deux technologies couramment utilisées pour la combustion des résidus végétaux agricoles.

1 – COMBUSTION EN FOURS A GRILLES :

a) Influence de la composition de la biomasse :

Pour une biomasse contenant peu de cendre comme le bois, **NUSSBAUMER** recommande, pour des petites installations, l'utilisation de brûleur volcan avec alimentation par le bas et inflammation au sommet du lit. Ce dispositif permet une bonne séparation entre les gaz de combustion et les cendres dans la chambre de combustion. Un système multi cyclones placé en aval permet de piéger les poussières dans le flux gazeux. (Figure 6).

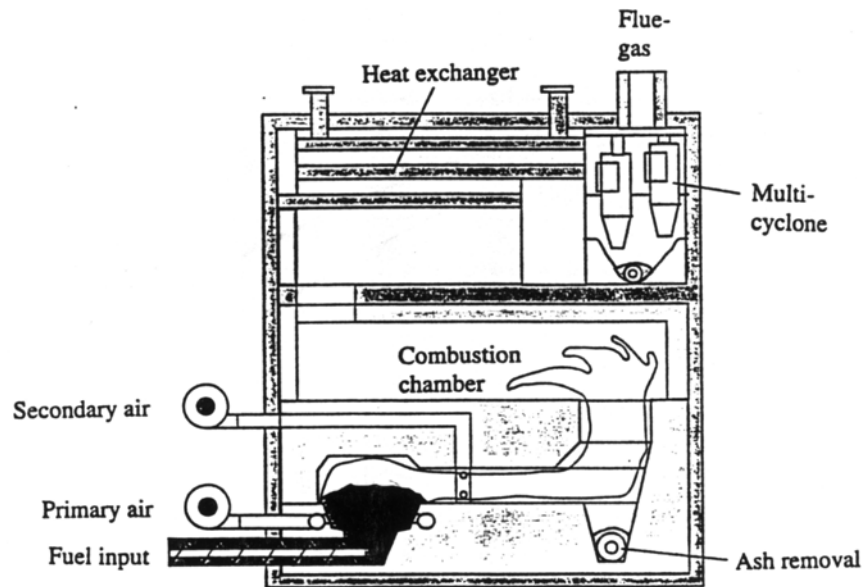


Figure 6 : Foyer volcan avec chambre de combustion indépendante. (**NUSSBAUMER**).

Plusieurs variantes de fours à grilles ont été développées pour la combustion des combustibles solides (déchets municipaux et biomasse). Il s'agit d'adapter la technologie aux caractéristiques de chaque combustible (humidité, taux de volatiles, granulométrie, masse volumique).

Ainsi, pour des combustibles à forte humidité comme la plupart des biomasses, il est nécessaire d'utiliser un four à grilles à contre courant (voir figure 2).

Ce dispositif permet à la flamme de rayonner plus sur le combustible solide frais et donc de favoriser le séchage rapide de la biomasse.

Pour les combustibles riches en cendres, l'utilisation du four à grilles mobiles est conseillé pour permettre l'évacuation rapide et continue des cendres.

En ce qui concerne la combustion des résidus de bois secs, le four à grilles co-courant est conseillé, ces combustibles étant peu humides et nécessitant un temps de séjour élevé.

Le four à grilles permet d'avoir un lit de combustible à épaisseur constante et donc soumis à la même pression. Par ailleurs, ce dispositif n'est totalement efficace que s'il y a d'une part un bon

mélange entre les espèces volatiles du combustible et l'air secondaire pour permettre une combustion avec un excès d'air optimum, et d'autre part si le déplacement du lit de combustible et l'évacuation des cendres en bout de grilles sont bien contrôlés.

b) Influence du mode d'alimentation du four :

Le mode d'alimentation du four influence la qualité de la combustion (rendement thermique, émissions polluantes). Ainsi pour la paille, on peut distinguer deux modes d'alimentation du four à grilles : un mode continu et un mode discontinu.

Le mode continu encore appelé « cigar firing » (figure 7) est un procédé Danois [NIKOLAISEN.] dans lequel la paille préalablement conditionnée sous forme de ballots est introduite continuellement à travers un tunnel dans le four grâce à un piston hydraulique.

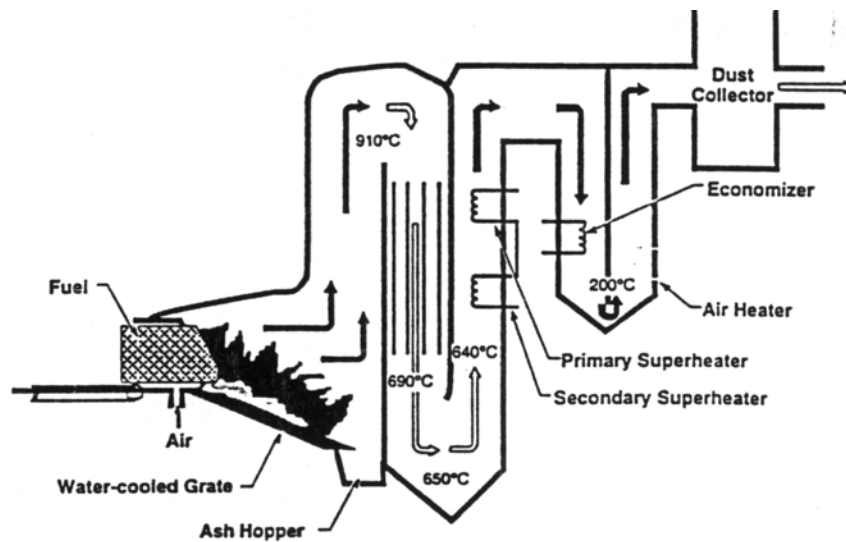


Figure 7 : Exemple de « cigar-firing » [NIKOLAISEN]

Les espèces volatiles sont progressivement libérées et brûlées au contact de l'air secondaire. Le résidu charbonneux et les cendres sont transportés un peu plus loin par le mouvement des grilles. Pendant ce transport, l'oxydation du carbone fixe s'achève et les cendres sont évacuées.

L'autre mode d'alimentation du four consiste à introduire de façon discontinue (système de batch) des balles de paille à travers un canal dans une chambre de dévolatilisation où l'air est ensuite introduit à travers de nombreux injecteurs pour assurer une bonne turbulence. Les espèces volatiles libérées s'enflamment et brûlent par la suite dans le four. Ce système entraîne une

combustion discontinue et de moins bonne qualité (pics de température et de CO) que dans le mode précédent.

c) Emissions polluantes :

La combustion de la biomasse produit deux types d'émissions polluantes : les émissions dues au type de dispositif utilisé ainsi qu'aux conditions opératoires (CO, Hydrocarbures légers, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) et les émissions liées à la composition intrinsèque de la biomasse (NO_x, SO_x, HCl, Métaux lourds, poussières). Les tableaux ci-dessous donnent quelques valeurs de ces polluants dans le four à grilles à 11 % d'oxygène :

| | | |
|--------------------------------------|---------|-------------|
| Excès d'air | 1,5 – 2 | 2 - 4 |
| CO (mg.Nm ⁻³) | 20 – 50 | 1000 - 5000 |
| Hydrocarbures (mg.Nm ⁻³) | < 10 | 100 – 500 |
| HAP (mg.Nm ⁻³) | < 0,01 | 0,1 - 10 |

Tableau 8: Emissions polluantes en fonction de l'excès d'air (**NUSSBAUMER**)

| | Bois(Feuillus) | Bois(Résineux) | Bois(déchets Ménagers) | Paille, Herbe, miscanthus |
|--|----------------|----------------|------------------------|---------------------------|
| NO _x (mg.Nm ⁻³) | 150 – 250 | 100 - 200 | 400 - 600 | 300 - 800 |
| HCl (mg.Nm ⁻³) | <5 | <5 | - | 100 - 1000 |
| Métaux lourds (mg.Nm ⁻³) | <1 | <1 | - | 20 - 100 |

Tableau 9: Emissions polluantes dues à la composition du combustible (**NUSSBAUMER**).

La technologie du four à grilles permet de réaliser la combustion de combustibles hétérogènes, de taille variable et à fort taux d'humidité (jusqu'à 60 % d'après **TILLMAN**). Elle permet également une bonne combustion du résidu carbonneux issu de la pyrolyse.

Par contre, les conditions de combustion ne sont pas homogènes, notamment au niveau de la température qui peut être très hétérogène suivant la position du combustible sur la grille. Cette technologie nécessite également l'adjonction d'équipements pour la réduction des NO_x. Enfin, le rendement de combustion peut être réduit par le débit du comburant. En effet, un excès d'air trop

élevé risque d'abaisser la température de la flamme et provoquer une combustion incomplète se traduisant alors par le rejet d'imbrûlés en grande quantité dans les fumées.

2 – COMBUSTION EN FOURS A LIT FLUIDISE :

R. PEEL a fait des essais de combustion de plusieurs biomasses : charbon de bois, copeaux de bois d'eucalyptus, rafles de maïs, sciures de bois, bagasses et cosses de riz. Le dispositif expérimental utilisé est un lit fluidisé dense (pilote de laboratoire). Le four de forme cylindrique a un diamètre interne de 200 mm. Le lit inerte est constitué de sable dont la hauteur varie entre 80 mm (au repos) et 400 mm lorsqu'il est en mouvement. La majorité des essais a été réalisée avec une hauteur de lit de 300 mm. La vitesse maximum de fluidisation pendant les essais est de 2 m.s^{-1} à $820 \text{ }^\circ\text{C}$. Avant chaque essai, le lit fluidisé est préchauffé à environ 470°C en brûlant du charbon de bois. L'alimentation du four peut se faire de plusieurs façons: système pneumatique, système de vis sans fin ou encore manuellement. Les principales caractéristiques des combustibles utilisés dans ces travaux sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

| Biomasse | Masse Volumique (kg.m^{-3}) | Humidité (%) | P.C.I (kJ.kg^{-1}) | Volatiles (%) | Cendres (%) |
|-----------------|--|--------------|-------------------------------|---------------|-------------|
| Charbon de bois | 340 | 21 | 34700 | 16,2 | 1,2 |
| Copeaux de bois | 311 | 33 – 38 | 18900 | 85 – 88 | 1 |
| Sciures de bois | 160 | 40 | 18400 | 80,3 | 9,5 |
| Cosses de riz | 151 | 11,9 | 17700 | 73,2 | 10,9 |
| Bagasses | 80 | 50 | 19000 | 82,5 | 0,13 |
| Rafles de maïs | 190 | 8 | 18100 | 84 | 0,53 |

Tableau 10: Caractéristiques des combustibles utilisés par **PEEL**.

Trois des six combustibles utilisés dans ces essais n'ont pu être brûlés correctement : il s'agit de la bagasse, de la sciure de bois et des cosses de riz. Les difficultés de combustion rencontrées sont le mode d'alimentation du four et le mélange du combustible et du sable au sein du lit fluidisé.

