

ETAT DE L'ART DE LA TECHNOLOGIE GENERATEUR D'AIR CHAUD A PARTIR DE BIOMASSE

Rapport final

juin 2010

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par le CRITT BOIS d'EPINAL et l'ENSTIB/LERMAB (Contrat n°1001C0001):

Sylvie DUCROS, responsable projet bois énergie et environnement, CRITT BOIS

Eric MASSON, responsable recherche et développement, CRITT BOIS

Yann ROGAUME, professeur en énergétique et combustion, ENSTIB/LERMAB

Coordination technique : Marina BOUCHER, Service Bioressources (SBIO) – Direction Productions et Energies Durables (DPED) – ADEME (Angers)

Remerciements:

Les auteurs tiennent à remercier les fournisseurs et fabricants de générateurs d'air chaud, et les membres du comité de pilotage de l'étude, pour leur aide dans l'élaboration de ce document :

- Marina BOUCHER, ADEME Angers
- Sylvain BORDEBEURE, ADEME Angers
- Erwan AUTRET, ADEME Angers

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe des ministères de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable .

<http://www.ademe.fr>

Sommaire

1. CADRE DE L'ETUDE	7
1.1 CONTEXTE	7
1.2 OBJECTIFS	7
2. INVENTAIRE ET DESCRIPTION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE GENERATEURS D'AIR CHAUD A PARTIR DE BIOMASSE	8
2.1 GENERALITES	8
2.1.1 Générateurs d'air chaud direct à partir de biomasse	9
2.1.2 Générateurs d'air chaud indirect à partir de biomasse	10
2.2 DESCRIPTION DES DIFFERENTES PARTIES D'UN GENERATEUR A AIR CHAUD BIOMASSE	12
2.2.1 Le foyer	12
2.2.2 La chambre de combustion	14
2.2.3 La chambre de dilution, pour les générateurs d'air chaud directs	14
2.2.4 L'échangeur de chaleur, pour les générateurs d'air chaud indirects	15
2.3 LES SYSTEMES DE DEPOUSSIERAGE	19
3. REFERENCEMENT DES PRINCIPAUX FOURNISSEURS DE GENERATEURS D'AIR CHAUD A PARTIR DE BIOMASSE	25
3.1 OUTILS ET METHODES	25
3.2 RESULTATS DE L'ENQUETE	25
4. INVENTAIRE ET DESCRIPTION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE COMPTAGE D'ENERGIE THERMIQUE	33
4.1 TECHNOLOGIES POUR LES GENERATEURS D'AIR CHAUD BIOMASSE A FUMEEES INDIRECTES	33
4.1.1 Sondes de température électriques	35
4.1.2 Capteur d'humidité	36
4.1.3 Mesure de débit massique	39
4.2 TECHNOLOGIES POUR LES GENERATEURS D'AIR CHAUD BIOMASSE A FUMEEES DIRECTES	42
5. REGLEMENTATION SUR LES EMISSIONS POLLUANTES ISSUES DES TECHNOLOGIES DE GENERATEURS A AIR CHAUD BIOMASSE	44
5.1 GENERALITES	44
5.2 TEXTES APPLICABLES A LA TECHNOLOGIE DES GENERATEURS D'AIR CHAUD BIOMASSE	46
5.2.1 Générateur d'air chaud biomasse indirect	46
5.2.2 Générateur d'air chaud biomasse direct	47
5.3 SYNTHESE DE LA REGLEMENTATION FRANÇAISE CONCERNANT LES POLLUANTS ISSUES DES SYSTEMES GENERATEURS A AIR CHAUD A PARTIR DE BIOMASSE NON ADJUVANTEE	47
6. SYNTHESE DES SYSTEMES DE TRAITEMENT DE FUMEEES APPLICABLES AUX GENERATEURS D'AIR CHAUD A PARTIR DE BIOMASSE	50