Lorsque l'introduction de la biomasse se fait par le haut du four (alimentation par gravité), la bagasse et la sciure de bois s'enflamment avant d'avoir atteint la surface du lit et leur combustion

se fait presque exclusivement dans la partie superficielle du lit. La chaleur produite par cette combustion ne rayonne pas suffisamment dans le lit dense. Ceci conduit à un abaissement de la température du lit et donc à une combustion incomplète se traduisant par le rejet d'imbrûlés.

La bagasse est composée de longues particules fibreuses et ne peut pas de ce fait être introduite dans le four par le système pneumatique ou le système de vis sans fin de 50 mm de diamètre. Toutefois, les essais à froid montrent qu'une fois introduite dans le lit, le mélange avec le sable se fait correctement. La combustion de la bagasse en lit fluidisé est donc possible si on trouve le moyen adéquat d'alimentation du four. Il en est de même pour les cosses de riz qui se mélangent bien avec le sable. Par contre, l'introduction dans le four par le système pneumatique entraîne une combustion hétérogène car l'inflammation des cosses de riz commence au sein du système pneumatique.

La sciure de bois peut être introduite dans le four par le système pneumatique, mais sa combustion se fait essentiellement à la surface du lit, voire au dessus de celui-ci. De plus des essais à froid montrent qu'une fois au sein du lit fluidisé, la sciure a tendance à se séparer du sable lorsque la vitesse optimum du flux traversier est atteinte. Il semblerait donc qu'il faille conditionner la sciure de bois sous forme de granulés pour permettre sa combustion en lit fluidisé.

La combustion des copeaux de bois, des rafles de maïs et du charbon de bois a pu être réalisée sans difficultés (bon contrôle de la température, peu de fumée). Dans le cas des copeaux de bois et des rafles de maïs, les meilleurs résultats sont obtenus avec une épaisseur du lit de 300 mm, 15 % d'excès d'air et une vitesse de fluidisation de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. Dans ces conditions, la presque totalité de la combustion est réalisée au sein du lit fluidisé.

La combustion des combustibles riches en composés volatiles comme la biomasse rend difficile le contrôle de la température et provoque la formation de fumées denses et chargées en poussières, surtout quand l'épaisseur du lit fluidisé est inférieure à 200 mm.

Les particules de biomasse sont de taille variable en fonction de leur origine (déchets, copeaux ou sciure de bois, coques de céréales, paille etc...). Afin d'obtenir la taille optimum pour une combustion en lit fluidisé (5 mm à 50 mm), les combustibles les plus fins comme la sciure de bois ou les coques de céréales doivent subir un conditionnement spécial comme la transformation en granulés par exemple. D'autres essais de **PEEL** sur des petites unités expérimentales fonctionnant à 10 kg par heure ont montré que le principal problème avec les résidus agricoles était d'assurer un bon mélange permettant le transfert de chaleur entre le sable du lit fluidisé et les

particules de biomasse. En effet, la faible densité de la biomasse fait que les particules de biomasse ont tendance à se regrouper au dessus du lit inerte de sable. Les particules de biomasse doivent avoir au moins 5 mm de diamètre pour permettre à la fois un bon mélange avec le sable du lit fluidisé et un bon transfert de chaleur conduisant à une meilleure combustion.

KAFERSTEIN P et al ont réalisé la combustion de biomasse et de charbons dans un four à lit fluidisé circulant afin de déterminer les taux d'émissions polluantes. Le dispositif expérimental utilisé (figure 8) est un pilote de laboratoire de 60 kW mesurant 7 m de hauteur.

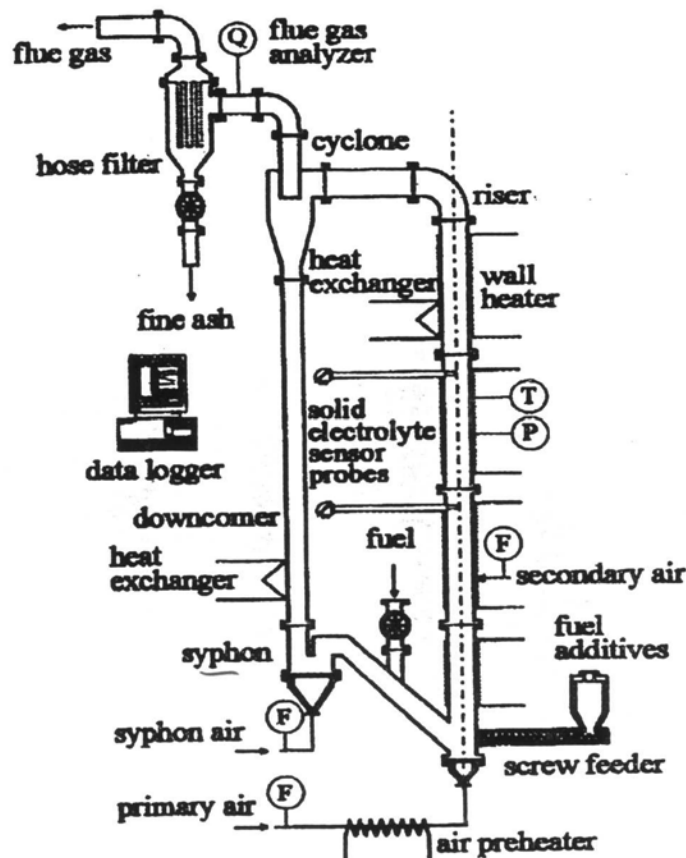


Figure 8 : Lit fluidisé circulant [KAFERSTEIN]

La partie ascendante contenant le lit fluidisé a un diamètre interne de 100 mm. Les combustibles utilisées dans cette étude sont la lignite sèche, le charbon plus élaboré que la lignite, le roseau de chine et les boues usées. Les émissions gazeuses mesurées sont : CO_2 , CO , H_2O , NO_x , SO_2 et C_nH_m . Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques physico-chimiques des combustibles étudiés.

| Combustibles | Lignite Sèche | Charbon | Boues Usées | Roseau Chinois |
|-------------------------------------|---------------|---------|-------------|----------------|
| Analyse Globale (% en masse) | | | | |
| Carbone fixe | 33,13 | 54,15 | 1,08 | 16,65 |
| Volatiles | 49,57 | 35,74 | 49,49 | 72,48 |
| Cendres | 5,02 | 7,44 | 41,86 | 1,85 |
| Humidité | 12,28 | 2,67 | 7,57 | 9,02 |
| Analyse Élémentaire (% en masse) | | | | |
| C | 66,24 | 80,37 | 50,37 | 49,08 |
| H | 5,58 | 5,73 | 7,10 | 5,76 |
| O | 26,67 | 11,41 | 35,04 | 44,76 |
| N | 0,62 | 1,20 | 6,17 | 0,31 |
| S | 0,89 | 1,29 | 1,32 | 0,09 |
| Densité (kg.m ⁻³) | 800 | 1500 | 1000 | 250 |
| P.C.I (kJ.kg ⁻¹) | 19687 | 28989 | 10770 | 15857 |

Tableau 11: Caractéristiques physico-chimiques des combustibles étudiés [KAFERSTEIN]

Le diamètre moyen des particules de charbon est de 0,1 mm. Il est en moyenne 10 fois plus petit que celui des particules de boues usées (1 mm) et du roseau chinois (0,5 mm).

Les boues usées ont un taux élevé de soufre et d'azote, ce qui laisse augurer de fortes émissions d'oxydes d'azote et de soufre.

Les valeurs globales des polluants gazeux émis par la lignite sèche, les boues usées et le roseau chinois sont regroupées dans le tableau ci-dessous. Ces valeurs ont été déterminées aux conditions expérimentales suivantes : température du lit de 850 °C et 6 % d'oxygène.

| Combustibles | Roseau Chinois | Boues usées | Lignite sèche |
|--|----------------|-------------|-------------------|
| CO (mg.Nm ⁻³) | 186 | 96 | 26 |
| NO (mg.Nm ⁻³) | 320 | 140 | 136 |
| SO ₂ (mg.Nm ⁻³) | 67 | 2389 | 707 |
| C _n H _m (mg.Nm ⁻³) | 21 | 5 | < seuil détection |

Tableau 12: Emissions gazeuses à 6 % d'O₂ et à 850 °C

Le roseau chinois présente les plus haut taux de CO et d'hydrocarbures (C_nH_m) de cette série. On peut raisonnablement penser que la faible densité de ce combustible raccourcit son temps de séjour au sein du lit fluidisé. Une partie des espèces volatiles est libérée en dehors du lit fluidisé et va brûler à la surface de celui-ci tandis qu'une autre partie moins importante (monoxyde de carbone et hydrocarbures) va être rejetée dans les imbrûlés.

Les teneurs élevées en SO₂ des boues usées et de la lignite sèche sont dues à la richesse de ces composés en soufre.

La quantité de NO libérée par la combustion du roseau chinois représente plus du double de celle des boues usées et de la lignite sèche, alors même que ce combustible est celui qui contient le moins d'azote parmi les combustibles étudiés.

Les auteurs expliquent ce fait par la richesse du roseau en volatiles et par l'hydrodynamique. Lorsque le roseau est introduit dans le four, les espèces volatiles sont libérées en grande quantité et se mélangent avec l'oxygène du comburant. Ce mélange gazeux va mieux brûler que dans le cas de la lignite sèche et des boues usées qui sont moins riches en espèces volatiles. Il en résulte une plus grande formation de monoxyde d'azote au même taux d'oxygène (6 %).

a) Fusibilité des cendres – frittage – Encrassage :

Une proportion considérable de la biomasse exploitée à des fins énergétiques est constituée de résidus végétaux agricoles et notamment des cosses de céréales. Ces céréales sont cultivées avec l'ajout de nombreux engrais chimiques dont on retrouve la présence au niveau des cendres sous formes d'oxydes divers. Le tableau ci-dessous donne un aperçu des teneurs des principaux oxydes pour quelques résidus agricoles (**GRUBOR et al**).

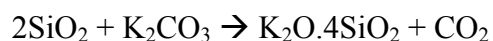
| Composition chimique des cendres (%) | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O |
|--------------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|-------------------|------------------|
| Tournesol | 17,8 | 6,4 | 0,2 | 9,4 | 14,5 | 14,6 | 8,5 | 6,8 | 0,1 | 21,2 |
| Coton | 10,8 | 1,9 | 0 | 4 | 1,3 | 20,7 | 7,5 | 1,7 | 1,3 | 49,6 |
| Café | 3,8 | 0,2 | 0,2 | 4,1 | 7,5 | 9,2 | 2,2 | 0,4 | 0,6 | 43,8 |
| Moutarde | 16,9 | 0,8 | 0,1 | 2 | 1,5 | 42,8 | 9,2 | 14,3 | 2 | 7,4 |
| Noix palmier | 63,2 | 3,9 | 0,2 | 2,8 | 4,5 | n.m* | 3,8 | 2,8 | 0,8 | 9 |
| Poivre | 13,2 | 2,9 | 0,1 | 9,6 | 7,2 | 8,6 | 3,9 | 9,1 | 0,9 | 30,3 |
| Soja | 1,7 | 2,5 | 0,2 | 4,9 | 7,4 | 21,4 | 7,1 | 3,7 | 5,3 | 30,5 |
| Arachide | 27,7 | 10,3 | 0,1 | 3,7 | 8,3 | 24,8 | 5,4 | 10,4 | 0,8 | 8,5 |
| Noix coco | 69,3 | 6,4 | 0,01 | 1,6 | 8,8 | 2,5 | 1,6 | 0,01 | 4,8 | 8,8 |
| Rafle de maïs | 32,74 | 0,70 | 0,02 | 4,68 | 5,05 | 2,63 | 6,83 | 0,12 | 1,38 | 29,24 |
| Paille | 59,52 | 8,76 | 0,02 | 5,07 | 2,18 | 6,52 | 2,26 | 0,36 | 1,60 | 13,16 |

Tableau 13: Composition chimique des cendres des résidus agricoles

La combustion de ces résidus agricoles à 800 °C avec une bonne répartition du comburant donne un rendement de combustion supérieur à 97 % et un taux de CO inférieur à 500 ppm (**GRUBOR et al 1987, 1994 ; OKA 1987 ; BAPAT 1997**)

Lors de ces travaux, les installations étaient régulièrement arrêtées au bout de quelques jours de fonctionnement pour deux raisons : le frittage au sein du lit fluidisé et l'encrassement des parois internes du four.

Dans la majorité des fours à lit fluidisé, la partie inerte est constituée de sable, donc riche en silice. Aux températures usuelles de combustion de la biomasse (750°C-850°C) cette silice va réagir au contact des cendres de la biomasse riches en oxydes alcalins. Cette réaction se fait selon le mécanisme de **LEVIN et al** (ci-dessous) pour former un mélange dont la température de fusion est nettement inférieure à celle de la silice (1600°C - 1700 C):



Des travaux ont été menés pour réduire voire supprimer la formation de ces agglomérats (qui peuvent conduire à la défluidisation du lit) et de cet encrassement dont le dépôt sur les surfaces internes du four réduit à la fois le rayonnement de la chaleur au sein du milieu réactionnel et le rendement thermique de la combustion.

D'autre part les travaux de **BLANDER & PELTON** ainsi que de **PETERSEN et al** sur les chaudières domestiques Danoises alimentées à la paille et aux cosses de céréale ont montré que les cendres de cette biomasse sont riches en éléments inorganiques pouvant entraîner la corrosion des parois internes de la chaudière.

Trois voies ont été explorées pour résoudre ces problèmes:

- l'utilisation d'un autre matériau que le sable comme composante inerte du lit fluidisé,
- l'injection d'additifs dans le lit pour augmenter la température de fusion des composés formés par les réactions de **LEVIN**,
- la cocombustion de la biomasse avec d'autres combustibles comme le charbon.

GRACE a fait des essais de laboratoire en comparant l'effet de composés majoritairement basiques comme la Dolomite, la Magnésite et le Feldspar aux résultats obtenus avec le sable. Il a réalisé la combustion d'une gamme variée de biomasse (cosses d'arachides, noix de palme, déchets de tournesol, tiges de coton).

En présence de sable, on observe le frittage du lit au bout de quatre heures de fonctionnement du four, et ce quelle que soit la biomasse utilisée. Avec la Dolomite et la Magnésite la vitesse de ségrégation entre la biomasse et le support inerte est nettement plus grande que dans le cas du sable. Cette tendance est moins marquée dans le cas du Feldspar pour lequel les agglomérats n'apparaissent qu'au bout de quinze heures de fonctionnement du four.

Dans le même ordre d'idée, **GRUBOR** a remplacé le sable par l'oxyde ferrique (Fe_2O_3) qui est à caractère acide. Le but est d'obtenir, par réaction acido-basique entre les cendres et ce support à caractère acide, un composé dont la température de fusion soit largement supérieure à celle du fonctionnement du lit fluidisé (800°C). Les essais faits dans la gamme de température 700°C – 900°C n'ont montré aucune formation d'agglomérats et très peu d'encrassement comparativement au sable. Toutefois l'oxyde ferrique exige une très grande vitesse du flux traversier, ce qui peut augmenter le risque de ségrégation du combustible. D'autre part ce matériau reste très honnête par rapport au sable et donc peu compétitif pour une utilisation industrielle.

Des doses croissantes d'oxyde de magnésium ont été injectées dans le lit de sable avant la combustion de tiges de tournesol. Le frittage du lit a été observé au bout de 36 heures de fonctionnement du four contre quatre à six heures lors d'une combustion sans ajouts. De plus on n'observe aucun dépôt sur les parois du four. Ce procédé techniquement viable présente l'inconvénient d'être économiquement très coûteux.

Enfin des essais de cocombustion des cosses de café avec la lignite (35 % à 45 % de cendres) ont été réalisés en faisant varier la proportion de lignite jusqu'à 25 %. L'atténuation des phénomènes de frittage et d'encrassement n'est observée que quand le taux de charbon est supérieur à 20 % (**GRUBORG**).

3- -SYNTHESE SUR LES POLLUANTS ISSUS DE LA MONOCOMBUSTION DE LA BIOMASSE :

Les technologies du four à grilles et du four à lit fluidisé couramment utilisées pour la combustion de la biomasse conduisent à la formation de polluants tels que les NO_x, le CO, les hydrocarbures (légers et aromatiques), les acides (HCl) et les métaux lourds. Les taux de ces polluants dépendent à la fois de la nature de la biomasse et des conditions opératoires.

Le four à grilles ne permet pas toujours de réaliser une combustion homogène en température car celle-ci peut varier selon la position du combustible sur les grilles. Les travaux de **NUSSBAUMER** sur le bois, la paille, la pelouse et le miscanthus donnent les taux de polluants suivants :

- Lorsque l'excès d'air est compris entre 1,5 et 2, les taux de CO émis lors de la combustion varient de 20 à 50 mg.Nm⁻³, tandis que les hydrocarbures légers restent inférieurs à 10 mg.Nm⁻³ et les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont pratiquement inexistantes.
- Lorsque l'excès d'air est compris entre 2 et 4, les taux de ces polluants croissent sensiblement. Ainsi le CO émis est de l'ordre de 1000 à 5000 mg.Nm⁻³, les hydrocarbures légers varient de 100 à 500 mg.Nm⁻³, et les HAP sont de l'ordre de 10 mg.Nm⁻³.

La composition intrinsèque de la biomasse entraîne aussi la formation de polluants. Ainsi, la combustion de bois feuillus et de bois résineux rejettent 100 à 250 mg.Nm⁻³ de NO_x. Ces taux sont plus importants pour les cosses de riz (200 à 350 mg.Nm⁻³) et les cosses de café (400 mg.Nm⁻³). La combustion du bois de pin ou d'agglomérés rejettent entre 400 et 600 mg.Nm⁻³ de

NOx. Les plus forts taux de ces polluants sont atteints lors de la combustion de la paille, de la pelouse ou encore du miscanthus : 300 à 800 mg.Nm⁻³ de NOx, 100 à 1000 mg.Nm⁻³ d'acide chlorhydrique et 20 à 100 mg.Nm⁻³ de métaux lourds.

La technologie du four à lit fluidisé présente l'avantage d'assurer un bon mélange entre combustible et comburant et par suite une bonne homogénéité des températures et donc des conditions de combustion dans le four. Cependant, cette homogénéité est difficile à obtenir dans le cas de la biomasse. En effet, la littérature mentionne le fait que la différence de granulométrie et de densité entre la biomasse et le lit inerte de sable ainsi que la difficulté d'alimentation du four ne permettent pas de réaliser une bonne combustion et donc de limiter la quantité de polluants émis. Les taux des polluants émis lors de la combustion de diverses biomasses (cosses de riz, bagasse, sciure de bois) sont du même ordre que ceux obtenus dans les fours à grilles. Des essais effectués respectivement avec le roseau chinois et les boues usées à 850°C et 6 % d'oxygène donnent les taux de polluants suivants [KAFFERSTEIN]:

- CO : 186 mg.Nm⁻³ et 96 mg.Nm⁻³,
- NO : 320 mg.Nm⁻³ et 140 mg.Nm⁻³,
- SO₂ : 67 mg.Nm⁻³ et 2389 mg.Nm⁻³,
- Hydrocarbures légers : 21 mg.Nm⁻³ et 5 mg.Nm⁻³.

4 - CONCLUSION

La valorisation énergétique de la biomasse par la combustion est une technique couramment utilisée. La qualité de la combustion (faisabilité, coût financier, rendement thermique, taux de pollution) dépend de la composition des biomasses, de la technologie utilisée et du mode opératoire choisi.

Certaines propriétés physico-chimiques de la biomasse (faible masse volumique, taux d'humidité élevé, richesse en espèces volatiles, fusibilité des cendres à basse température) rendent sa combustion moins facile que celle des combustibles fossiles.

Deux technologies sont couramment utilisées pour la combustion de la biomasse : les fours à grilles et les fours à lit fluidisé.

Le four à grilles est préconisé pour des petites unités. Elle permet de réaliser la combustion de combustibles hétérogènes, de taille variable et à forte humidité. L'alimentation du four en mode continu est celle qui donne de meilleurs résultats en terme de rendement de combustion et de

faible pollution. Toutefois, cette technologie nécessite l'adjonction d'équipements supplémentaires pour la réduction des NOx.

Les fours à lit fluidisé sont utilisés dans les grandes installations de production d'énergie. Le principe de ces fours (brûler le combustible solide dans un lit de matériau inerte, souvent du sable, mis en suspension par injection d'air à sa base) permet un meilleur transfert de chaleur entre matériau inerte et combustible et donc une meilleure combustion. Cependant, ce résultat ne peut être obtenu que si la biomasse et le matériau inerte ont une granulométrie assez proche. Cette condition n'est pas toujours remplie. De ce fait on observe très souvent une séparation entre biomasse et sable qui se traduit par un fort taux d'imbrûlés dans les cendres et dans les fumées. Les cendres de la biomasse sont riches en sels divers et notamment en sels alcalins. Lors de la combustion, ces sels réagissent avec la silice (principale composante du sable) pour former une entité dont le point de fusion est à peu près de 800 °C, température de combustion de la biomasse. Cette fusibilité des cendres entraîne le frittage du lit fluidisé de même qu'elle provoque l'encrassement des parois internes du four et le risque de corrosion.

Cette difficulté peut être résolue par l'utilisation de l'oxyde ferreux à la place du sable. Cependant, cette solution a l'inconvénient d'être plus onéreuse et donc moins intéressante sur le plan industriel.