7. CONCLUSION	53
8. BIBLIOGRAPHIE	55
9. ANNEXES	56

Liste des Figures

Figure 1 : Schéma de principe d'un générateur d'air chaud (GAC) direct avec gamme d'utilisation	9
Figure 2 : exemple de schéma de fonctionnement d'un GAC direct avec chambre de dilution, UNICONFORT (I)	10
Figure 3 : Schéma de principe d'un générateur d'air chaud indirect	10
Figure 4: schéma de fonctionnement d'un générateur d'air chaud biomasse indirect, Vyncke (B)	11
Figure 5: exemple de schéma de fonctionnement d'un GAC indirect, Talbott's (UK)	11
Figure 6 : Schéma de principe d'un foyer volcan	13
Figure 7 : Schéma de principe d'un foyer à grille fixe	13
Figure 8 : Schéma de principe d'un foyer à grilles mobiles	14
Figure 9 : Profil de température qualitatif dans un échangeur à co-courants	15
Figure 10 : Profil de température qualitatif dans un échangeur à contre-courants	15
Figure 11 : Exemple d'échangeur à courants croisés	16
Figure 12 : positionnement des capteurs pour le comptage d'énergie pour les générateurs d'air chaud biomasse à fumées indirectes	34
Figure 13: positionnement des capteurs pour le comptage d'énergie pour les générateurs d'air chaud biomasse à fumées directes	42
Figure 14: schéma de fonctionnement du générateur d'air chaud indirect	50
Figure 15: schéma de fonctionnement du générateur d'air chaud direct	50

Liste des Tableaux

Tableau 1: descriptif des types de foyer à combustion biomasse	12
Tableau 2 : limites de fonctionnement des médias utilisés dans les systèmes de dépoussiérages par filtres à manches	22
Tableau 3: type de sonde électrique de température	35
Tableau 4 : synthèse des valeurs limites de rejets des générateurs d'air chaud à partir de biomasse	48
Tableau 5: synthèse des éléments de choix sur les systèmes de traitements des poussières proposés sur le marché français	51
Tableau 6: liste des fournisseurs de générateurs d'air chaud	54

Liste des Photos

Photo 1 : générateur d'air chaud biomasse direct, mis en place dans des process de granulation bois, Next Energies (F)	9
Photo 2: vues d'ensemble des cellules sécheuses équipées de générateurs d'air chaud indirect, Mabre (I)	11
Photo 3 : échangeur type à tubes de fumées à contre courant, Saacke (AI)	18

Résumé

L'objectif de cette étude est de référencer les technologies de générateurs d'air chaud biomasse disponibles sur le marché français et les systèmes de traitement appropriés, les systèmes de comptage de l'énergie produite, ainsi que la réglementation applicable aux rejets de ces générateurs. Les générateurs d'air chaud (GAC) biomasse sont utilisés pour la production d'air chaud de process ou en chauffage industriel. La différence entre GAC et chaudière biomasse classique porte sur le fluide caloporteur de la chaleur: l'air pour les GAC, l'eau dans les chaudières classiques.

Les générateurs sont de deux types:

- les GAC directs sont utilisés en général pour des process aux températures élevées. L'air chaud est envoyé directement dans le process. Le système de traitement des fumées est plus complexe, dû aux fortes températures en entrée du système (généralement de 200-600°C, jusqu'à 1000°C).
- les GAC indirects sont destinés le plus souvent aux procédés nécessitant un air propre, l'apport d'énergie se faisant via un échangeur de chaleur fumées/air. Les systèmes de traitement associés sont identiques aux chaudières biomasse classiques, selon l'exigence du taux de poussières.

Concernant la surveillance de l'énergie produite par les GAC, un compteur d'énergie adapté aux gaz chauds n'existe pas sur le marché, néanmoins le suivi en continu des paramètres permettant de calculer l'énergie produite est possible. Le facteur limitant est la température, qui rend difficile la mesure de l'humidité.

La réglementation française applicable à ces GAC dépend du type de générateur, de son classement selon la rubrique 2910 (combustion) de la nomenclature des installations classées, et du secteur d'activité dans le cas des GAC directs. Ainsi les valeurs limites d'émissions de poussières peuvent varier de façon importante selon le type de générateur pour une même puissance thermique installée.

Summary

The objective of this study is to reference technologies of biomass hot air generators available on the French market and the appropriate treatment systems, systems of counting of energy, and the regulation of emissions from these generators.

The biomass hot air generators (HAG) are used in industry either for the process, or for buildings heating. The difference between HAG and traditional boiler biomass relates to the transfer fluid of the heat: the air for the HAG, the water in traditional boilers.

The generators are of two types:

- Direct HAG are typically used for high temperature processes. The hot air is sent directly into the process. The flue gas treatment system is more complex due to high temperatures at the entrance of the system (typically 200-600 °C to 1000 °C).
- Indirect HAG are most often used to processes requiring clean air, energy intake is doing through a heat exchanger, flue gas / air. The flue gas treatment system is identical to conventional biomass boilers, according to the requirement of dust levels.