V – COCOMBUSTION CHARBON – BIOMASSE

La bibliographie sur la cocombustion mentionne essentiellement la combustion du mélange charbon – biomasse. Elle est envisagée pour répondre à un double impératif économique et environnemental. Sur le plan économique, elle vise à réaliser la valorisation énergétique de la biomasse. Sur le plan environnemental, l'utilisation de la biomasse participe à la lutte contre l'effet de serre. La combustion de la phytomasse (biomasse d'origine végétale) aboutit à un bilan nul en terme de production de dioxyde de carbone. En effet, la photosynthèse est le processus par lequel les végétaux verts croissent et créent de la matière organique à partir du dioxyde de carbone, de l'eau et de la lumière solaire. Le CO₂ rejeté par la biomasse pendant sa combustion correspond donc à celui qu'elle a emmagasiné pour sa croissance.

La combinaison entre la haute teneur en carbone du charbon, le taux élevé de volatiles de la biomasse et sa faible teneur en azote peut permettre d'obtenir à la fois un bon rendement de combustion et une réduction des émissions de NO_x.

Les modes de cocombustion se distinguent par le type de chaudière utilisé qui peut lui-même être décrit selon le système d'alimentation du four. Le premier mode de description permet de distinguer trois types de chaudières : la chaudière à charbon pulvérisé, la chaudière à lit fluidisé et la chaudière à grilles. Dans la suite de ce rapport, nous présenterons les principaux résultats suivant ce mode.

Les différents modes d'alimentation rencontrés sont les suivants :

ystème 1 : l'approvisionnement du four et des brûleurs des combustibles sont séparés. Ce système permet un bon contrôle de l'approvisionnement du four en combustibles. Il permet de réduire les risques de colmatage. Le rendement énergétique global est plus faible à cause du faible P.C.I. de la biomasse.

ystème 2 : l'alimentation du four en combustibles est séparée, mais le brûleur est commun (brûleur mono swirl). Ce type de brûleur permet le mélange des deux combustibles dans son quart interne grâce à l'action de l'air secondaire. Ce mélange assure une meilleure combustion du mélange et la réduction des polluants gazeux. Par contre, le fonctionnement du swirler est souvent perturbé par le mélange de combustibles (risque de colmatage).

ystème 3 : les combustibles sont préalablement mélangés. Le mélange est ensuite introduit dans la chaudière. Le rendement de la combustion est meilleure de même que la réduction des

polluants. Mais ce système est régulièrement perturbé par la différence de granulométrie entre biomasse et charbon. De plus il est financièrement le plus coûteux car il faut des broyeurs spécifiques pour chaque type de biomasse.

1 – CHAUDIERE A CHARBON PULVERISE :

a) Performance thermique de la chaudière – Granulométrie - Polluants

Peu de travaux donnent des valeurs chiffrées sur les performances thermiques des chaudières lors de la cocombustion charbon – biomasse. Les auteurs signalent tout au plus une légère baisse de la température de flamme lorsque la proportion de biomasse dans le mélange atteint 35 % (en masse). La puissance restituée dans ces conditions n'est pas évoquée.

BOYLAN a réalisé la combustion du mélange charbon – bois dans une chaudière à charbon pulvérisé industrielle de 100 MW. Le bois utilisé est un mélange de déchets de bois constitué de sciure et de taillis dont l'humidité est de 19 % et le P.C.I estimé à 16000 kJ.kg^{-1} . Le charbon a un P.C.I de 29000 kJ.kg^{-1} . Les déchets de bois sont préalablement broyés pour obtenir des particules de 2 à 15 cm de long et 2 cm de diamètre. Les deux combustibles sont **prémélangés** avant introduction dans le four. La cocombustion du mélange dans les proportions 87 % de charbon - 17 % de bois (pourcentage en masse) montre de faibles pertes de rendement thermique de la chaudière en fonction du taux d'oxygène mesuré à la sortie (dans les fumées). La combustion du charbon seul à 3,5 % d'oxygène produit un rendement thermique moyen de 87,6 %. Lors de la cocombustion charbon – biomasse, ce rendement thermique baisse de 0,8 % à faible taux d'oxygène (2,5 %). Cette perte n'est plus que de 0,4 % à 3,5 % d'oxygène. Lorsque le taux d'oxygène atteint 4,5 %, il n'y a pratiquement plus de différence entre les rendements thermiques de la monocombustion du charbon et de la cocombustion.

AERTS et al ont conduit des expériences de cocombustion charbon - herbe (pelouse) dans une chaudière à charbon pulvérisé de 50 MW avec brûleurs en parois. Chacun des combustibles est introduit **individuellement** dans le four. Chaque combustible a un brûleur spécifique (trois brûleurs charbon pour un brûleur de biomasse). Les P.C.I du charbon et de l'herbe sont respectivement de 25500 kJ.kg^{-1} et 15900 kJ.kg^{-1} . Les particules de biomasse sont en moyenne 10 fois plus grandes (1 mm) que celles du charbon (0,1 mm). Le faible P.C.I et la grande taille des particules de gazon ne semblent pas affecter les performances de la chaudière. D'après les

auteurs, ce résultat est dû à la richesse de la biomasse en espèces volatiles qui, en brûlant rapidement, accélèrent la combustion des résidus charbonneux.

Ce dispositif permet d'obtenir une réduction des NOx de 20 % que les auteurs attribuent à la faible teneur du gazon en azote. Il n'y a par contre pas de réduction significative du taux de SO₂.

La quantité de carbone imbrûlé dans les cendres est de l'ordre de 5 % en cocombustion. Ce taux n'est pas significativement différent de celui obtenu lors de la combustion du charbon seul.

Une autre série de travaux avec des mélanges charbon – paille et charbon – miscanthus a été menée aussi bien sur pilote de laboratoire que dans des chaudières industrielles. Ainsi, **MESCHGBIZ** et **KRUMBERG** ont étudié ces deux mélanges dans une chaudière de 1 MW dont la chambre de combustion en forme de U est équipée de brûleurs verticaux orientés vers le bas. Les combustibles sont **prémélangés** et introduits dans le brûleur via un dispositif de recirculation des fumées.

La proportion de paille dans le mélange peut atteindre 47 % (en masse) sans provoquer de difficultés particulières sur le déroulement de la cocombustion. Dans le cas du mélange charbon – miscanthus, les auteurs observent un fléchissement notable du rendement énergétique et une augmentation du taux de CO lorsque la proportion de bois dans le mélange dépasse 36 % (en masse) et avec un excès d'air inférieur à 110 %. L'inflammation et le rendement thermique sont améliorés par un bon séchage des combustibles.

L'influence de la granulométrie de la biomasse sur le rendement thermique de la cocombustion a également été étudiée par **KICHERER et al** sur une chaudière à charbon pulvérisé de 500 MWt équipée de brûleurs en parois. Deux séries d'échantillons ont été étudiées : la première contenait des particules de paille de 0,75 mm de diamètre tandis que dans la seconde, elles avaient un diamètre de 6 mm. Plus les particules de biomasse sont fines, plus on peut augmenter la proportion de biomasse dans le mélange (jusqu'à 57 % en masse) sans affecter significativement le rendement thermique. Cette augmentation de la biomasse dans le mélange entraîne une réduction de la quantité de NOx émise.

La réduction des NOx ainsi observée peut s'expliquer par la faible teneur de la biomasse en azote. Elle peut aussi être due au fait que la biomasse est très riche en espèces volatiles dont la libération pendant la combustion rend le milieu plus réducteur et donc moins propice à la transformation de l'azote du combustible en oxyde d'azote.

Dans le même ordre d'idées, **SPLIETHOFF** et **HEIN** ont travaillé avec un mélange similaire au précédent, mais sur une installation de plus petite performance (0,5 MW) figure 9

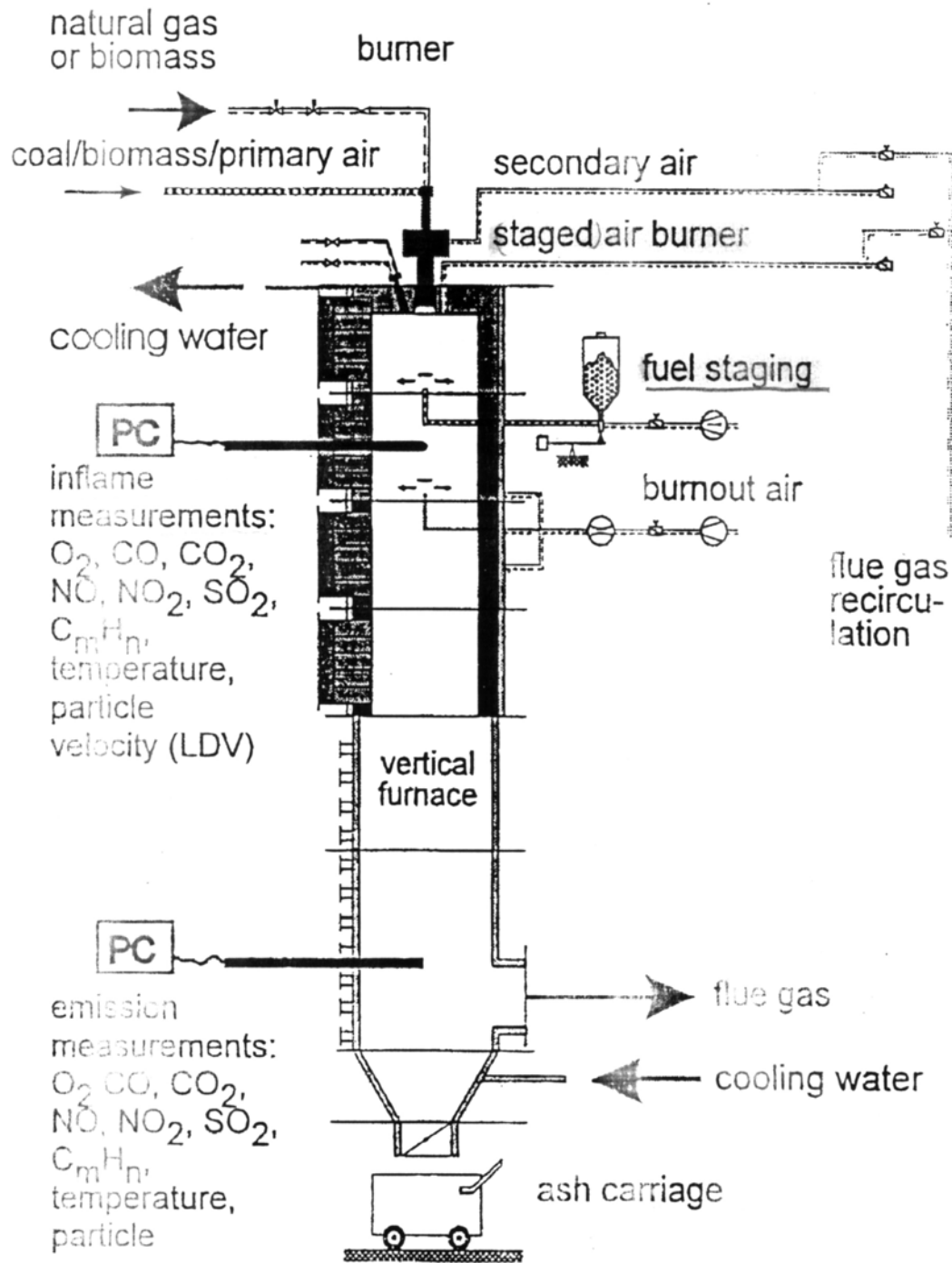


Figure 9 : Dispositif expérimental [SPLIETHOFF et HEIN]

Le charbon utilisé a un P.C.I de 30100 kJ.kg^{-1} tandis que la paille a un taux d'humidité de 11 % et un P.C.I de 17000 kJ.kg^{-1} . Ils concluent que le diamètre optimum de la paille pour un bon rendement de cocombustion est de 6 mm.

L'influence de la taille des particules est plus sensible sur les petites installations. Notons que plusieurs auteurs s'accordent sur la nécessité de travaux ultérieurs sur la taille optimum des particules de biomasse en cocombustion. En effet, le conditionnement de la biomasse demeure un des obstacles à surmonter afin de rendre son exploitation industrielle moins contraignante.

b) Effet du type de brûleur et du mode d'injection des combustibles sur la cocombustion et sur les polluants émis.

SIEGEL et **al** ont étudié l'effet des différentes configurations de brûleurs swirl sur les émissions de NOx lors de la combustion de mélanges charbon - paille et charbon - coques de céréales. Cette étude a été conduite sur une chaudière à charbon pulvérisé de 500 KW équipée de brûleurs en parois. Deux modes de cocombustion ont été expérimentés : **l'injection séparée** des deux combustibles d'une part et l'injection du **mélange** des deux combustibles d'autre part. Le schéma ci-dessous présente deux configurations possibles du brûleur swirl (figure 10)

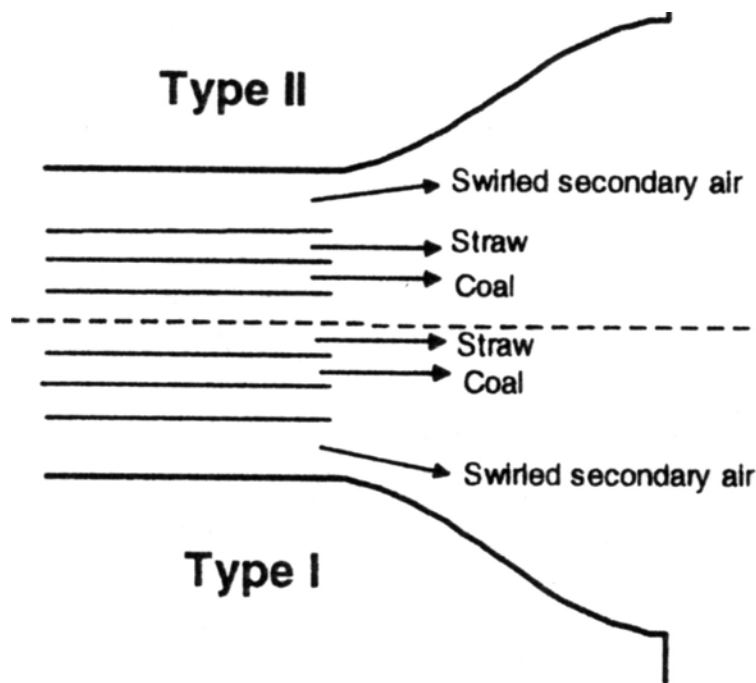


Figure 10 : Configurations du brûleur swirl [SIEGEL et al]

Lorsque les combustibles sont **prémélangés** et introduits dans le four par le tuyau annulaire du brûleur swirl, la réduction de NOx obtenue n'est pas significative quel que soit le pourcentage de biomasse.

Si l'introduction des combustibles se fait séparément, on distingue deux cas de figures :

- avec un taux élevé de biomasse (75 % en masse), le meilleur abattement de NOx est obtenu par injection du charbon par la tuyère annulaire et de la biomasse par la tuyère centrale,
- à l'inverse, lorsque le taux de biomasse reste inférieure à 57 % (en masse), on obtient une meilleure réduction des NOx en injectant le charbon dans la tuyère centrale et la biomasse dans la tuyère annulaire.

Toutes ces observations ont été faites avec un taux d'oxygène de 6 %. Toutefois, les auteurs notent une chute sensible du rendement de combustion quand le taux de biomasse atteint 40 % de la masse du mélange.

PEDERSEN et al ont comparé les taux de NOx et SO₂ émis lors de la cocombustion charbon – paille dans deux chaudières à charbon pulvérisé de taille différente : une chaudière industrielle de 250 MWe et un pilote semi-industriel de 2.5 MWt. Toutes les deux sont équipées de brûleurs swirl. La chaudière industrielle est équipée de 16 brûleurs en parois répartis en deux rangées de 4 et positionnés sur les faces antérieures et postérieures du four. Le pilote semi-industriel est équipé d'un four d'une capacité de 25 m³. Le brûleur swirl de ce pilote permet deux modes d'injection du combustible : injection de la paille dans l'anneau central ou dans un anneau périphérique entourant l'anneau central. L'air primaire est préchauffé à 70 °C et l'air secondaire à 300 °C. Le charbon utilisé dans cette étude est un charbon bitumineux riche en volatiles et en soufre et dont le P.C.I est de 29200 kJ.kg⁻¹. La paille a une humidité de 10 % et un P.C.I de 15000 kJ.kg⁻¹.

Les essais sur la chaudière industrielle (avec une variation de la proportion de paille de 0 % à 33 % de la masse du mélange) montrent que la flamme de combustion reste stable quand on augmente la proportion de biomasse dans le mélange jusqu'à 33 %. On observe un léger noircissement de la flamme à la sortie du brûleur en cocombustion. La proportion de carbone fixe dans les cendres est au maximum de 10 %.

Les essais sur le pilote semi-industriel de 2,5 MW montrent qu'il y a une légère baisse du rendement thermique lorsque la proportion de biomasse dans le mélange dépasse 55 %.

Le taux de NO baisse quand la fraction de biomasse du mélange augmente, aussi bien dans le four industriel que sur le pilote et indépendamment du mode d'inflammation.

Le calcul du taux de conversion de l'azote du combustible en monoxyde d'azote montre une baisse proportionnelle à l'augmentation de la paille dans le mélange. Cette réduction de NO est encore due au fait que la paille est très riche en espèces volatiles. De ce fait, l'augmentation de la paille entraîne la libération d'une plus grande quantité d'espèces volatiles dans le réacteur lors de la phase de dévolatilisation. Ces espèces volatiles modifient la stœchiométrie dans la zone proche des brûleurs, la rendant plus réductrice. La conversion de l'azote du combustible en NO est donc fortement diminuée.

Le taux de SO₂ baisse également avec l'augmentation de la paille dans le mélange, aussi bien sur chaudière industrielle que sur pilote. Cette baisse s'explique par la faible teneur de la biomasse en soufre. De plus, les cendres de la biomasse sont riches en sels alcalins qui piègent le soufre. Toutefois la fusibilité de ces cendres à la température de combustion du mélange (750 °C – 850 °C) peut provoquer l'encrassement et la corrosion du four.

D'autres travaux ont étendu cette étude à d'autres combustibles comme la sciure de bois, les boues usées et divers déchets municipaux.

ABBAS et al ont travaillé sur les mélanges charbon – sciure de bois de pin et charbon – boues usées. Le pilote de laboratoire de 500 kW utilisé est équipé de brûleurs swirl en parois. Le P.C.I du charbon est de 32200 kJ.kg⁻¹ tandis que celui de la sciure de bois de pin est de 18100 kJ.kg⁻¹. La combustion de ce mélange montre une amélioration du rendement de combustion et un abattement du taux de NO_x si la sciure de bois est introduite avec l'air primaire par le tuyau central et si le charbon est injecté par le tuyau annulaire. Ce mode d'injection conduit à un encerclement des particules de biomasse. Le flux de biomasse qui est central repousse les espèces volatiles du charbon dans une zone pauvre en oxygène, provoquant ainsi une réduction de la formation initiale du NO.

Le résultat inverse est obtenu lorsque l'injection du charbon est faite dans le tuyau central et celle de la biomasse dans le tuyau annulaire.

L'optimisation du rendement de combustion et l'abattement des NO_x sont obtenus avec un pourcentage de biomasse en masse de l'ordre de 39 % pour la sciure de bois et 37 % pour les boues usées. Ces résultats soulignent la nécessité de connaître la proportion en azote de chacun des combustibles avant le choix du mode d'injection des combustibles.

c) Étagements du comburant et du combustible :

BROUWER et al ont étudié l'influence des étagements du comburant et du combustible (reburning) sur les émissions de NO_x lors de la cocombustion charbon – bois. Lorsque la combustion n'est pas étagée, le taux de NO_x est une fonction décroissante de la proportion de biomasse. Toutefois, cet abattement reste inférieur à ce qu'il devrait être compte tenu de la diminution de la proportion d'azote dans le mélange. Avec l'étagement de l'air secondaire, on observe une réduction significative des NO_x quand la proportion de la biomasse dans le mélange est supérieure à 65 % (en masse).

Des essais de reburning ont aussi été menés lors de cette étude. L'injection du bois dans une zone secondaire entraîne une réduction des NO_x semblable à celle obtenue avec le charbon et le gaz naturel à 1400 °C. Toutefois, lorsque le taux de NO_x est faible dans la zone de reburning (200 ppm-500 ppm), le bois permet un meilleur abattement de NO_x que le charbon. D'après **STANLEY et al**, ce résultat s'explique par le fait qu'en plus de sa richesse en espèces volatiles dont la libération lors de la dévolatilisation provoque une modification de la stœchiométrie dans la zone de reburning, le bois contient moins d'azote que le charbon et le gaz naturel. Le bois contient aussi peu de soufre par rapport au charbon, ce qui permet aussi la réduction du SO₂.

La cocombustion charbon – bois dans une chaudière à charbon pulvérisé permet d'obtenir un abattement des NO_x. Mais cet abattement reste en deçà des résultats escomptés par rapport à la quantité de bois introduite dans le mélange. L'utilisation de la biomasse comme combustible de reburning permet de réduire plus significativement les NO_x. En effet ce procédé permet de réduire jusqu'à 70 % des NO_x en respectant certaines conditions bien précises dans la zone de reburning : temps de séjour de l'ordre de 400 ms, température de 1700 K, un excès d'air de 85 % à 90 %.

RUDIGER et al ont montré que les gaz de pyrolyse de la biomasse pouvaient aussi être utilisés comme combustible de reburning avec succès. Ce procédé peut permettre de s'affranchir des problèmes d'encrassement et de corrosion causés par les cendres de la biomasse qui sont riches en sels alcalins et en chlore.