Regarding the monitoring of the energy produced by the HAG, an energy meter adapted to the hot gas is not commercially available, although the continuous monitoring of parameters for calculating the energy produced is possible. The limiting factor is temperature, which makes it difficult to measure humidity.

The French legislation applicable to the HAG depends on the type of generator, its classification under 2910 (combustion) of the nomenclature of classified installations, and sector of activity in the case of direct HAG. Thus the emission limits of dust can vary significantly depending on the type of generator for a given thermic power.

1. Cadre de l'étude

1.1 Contexte

Conformément à l'engagement pris par l'État français dans le cadre du Grenelle Environnement, l'ADEME s'est vu confier la gestion d'un « Fonds chaleur renouvelable », doté d'1 milliard d'euros pour la période 2009-2011, pour **développer la production de chaleur à partir de sources renouvelables, dont la biomasse.**

Dans ce cadre, l'ADEME a mis en place le "fonds chaleur" et l'appel à projets BCIAT (Biomasse, Chaleur, Industrie, Agriculture et Tertiaire) afin de susciter le développement de projets de production de chaleur à partir de biomasse dans les secteurs du collectif / tertiaire, de l'industrie et de l'agriculture.

Suite au premier appel à projets, il apparaît que la biomasse, classiquement utilisée en chaudière pour produire de la chaleur sous forme d'eau chaude, d'eau surchauffée ou de vapeur, peut aussi **alimenter des générateurs à air chaud dans le secteur industriel.**

Partant de ce constat, l'ADEME a confié au CRITT BOIS Epinal la réalisation d'un **état de l'art de la technologie " générateur à air chaud à partir de biomasse "** à partir de la collecte, l'analyse et la synthèse d'information sur les technologies, les acteurs, le marché et la réglementation.

1.2 Objectifs

L'étude répond aux **4 objectifs** suivants, fixés par l'ADEME :

Objectif 1: Inventorier et décrire **les technologies de générateurs d'air chaud à partir de biomasse** selon la nature des usages (chauffage, séchage, etc.) et les caractéristiques des besoins thermiques (niveau de température, consommations, etc.):

- Principe de fonctionnement,
- Performances énergétiques et environnementales,
- Systèmes de traitement des fumées permettant de répondre aux exigences du fonds chaleur et de l'appel à projets BCIAT 2010 (surtout les taux de poussières)

Objectif 2: Présenter et décrire les différentes **technologies de comptage d'énergie thermique** compatibles avec la technologie générateur à air chaud.

Objectif 3: Référencer **les principaux fournisseurs de générateurs d'air chaud biomasse:**

- Identification,
- Références,
- Caractéristiques techniques des produits proposés.

Objectif 4: Etablir un bilan de la **réglementation en vigueur sur les émissions polluantes issues des générateurs d'air chaud biomasse** (CO, NO_x, SO₂, poussières, HAP, COV, HCl, HF, dioxines et furannes, métaux, etc.)

Le champ d'investigation de l'étude est délimité par les aspects suivants :

- Générateur à air chaud fonctionnant à partir de biomasse (biomasse admissible à l'appel à projet BCIAT 2010),
- Gamme de production thermique 100-1000 tep/an et >1000 tep/an,
- Technologies et fournisseurs en France et à l'étranger,
- Etude de marché et bilan de la réglementation en France métropolitaine et DOM-TOM.

2. Inventaire et description des différentes technologies de générateurs d'air chaud à partir de biomasse

2.1 Généralités

Les générateurs d'air chaud sont utilisés pour la production d'air chaud de process (fours, séchoirs, étuves, etc.) ou pour le chauffage de locaux. Selon le secteur d'activité, les besoins en air chaud sont différents, particulièrement en terme de température :

- **Basses températures** (entre 20 et 70°C): activité de chauffage de bâtiments (commercial, industriel, agriculture: élevage, serres),
- **Moyennes températures** (entre 70°C et 200°C): activité de séchage de matériau (tuiles et briqueteries, bois) et de certains produits destinés à l'alimentation (maïs)
- **Hautes températures** (supérieur à 200°C, pouvant aller jusqu'à 1000°C): activités de granulation et déshydratation (bois, engrais, fourrage), l'industrie chimique et agro-industrie.

Comme toute chaudière biomasse, les générateurs d'air chaud sont constitués d'un foyer de combustion alimenté en biomasse par des dispositifs classiques: silos de stockage, systèmes d'extraction et de transfert du bois.

Les fumées issues du foyer de combustion sont ensuite utilisées pour produire de l'air chaud. On distingue alors deux types de générateurs d'air chaud:

- Les **générateurs d'air chaud « direct »** qui utilisent directement dans le process les fumées de combustion, avec ou sans dilution; ils trouvent leur application dans les process à haute température principalement et pour lesquels la propreté de l'air chaud pour le process n'est pas une limite;
- Les **générateurs d'air chaud « indirect »**, qui utilisent la chambre et les fumées de combustion pour réchauffer l'air à destination du process: l'air ambiant est propulsé à travers le générateur au moyen d'un ventilateur externe afin d'être réchauffé autour de la chambre de combustion ou dans un échangeur dont le circuit primaire est alimenté par les fumées de combustion. Ces types de générateurs d'air chaud sont le plus souvent destinés aux applications (process, chauffage) nécessitant un air pur.

Les systèmes directs ont l'avantage d'avoir un bon rendement (selon le process, jusqu'à 98%) et d'être très simples techniquement (pas d'échange de chaleur), ce qui limite les opérations de maintenance notamment (pas de nettoyage d'échangeur par exemple).

En revanche, l'air chaud produit pour le process est chargé en poussières (il s'agit d'un mélange entre des fumées de combustion et un air de dilution). Dans ce cas, compte tenu des volumes à traiter plus importants et de la température élevée de l'air chaud produit, le traitement des effluents est plus difficile.

Les systèmes indirects permettent de produire un air chaud propre (le plus souvent de l'air, mais d'autres gaz peuvent être utilisés dans certaines applications spécifiques). De plus, les fumées de combustion peuvent être traitées à la sortie de l'échangeur de la même façon qu'une chaudière biomasse classique.

En revanche, le rendement de l'ensemble (foyer et échangeur) est inférieur aux systèmes directs (< à 80%) car l'échangeur thermique ne permet pas de récupérer l'ensemble de l'énergie produite.

2.1.1 Générateurs d'air chaud direct à partir de biomasse

Les **générateurs d'air chaud direct** sont composés de 3 parties principales (figure 1) :

- **Le foyer** : lieu de dégradation du combustible et de début de flamme;
- **La chambre de combustion** : lieu de développement de la flamme;
- **La chambre de dilution** : lieu de refroidissement des gaz de combustion par l'apport d'air ambiant qui permet notamment d'obtenir une température de consigne très précise en entrée.

Un premier dépoussiérage type cyclone pourrait être mis en place en sortie de chambre de dilution pour un air chaud plus propre. Il n'est pas forcément mis en place, il dépend des exigences du process en aval sur la qualité de l'air entrant.