FRAZZITA et al ont expérimenté la cocombustion charbon – déjections animales sur un pilote de laboratoire de 35 kW équipé d'un brûleur swirl. Le P.C.I de la biomasse utilisé ici est particulièrement faible (8650 kJ.kg⁻¹), celui du charbon est de 26500 kJ.kg⁻¹. Les deux combustibles sont prémélangés dans la proportion 20 % - 80 % (en masse). Trois formes de

déjections animales ont été utilisées : les déjections fraîchement collectées (lot n° 1), les déjections partiellement compostées c'est à dire empilées et séchées à l'air libre pendant 30 jours (lot n° 2) et les déjections ayant subi un séchage supérieur à 120 jours (lot 3). Les combustibles sont mélangés puis introduits dans le four. Celui-ci est préchauffé. L'air secondaire est également préchauffé à 200 °C.

Les principaux paramètres suivis pendant ces essais sont le rendement de combustion, la température de combustion et la composition des fumées.

Quand la fraction de combustible brûlé atteint 95 %, la distribution de température est sensiblement la même en monocombustion du charbon qu'en cocombustion (à 3 % d'oxygène). L'apport des déjections animales ne semble pas affecter la stabilité de la flamme. Le taux de NOx ne varie pas sensiblement selon le lot de déjection animale utilisé. Pour la combustion du charbon seul, le taux de NOx (à 95 % de combustible brûlé et 3 % d'oxygène) est de 530 ppm. En cocombustion, il n'y a pas de variation significative du taux de NOx suivant le type de déjection utilisé : 555 ppm pour le lot 3 (35 % d'humidité), 500 ppm pour le lot 1 (36,6 % d'humidité) et 480 ppm pour le lot 2 (30 % d'humidité). L'humidité ne semble pas influencer le taux de NOx.

Le taux de SO₂ mesuré en cocombustion est inférieur à celui obtenu en monocombustion du charbon. Les déjections animales contiennent beaucoup de cendres (5 à 6 fois plus que le charbon). Ces cendres sont riches en sels alcalins qui se comportent comme des pièges à soufre, ce qui expliquerait les faibles taux de SO₂ mesurés.

2 – FOURS A LIT FLUIDISE :

Les travaux de **FAHLSTEDT et al** portent sur la cocombustion charbon - copeaux de bois, charbon - noyaux d'olive et charbon - coque de noix de palme. Cette série d'expériences a été menée sur un pilote de laboratoire de 1MW. La proportion de biomasse varie de 20 % à 24 % pour les noyaux d'olive et les coques de noix de palme, et jusqu'à 40 % pour les copeaux de bois (pourcentage en masse de matière sèche). Le tableau ci-dessous présente les principaux résultats :

| Combustible | Bois (20 %) | Bois (40 %) | Noyaux Olive (24 %) | Noix de palme (24%) | Charbon (100 %) |
|----------------------------|-------------|-------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| Rendement combustion (%) | 97,6 | 97,2 | 97,9 | 98,1 | 97,1 |
| T° du lit (°C) | 839 | 840 | 843 | 840 | 840 |
| T° au dessus du lit (°C) | 785 | 779 | 794 | 794 | 784 |
| NOx (mg.Mj ⁻¹) | 77 | 57 | 90 | 101 | 141 |

Figure 14 : résultats de cocombustion en four à lit fluidisé [FAHLSTEDT et al]

La richesse de la biomasse en espèces volatiles conduit à un maintien du rendement de la cocombustion par rapport à la combustion du charbon seul. L'augmentation de la proportion du bois (de 20 % à 40 %) entraîne une réduction des NOx de l'ordre de 25 %. Cette tendance est également observée (même de façon moins marquée) avec les noyaux d'olive et les coques de noix de palme qui, en plus de leur teneur en espèces volatiles, ont une faible teneur en azote. Par contre, les essais avec les coques de noix de palme montrent une augmentation des dépôts d'oxydes, ce qui accroît la probabilité d'encrassement et de corrosion du four.

Des résultats similaires sont obtenus par ANDRIES et al avec un mélange charbon – paille sur un pilote de 1,6 MWt. Les combustibles sont préalablement **mélangés** avant injection dans la chambre de combustion. Lors de la cocombustion, la température en amont de la surface du lit fluidisé est supérieure de 30 K à celle relevée lors de la combustion du charbon seul. Cette zone de température élevée correspond à la zone de combustion des espèces volatiles qui sont libérées en grandes quantités par la biomasse.

VAN DOORN et al ont comparé la cocombustion de trois biomasses différentes mélangées avec le charbon : le bois qui a un P.C.I. moyen de 18000 kJ.kg⁻¹ et peu de cendres (0,4 %), la paille qui est un peu plus riche en cendres et dont le P.C.I. est de l'ordre de 15000 kJ.kg⁻¹ et les boues usées de station d'épuration municipale qui ont le plus faible P.C.I. des trois biomasses (8000 kJ.kg⁻¹) et le taux de cendre le plus élevé (40 %). Dans les trois cas, les combustibles sont **prémélangés** avant introduction dans la chambre de combustion.

Le mélange charbon – bois est celui qui donne les meilleurs résultats en terme de facilité de cocombustion (pas de frittage du lit) et de réduction des NOx et SO₂.

Le mélange charbon – paille donne les même tendances. Toutefois, il présente l'inconvénient de rejeter des quantités non négligeables d'acide chlorhydrique quand la proportion de paille augmente.

La combustion du mélange charbon – boues usées provoque un frittage du lit fluidisé et tend à augmenter les émissions de NO_x et de SO₂, problème très probablement lié à la quantité et la composition des cendres des boues activées.

a) Effet de l'étagement du comburant :

GULYURTHU et al ont travaillé avec un four à lit fluidisé pilote de 300 KW dans lequel ils ont réalisé la cocombustion d'une variété de bois et de paille avec le charbon Sud – Africain. Le tableau ci-dessous regroupe les principales caractéristiques des résidus agricoles utilisés.

| Combustibles | Charbon | Bois | Ecorce de bois | Paille |
|------------------------------|----------------|-------------|-----------------------|---------------|
| P.C.I (kJ.kg ⁻¹) | 28000 | 16000 | 3800 | 4200 |
| Humidité (%) | - | 4,5 | 10 | 5,5 |
| Cendres (%) | 14 | 1,2 | 5 | 4 |
| S (%) | 0,8 | 0 | 0 | 0 |
| N (%) | 1,58 | 0,06 | 0,15 | 0,5 |

Tableau 15: Caractéristiques des combustibles

Les conditions opératoires sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

| | |
|---|------------|
| Température du lit fluidisé (°C) | 750 - 800 |
| Débit d'introduction du charbon (kg.h ⁻¹) | 4,5 – 6,5 |
| Débit d'introduction du bois (kg.h ⁻¹) | 1,5 – 4,5 |
| Débit d'introduction de la paille (kg.h ⁻¹) | 0,45 – 1,2 |
| Débit des gaz (m.s ⁻¹) | 1 – 4,5 |
| Excès d'air (%) | 20 – 100 |
| Particules de biomasse (mm) | 0,5 – 4 |
| Particules de sable (mm) | 0,5 |

Tableau 16: conditions opératoires

Le charbon dont les particules ont un diamètre moyen de 1 mm est introduit dans le four par un système pneumatique. L'introduction de la paille et du bois est plus difficile à cause de la variation de la granulométrie. La température optimum pour le meilleur rendement de

combustion est de 850 °C. Lorsque l'excès d'air atteint 100 %, le rendement de combustion baisse. En effet à ce taux, les petites particules de biomasse ont tendance à se séparer des particules de sable et de charbon et donc à passer dans les imbrûlés.

La répartition du comburant semble jouer un rôle important ici. En effet, lorsque le taux de biomasse dépasse 30 % et que le comburant n'est pas étagé, la quantité d'imbrûlés augmente de façon significative. Cette tendance disparaît lorsque le comburant est étagé. Cet étagement assure un bon mélange entre les espèces libérées par la biomasse et le comburant.

A 850 °C et avec un excès d'air de 40 %, les taux de NO_x et SO₂ sont inférieurs à ceux observés pour la combustion du charbon. Plus particulièrement, le taux de conversion de l'azote du combustible en NO_x baisse en moyenne de 10 % quand la proportion de biomasse dans le mélange passe de 10 % à 40 % (en masse).

b) Comparaison Lit Fluidisé Dense (LFD) et Lit Fluidisé Circulant (LFC)

ARNESTO et al ont travaillé sur le mélange charbon – bois de pin (en copeaux) en utilisant deux types de fours à lits fluidisés : le lit fluidisé circulant (L.F.C) et le lit fluidisé dense (L.F.D). Le meilleur rendement de combustion est obtenu avec le lit fluidisé circulant qui présente l'avantage d'assurer un meilleur mélange entre combustibles – comburant, permettant ainsi une meilleure combustion et donc une réduction du monoxyde de carbone. Avec les deux dispositifs, la réduction de NO_x et de SO₂ est obtenue quand la proportion de biomasse augmente dans le mélange.

Dans le même ordre d'idée, **RASMUSSEN et CLAUSEN** notent une chute du taux de SO₂ lors de la cocombustion charbon – paille en lit fluidisé circulant (pilote de 80 MWt). Cette réduction de SO₂ est proportionnelle à l'augmentation de quantité de paille (moins riche en soufre que le charbon) dans le mélange. On peut également supposer que la cendre de paille joue le rôle de piège à soufre.

L'augmentation de la fraction de biomasse dans le mélange entraîne une diminution de la température de combustion et une stabilisation du taux de NO_x émis.

3 – FOURS A GRILLES:

SAMPSON et al ont réalisé la cocombustion charbon – copeaux de bois dans une chaudière à grilles « spreader stoker » (figure 11). Ce dispositif est constitué de deux séries de

grilles mobiles superposées. Sur les premières grilles situées dans le bas de la chaudière, le charbon pulvérisé est injecté et enflammé en divers points de la grille. La biomasse est introduite par les autres grilles situées au-dessus de celles du charbon. Les particules de biomasse tombent sur celles incandescentes du charbon. Un cyclone permet de collecter les cendres volantes et de les réinjecter sur la grille du charbon pulvérisé.