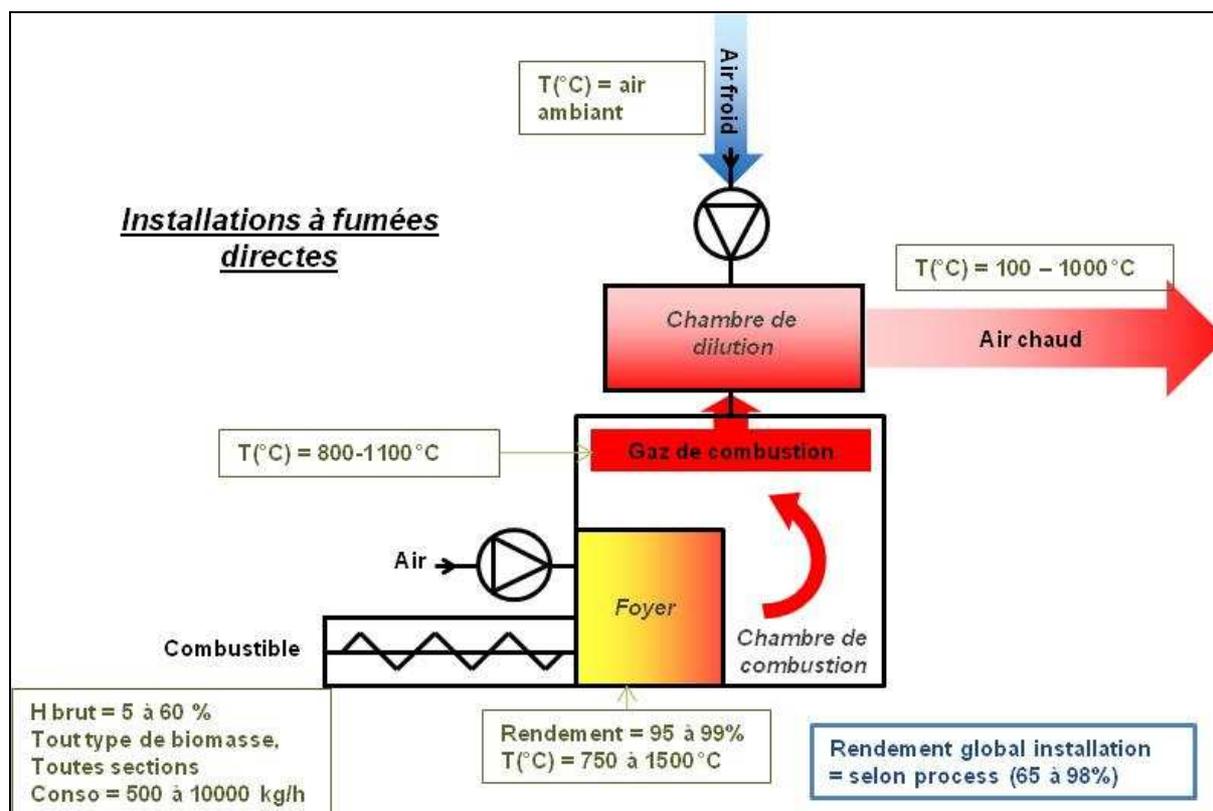


Figure 1 : Schéma de principe d'un générateur d'air chaud (GAC) direct avec gamme d'utilisation



Photo 1 : générateur d'air chaud biomasse direct, mis en place dans des procédés de granulation bois, Next Energies (F)

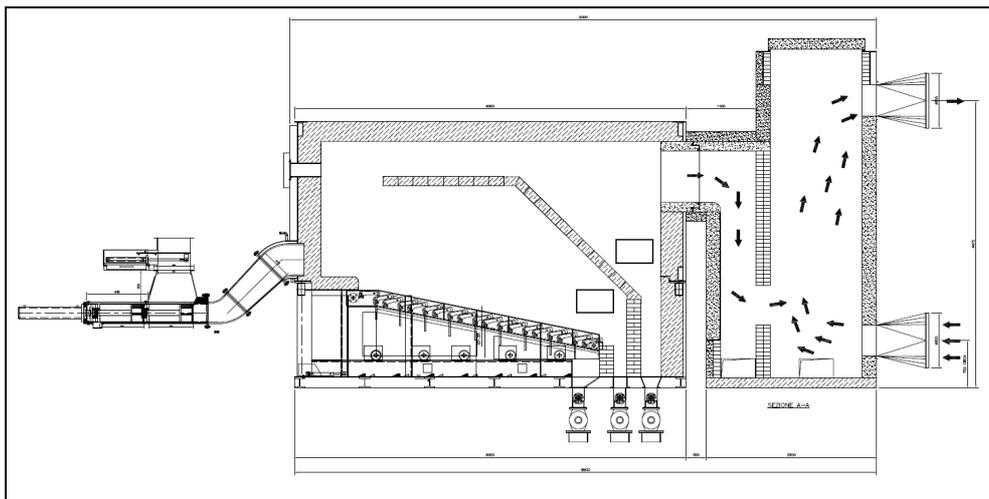


Figure 2 : exemple de schéma de fonctionnement d'un GAC direct avec chambre de dilution, UNICONFORT (I)

2.1.2 Générateurs d'air chaud indirect à partir de biomasse

Les **générateurs d'air chaud indirect** sont composés de 3 parties principales (figure 3) :

- Le **foyer** : lieu de dégradation du combustible et de début de flamme ;
- La **chambre de combustion** : lieu de développement de la flamme ;
- L'**échangeur de chaleur** : lieu de réchauffage de l'air.