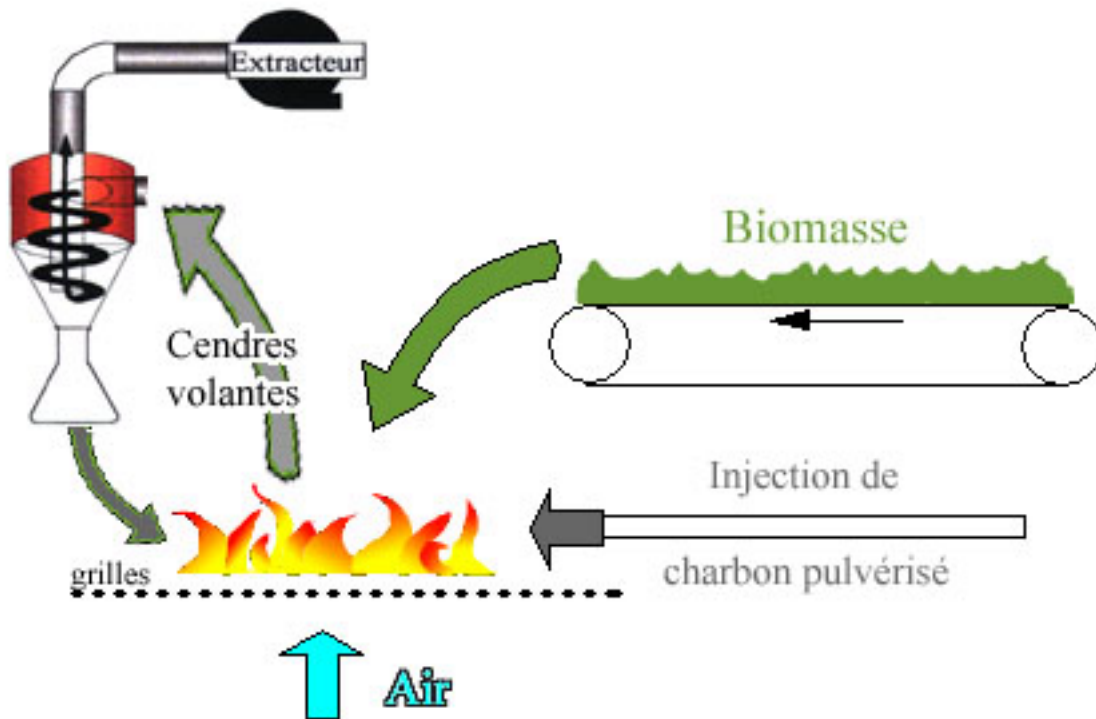


Figure 11 : Schéma de principe du « Spreader stoker »

Le P.C.S. des bois utilisés est en moyenne de 19500 kJ.kg^{-1} et celui du charbon de 25000 kJ.kg^{-1} . La proportion de la biomasse dans le mélange varie de 10 % à 22 % (pourcentage en masse de matière sèche). Les auteurs ne communiquent pas d'information sur la granulométrie des combustibles ni sur les taux de NO_x et de SO_x . La combustion d'un mélange contenant 30 % de biomasse n'a pas pu être réalisée avec ce dispositif.

BROUWER et al ont utilisé ce type de dispositif pour la cocombustion du charbon – copeaux de bois (traverses de chemin de fer). Le mélange utilisé est de 80 % - 20 % (en masse) de charbon et de bois respectivement.

Avec un excès d'air de 50 %, les NO_x sont réduits de 25 % et le CO est inférieur à 20 ppm. A 40 % d'excès d'air, le taux de CO est largement inférieur en cocombustion par rapport au charbon seul. On peut donc penser que le rendement de la cocombustion est meilleur que celui de la

monocombustion du charbon. Par contre, cette réduction du CO s'accompagne d'une augmentation du taux de NOx. Lorsque l'excès d'air est de 20 %, le taux de NO est le même en monocombustion qu'en cocombustion

OHLSSON a travaillé sur la cocombustion charbon – déchets ménagers solides (88 % - 12 % en masse) prémélangés dans une chaudière à brûleur cyclone de 440 MW.

La réduction des NOx est assez faible (2 % à 3 %).

La réduction du SO₂ est de l'ordre de 17 % par rapport à la combustion du charbon seul. Elle est due à la fois à la faible teneur des déchets ménagers en soufre et plus probablement à la capture du SO₂ par l'hydroxyde de calcium des déchets ménagers.

4 - SYNTHÈSE SUR LES POLLUANTS ÉMIS EN COCOMBUSTION :

La bibliographie sur la cocombustion mentionne essentiellement la combustion du mélange charbon – biomasse. La combinaison entre la haute teneur en carbone du charbon (et donc de son fort P.C.I.) et le taux élevé en espèces volatiles de la biomasse, ainsi que sa faible teneur en soufre par rapport au charbon, permet d'envisager un bon rendement thermique de combustion tout en limitant les émissions polluantes de NOx, SOx et CO.

Fours à Charbon Pulvérisé :

- i) Le rendement thermique : Pour le **mélange charbon – bois** (87%-13%) ; le rendement thermique n'est pas sensiblement modifié par rapport à la combustion du charbon seul (87 %) si le taux d'oxygène en sortie est à 4,5 % [BOYLAN]. La tendance est la même avec le mélange **charbon – paille** tant que le taux de biomasse ne dépasse pas 33 %. [AERTS, PEDERSEN]. A l'inverse, le mélange **charbon – miscanthus** montre une baisse du rendement thermique proportionnelle à l'augmentation du miscanthus.
- ii) Polluants (NOx, SO₂, CO) : Pour le **mélange charbon – pelouse** : réduction des NOx de 20 %, pas de réduction de SO₂. Les mélanges **charbon – paille, charbon – coques de céréales, charbon – boues usées** et **charbon – bois** donnent des réductions de NOx du même ordre de grandeur et proportionnelles à l'augmentation du taux de biomasse dans le mélange. Le facteur limitant ici est la proportion de biomasse dans le

mélange. Pour contourner cette difficulté, les auteurs ont expérimenté divers modes opératoires comme l'utilisation de brûleurs Swirl, l'étagement du comburant ou encore le reburning. Les meilleurs résultats en terme de réduction des NOx ont été obtenus en utilisant le bois comme combustible de reburning. Ce procédé a permis un abattement des NOx de 75 % [STANLEY].

Fours à lit fluidisé : Les mélanges **charbon – copeaux de bois** (60 %-40 %), **charbon – noyaux d'olives** (75 %-25 %), **charbon – coque de noix de palme** (75 %-25 %) permettent d'obtenir une réduction de NOx de 25 % (pour le premier) à 20 %.

Le mélange **charbon – paille** permet aussi une réduction de NOx et de SO₂, mais il y a des émissions non négligeables de HCl. La combustion du mélange **charbon – boues de station d'épuration** provoque l'augmentation des NOx et SO₂. Par ailleurs, lorsque le taux de biomasse est supérieur à 30 % dans tous ces mélanges, et que la combustion se fait sans étagement d'air, il y a augmentation du taux de CO.

Fours à Grilles : La combustion du mélange **charbon – copeaux de bois** permet d'obtenir une réduction de NOx de 25 %. Le taux de CO reste inférieur à 20 ppm. Le mélange charbon – déchets ménagers (88 %-12 %) ne permet qu'une réduction très infime de NOx (2 à 3 %) et de SO₂ (17 %).

Quelle que soit la technique utilisée, le rendement thermique de la cocombustion n'est pas sensiblement modifié tant que la proportion de biomasse reste inférieure à 33 %. Dans ces conditions, la réduction moyenne des NOx est de 20 %.

5 - CONCLUSION :

L'ensemble de ces travaux de cocombustion fait ressortir un certain nombre de caractéristiques communes. Le degré d'efficacité de la cocombustion dépend très souvent de la possibilité de mélanger le charbon et la biomasse. En effet la différence de granulométrie entre ces deux combustibles se fait plus ou moins ressentir selon la technologie de combustion utilisée. Si dans l'ensemble, la combustion du mélange est améliorée par un fin broyage des combustibles,

la différence de taille des particules pose moins de difficultés dans le four à grilles que dans les fours à charbon pulvérisé ou à lit fluidisé.

Dans le four à charbon pulvérisé, la proportion de biomasse dans le mélange dépend essentiellement de la possibilité à broyer plus ou moins finement cette biomasse. Notons que peu d'études mentionnent la taille idéale des particules de biomasse. Divers auteurs mentionnent la nécessité de travaux sur ce paramètre.

Le mélange charbon – biomasse permet de réduire les émissions de NO_x et de SO_x. Cette réduction qui est en moyenne de 20 % est encore plus efficace si la combustion est étagée c'est à dire si le comburant est introduit de façon fractionnée dans la chambre de combustion. Les résultats sont encore meilleurs lorsque la biomasse ou les gaz issus de sa pyrolyse sont utilisés comme combustible de reburning. En effet, des essais avec le mélange charbon – bois ont montré une réduction des NO_x de 70 % lorsque le bois était utilisé comme combustible de reburning. Toutefois, il faut toujours trouver un compromis entre le rendement de combustion et la réduction des oxydes d'azote. En effet la réduction des NO_x s'améliore avec l'augmentation de la proportion de biomasse dans le mélange. Dans le même temps, les essais montrent qu'au delà d'un certain taux de biomasse dans le mélange, la combustion est rendue difficile ou alors elle se fait avec une diminution du rendement thermique et le rejet de beaucoup d'imbrûlés.

Les cendres de la biomasse et notamment de la paille sont riches en sels alcalins (Na₂O, K₂O) et en chlore. Ces éléments sont un véritable handicap à la combustion de la biomasse en lit fluidisé. En effet, ces sels réagissent avec la silice du sable et forment des composés dont le point de fusion est dans la gamme de température de combustion (750 °C – 850 °C). Il en résulte des problèmes de frittage du lit fluidisé et d'encrassement des parois internes du four pouvant conduire à la corrosion.

CONCLUSION

La biomasse est une réalité quantitative de la biosphère dont l'exploitation au plan économique ne saurait se limiter aux productions alimentaires, pour la biomasse agricole, et pour la biomasse forestière, aux productions de bois d'œuvre, de matières industrielles et de combustible domestique. Le contexte énergétique et écologique international permet aujourd'hui de voir en la biomasse végétale une source de biocombustible renouvelable et donc l'impact sur l'effet de serre est quasi-nul.

La valorisation énergétique de la biomasse par la combustion est un procédé ancien qui continue de faire l'objet de nombreuses études permettant de l'améliorer et de l'adapter à un fonctionnement industriel peu polluant.

Les propriétés physico-chimiques de la biomasse rendent sa monocombustion moins facile que celle des combustibles fossiles, notamment du charbon. La biomasse a une faible masse volumique. Elle doit à cause de cela subir un conditionnement particulier (ballots, granulés) afin de faciliter son transport vers les unités de combustion et l'alimentation des fours de combustion en mode continu (système pneumatique, système de vis sans fin) ou semi-continu (système batch).

La biomasse est également caractérisée par un taux élevé d'espèces volatiles. De ce fait, la dévolatilisation se fait à basse température. Cette particularité doit être prise en compte dans le choix de la technologie de combustion et des paramètres opératoires (débit et répartition du comburant). Des essais montrent qu'une alimentation discontinue du four provoque de grandes variations de la dévolatilisation qui, en cas d'excès d'air, entraînent une combustion incomplète et l'augmentation des émissions de poussières et d'imbrûlés dans les fumées (notamment le CO).

Les cendres de la biomasse sont riches en sels alcalins qui constituent un véritable problème pour les fours de combustion. Si le dispositif de combustion n'est pas équipé d'un système efficace d'évacuation des cendres, celles-ci vont se déposer progressivement sur les parois du four et provoquer son encrassement, voire sa corrosion à haute température. Dans les fours à lit fluidisé dont la partie inerte est constituée de sable, ces cendres provoquent le frittage du lit par réaction avec la silice qui est la principale composante du sable. L'analyse des cendres est ainsi une étape préalable indispensable au choix de la technologie et des paramètres opératoires. Une autre

solution possible afin d'éviter le frittage du lit fluidisé est l'utilisation de l'oxyde ferrique à la place du sable. Cette solution techniquement viable a le défaut d'être plus onéreuse. De plus le lit fluidisé à base d'oxyde ferrique nécessite une grande vitesse du courant traversier, ce qui augmente les risques de ségrégation des particules de biomasse dont la masse volumique est faible.

La cocombustion charbon – biomasse permet la double valorisation énergétique et économique de la biomasse. En effet, le coût de la biomasse brute reste inférieur à celui du charbon. Un des problèmes principaux dans ce cadre est que ces deux combustibles ont des propriétés physico-chimiques différentes. Le charbon est riche en carbone et a un P.C.I. assez élevé. La biomasse est plus riche en espèces volatiles et contient moins d'azote et de soufre. La combustion de ce mélange peut ainsi permettre de produire de l'énergie tout en réduisant les émissions de NO_x et SO₂ par rapport à la combustion du charbon seul. De plus elle permet de ne pas augmenter la quantité globale de CO₂.

La réalisation de cette cocombustion n'est pas facile. Plusieurs difficultés se posent avec plus ou moins d'acuité selon le type de technologie utilisé. De plus, les essais décrits dans la littérature sont très souvent réalisés sur des dispositifs initialement conçus pour la combustion du charbon.

La différence de granulométrie entre la biomasse et le charbon pose le double problème du mélange harmonieux des deux combustibles et de l'alimentation du four de combustion. Les fours à charbon pulvérisé sont très utilisés dans les essais de cocombustion. Les études montrent que l'alimentation du four, le déroulement de la combustion, le rendement thermique et les polluants émis sont affectés par la différence de taille des particules des deux combustibles. Des systèmes de broyage et de pulvérisation spécifiques à la biomasse sont donc nécessaires à la réalisation d'un bon mélange.

Les cendres de la biomasse, de part leur composition, jouent le rôle de piège à soufre et participent donc à la réduction des émissions de SO₂. Malheureusement, leur présence augmente le risque de frittage du lit fluidisé, d'encrassement et de corrosion des autres types de fours.

Cette étude bibliographique sur la cocombustion biomasse – combustible fossiles montre la nécessité d'études supplémentaires pouvant permettre une meilleure valorisation des gisements de biomasse non encore exploités. Les essais décrits à ce jour ont été menés soit sur des grandes installations peu adaptées, soit sur des pilotes de laboratoire trop petits pour permettre une extrapolation au niveau industriel. La solution aux problèmes de conditionnement du mélange, de différence de granulométrie et d'alimentation des fours de combustion viendrait probablement

d'essais réalisés sur des pilotes semi-industriels initialement conçus pour la cocombustion. Ces installations pourraient également permettre de réaliser la combustion de la biomasse avec d'autres combustibles fossiles que le charbon, notamment les gaz et les fuels.

BIBLIOGRAPHIE

ABBAS T et al. *The influence of burner injection mode on pulverized coal and biosolid co-fired flames.* Combustion and Flames. Vol 99, pp 617-25 (1994).

AERTS D J et al. *Co-firing switchgrass in a 50 MW pulverized coal boiler.* Proceedings of the 1997 59th Annual American Power Conference, Chicago ; IL, vol. 59(2). Pp 1180-5 (1997)

ANDRIES J et al. *Co-combustion of coal and biomass in a pressurized bubbling fluidized bed.* In : Proceedings of the 14th Conference on Fluidized Bed Combustion, Vancouver, Canada. Vol 1, pp 313-20 (11-14 may 1997).

ARMESTO L et al. *Coal and biomass co-combustion on fluidized bed : comparison of circulating and bubbling fluidized bed technologies.* In : Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion in Vancouver, Canada. Vol 1, pp 301-9 (1997).

BAGEAT Ph. *Incinération des résidus urbains : Technique – Réglementation - Perspectives d'Evolution.* ADEME (novembre 1993)

BAPAT.DW et all. *Design and operating experience on fluidized bed boiler burning biomass fuels with alkali ash ;* 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion ; Vancouver, New York ; pp 165-74 (1997)

BEAUMONT O. *La combustion du bois ;* Biomasse actualités n°17, (mars 1985)

BELAKHOWSKY. S. *Introduction aux combustibles et à la combustion.* Ed Technique & Documentation (1978)

BLANDER M, PELTON AD. *The Inorganic Chemistry of the combustion of wheat straw.* Biomass Bienergy 12 (4) pp 295-98 (1997)

BOUVOT-MAUDUIT. S. *Réglementation « combustion – incinération » concernant les rejets dans l'air, appliquée à la biomasse.* ADEME, Direction de l'Agriculture et des Bioénergies.(Juillet 2001).

BOYLAN D M. *Southern Company Tests of Wood/Coal CoFiring in Pulverized Coal Units.* Biomass and Bioenergy. Vol 10. N° 2-3; pp 139-47. (1996)

BROUWER J et al. *Co-firing waste biofuels and coal for emissions reduction.* In : Proceedings of the 2nd Biomass Conference of the Americas, Portland, OR. Pp 390-9 (1995).

CLAUSEN J C. *Co-Firing of coal and straw in large boilers.* Renewable Energy, 17-18 November 1993. Conference Publication N° 385. IEE.

FAHLSTEDT I et al. *Co-firing of biomass and coal in a pressurized fluidized bed combined cycle : results of pilot scale studies.* Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Vancouver, Canada, New-York : ASME, pp 394-300 (1997)

FRAZZITA S et al. *Performance of a burner with coal and coal-manure blend.* J. Propulsion Power. Vol 15(2), pp 181-6 (1999)

GRUBOR B D et al. *Biomass FBC combustion-bed agglomeration problems.* Proceedings of the 13th International Conference on Fluidized bed Combustion, Orlando, FL, New York, NY, pp 515-22 (1995)

GULYURTLU I et al. *Co-combustion of coal with various types of biomass in a circulating fluidized bed combustor.* Final report, EC-Research Project ; APAS-contact COAL-CT92-0002, (1995)

HANNEL. *Conception d'un réacteur à lit fluidisé pour l'étude de l'incinération des déchets. Application à l'étude des mécanismes de transformation de l'azote lors de la combustion de polyamide-6,6.* Thèse de Doctorat de l'Université de Haute Alsace. (1999).

HELLWIG G. *Basic on the combustion of wood and straw.* Energy from Biomass, 3rd E.C Conference, London : Elsevier Applied Science, pp 793-798 (1985)

KAFERSTEIN P et al. *Fluidization : combustion and emission behaviour of biomass in fluidized bed combustion units.* Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized bed Combustion, Vancouver, Canada, New York : ASME, pp15-27 (1997)

KICHERER A et al. *Co-combustion of Biomass/Sewage Sludge with hard coal in a pulverized fuel semi-industrial test rig.* Final report, EC-Research Project ; APAS-contact COAL-CT 92-0002, (1995)

LEVIN et al. *Phase diagrams for ceramist.* The American Ceramic Soc, Columbus, Ohio, Supplements (1975 and 1981)

MESCHGBIZ AJ, KRUMBECK M. *Combined combustion of biomass and brown coal in a pulverized fuel and fluidized bed combustion plant.* Combined Combustion of Biomass/Sewage Sludge and coals, Final report, EC-Research Project ; APAS-contact COAL-CT 92-0002, (1995)

MILES T.R et al. *Alkali deposits.* Summary report for NREL Subcontrat Tz-2-11266-1, (April 1995)

- NIKOLAISEN L.** *Utilisation of straw in district heating and CHP plants.* Proceedings from Bioenergy 93 Conference, Espoo, (november 1993)
- NUSSBAUMER T, HUSTAD JE.** *Overview of biomass combustion.* Bridgwater AV, Boocock DGB, editors. Developments in thermochemical biomass conversion, London : Chapman and Hall, pp1229-46 (1997)
- OHLSON O.** *Results of combustion and emissions testing when co-firing blends of binder-enhanced densified refuse-derived fuel pellets and coal in a 440 Mwe cyclone fired combustor.* Vol 1, test methodology and results. Subcontrat report. Argonne National Laboratory, IL (1994).
- OKA S.N.** *Biomass as fuel – Possibilities and limitations.* Monografy published by the Institute for Nuclear Sciences Vinca, Beograd, Yugoslavia
- PEDERSEN L S et al.** *Effects on SOx and NOx Emissions by co-firing Straw and Pulverized coal.* Energy & Fuels. Vol 11 pp 439-46 (1997).
- PEEL RB** *Fluidized bed combustion and gazification of biomass.* Proceedings of the 5th E.C Conference on Biomass for Energy and Industry, II. London : Elsevier Applied Science(1989)
- PETERSEN BM et al.** *Corrosion in straw fired district heating boilers.* 6th E.C Conference, London : Elsevier Applied Science pp 1177-81 (1991)
- RUDIGER Helmut et al.** *Investigations in Combined Combustion of Biomass and Coal in Power Plant Technology.* Energy & Fuel vol 10 pp 789-96 (1996)
- SAML M et al.** *Co-firing of coal and biomass fuels blends.* Progresses in Energy and Combustion Science. 27, pp 171-214 (2001)
- SAMPSON GR et al.** *Co-firing of wood chips with coal in interior Alaska.* For.Prod.J. vol 41(5), pp 53-6 (1991).
- SIEGEL et al.** *Preparation and co-combustion of cereals with hard coal in a 500 kW pulverized test unit.* Biomass for energy and the environment. In : Proceedings of the 9th European Bioenergy Conferencen Copenhagen, Denmark. Vol 2, pp 1027-32 (Jun 1996)
- SPLIETHOFF & HEIN.** *Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuels furnaces.* Fuel Process Technology. 54, pp 189-205 (1998).
- STANLEY N et al.** *Biomass as a reburning fuel : a specialized co-firing application.* Biomass and Bioenergy, vol 19, pp 429-45 (2000)
- TILLMAN DA.** *Biomass combustion.* Hall DO, Overend RP, editors. Biomass, New York : Wiley, pp203-19 (1987)

VAN DOORN et al. *Combined combustion of biomass, municipale sewage sludge and coal in an atmospheric fluidized bed installation.* In : Biomass for Energy and the environment, Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen, Danemark. Vol 2, pp 1007-12 (june 1996).

VON RACZECK. *Experimental investigation of the emission of and combustion characteristics of sewage sludge in a semi-pilot scale fluidized bed combustor.* PhD Thesis, Technical University Hamburg-Harburg, Germany (1992)

WERTHER.J *Combustion of agricultural residues.* Progress in Energy and Combustion Science 26 (2000).