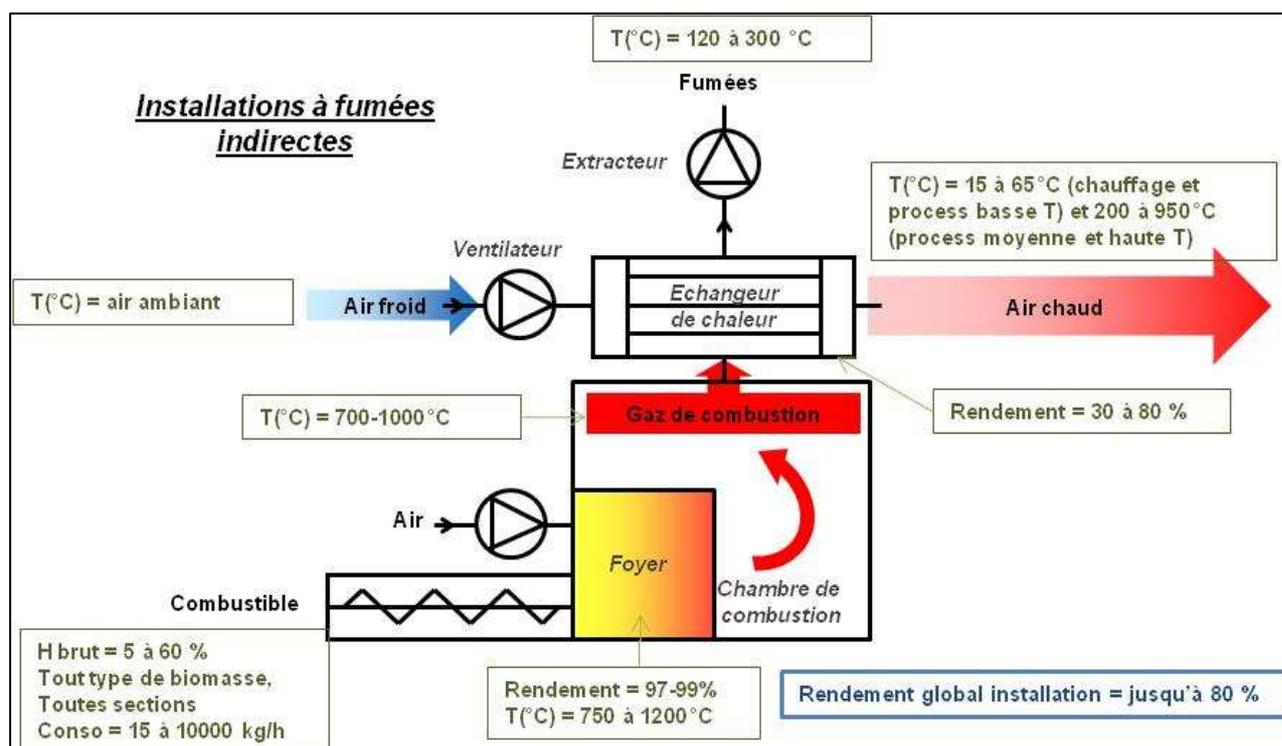


Figure 3 : Schéma de principe d'un générateur d'air chaud indirect

Il s'agit ici de systèmes totalement similaires à ceux utilisés pour produire de l'eau chaude ou de la vapeur d'eau, si ce n'est que le fluide chauffé est ici de l'air.

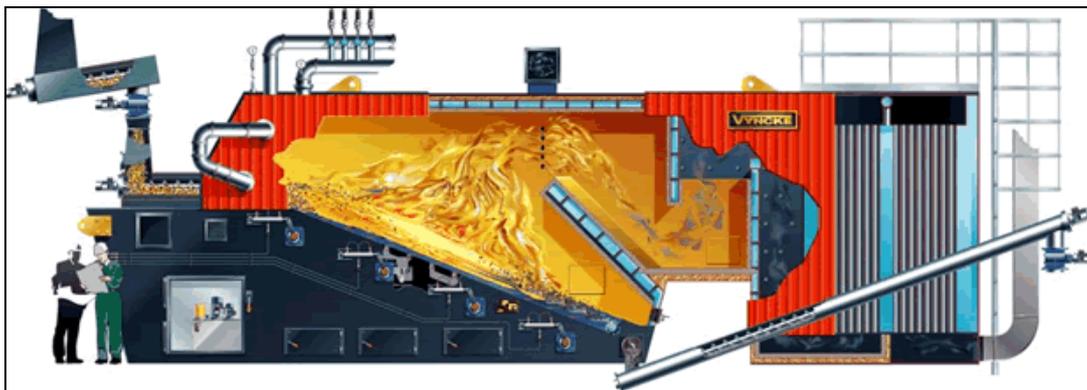


Figure 4: schéma de fonctionnement d'un générateur d'air chaud biomasse indirect, Vyncke (B)

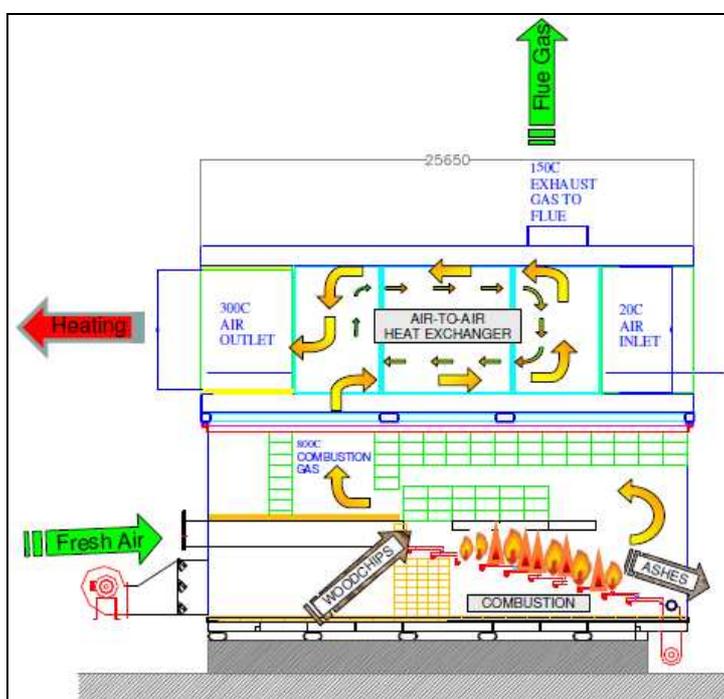


Figure 5: exemple de schéma de fonctionnement d'un GAC indirect, Talbott's (UK)



Photo 2: vues d'ensemble des cellules sécheuses équipées de générateurs d'air chaud indirect, Mabre (I)

2.2 Description des différentes parties d'un générateur à air chaud biomasse

2.2.1 Le foyer

Le foyer, lieu de la première phase de la combustion est alimenté en combustible et en air primaire.

Les foyers utilisés pour les générateurs d'air chaud sont du même type que ceux utilisés dans les chaudières biomasses produisant de l'eau chaude.

Le tableau suivant donne un aperçu des nombreux types de foyers à combustible biomasse existant. Les **trois principaux** (foyer volcan, foyer à grille fixe et foyer à grille mobile) sont décrits ci-après.

Tableau 1: descriptif des types de foyer à combustion biomasse

Type	Chargement	Gamme de puissance	Combustible	Humidité du combustible (sur brut)
Chaudière à petit brûleur	Automatique	20 kW – 140 kW	Plaquettes petites et sèches ou granulés	8% - 25%
Chaudière à foyer volcan	Automatique	20 kW – 1 MW	Plaquettes forestières assez fines, plaquettes de sous-produits de transformation du bois	5% - 40%
Chaudière à foyer à insufflation	Automatique	200 kW – 10 MW	Sciures et copeaux secs	5% - 20%
Chaudière à foyer à grille fixe	Automatique	15 kW – 5 MW	Plaquettes, chutes et copeaux	5% - 40%
Chaudière à foyer à grilles mobiles	Automatique	400 kW – 25 MW	Tous combustibles bois	10% - 50% voire 60%
Chaudière à sole avec grille rotative	Automatique	2 MW – 25 MW	Plaquettes (produits très humides)	40% - 60%
Chaudière à foyer à lit fluidisé dense	Automatique	5 MW – 100 MW	Différents types de biomasse (diamètre < 10 mm)	5% - 60%
Chaudière à foyer à lit fluidisé circulant	Automatique	15 MW – 500 MW	Différents types de biomasse (diamètre < 10 mm)	5% - 60%

2.2.1.1 Les foyers volcan

Leur nom est dû à leur forme et à la technique d'introduction du combustible : une vis sans fin pousse le bois déchiqueté dans un espace évasé de forme similaire à un volcan, provoquant la montée du combustible vers le sommet du brûleur (figure 6). L'air primaire est injecté autour du brûleur et traverse le lit solide, la flamme se développant au dessus de celui-ci. L'air secondaire est injecté un peu plus loin, dans la flamme, pour permettre l'oxydation totale des gaz.

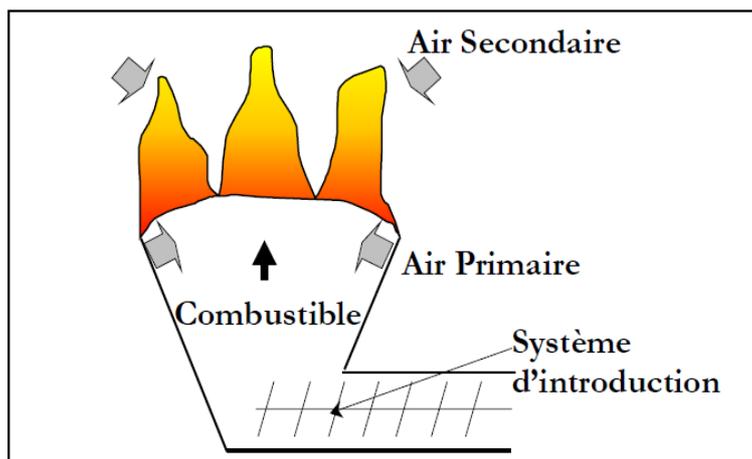


Figure 6 : Schéma de principe d'un foyer volcan

Ces foyers sont utilisés pour des installations **de petites et moyennes puissances (20 kW à 5 MW)** et donnent de bons résultats avec des combustibles secs à semi-humides (**5 à 40 % d'humidité sur brut**).

2.2.1.2 Les foyers à grille fixe

Ces systèmes ont des géométries et des systèmes d'injection d'air très variables. Comme son nom l'indique, ce type de foyer est constitué d'une grille sur laquelle le combustible est introduit et à travers laquelle l'air primaire est injecté (figure 7).

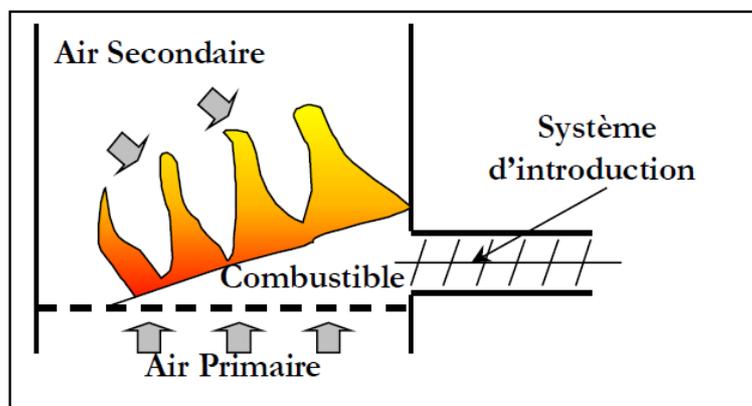


Figure 7 : Schéma de principe d'un foyer à grille fixe

Les différences entre les constructeurs se font principalement sur la géométrie du foyer, son entourage (ciment réfractaire ou non), ainsi que sur le mode et le niveau d'injection de l'air secondaire. Cette technologie simple permet une grande robustesse. Les limites de ce type de foyer sont dues avant tout au manque de mouvement du combustible, ce qui ne permet pas de maintenir un lit homogène en combustion. Ainsi, des zones différentes apparaissent et peuvent conduire à une combustion incomplète dans certaines conditions. Ce type de foyer est très utilisé pour **tous les types d'installations de petites et moyennes puissances (15 kW à 5 MW)** et donnent de bons résultats avec des combustibles plutôt secs (**5 à 40 % d'humidité sur brut**).

2.2.1.3 Les foyers à grilles mobiles

Dans ces foyers, le principe de combustion reste le même que précédemment, mais le processus est mieux contrôlé, grâce aux mouvements de va et vient des grilles pour étaler le lit de combustible et

maîtriser son temps de séjour dans la chambre (figure 8). L'air primaire est injecté sous les grilles et de l'air secondaire est injecté au dessus du lit solide, dans la flamme, pour apporter l'oxygène nécessaire à la combustion complète des gaz issus de la dégradation thermique de la biomasse.

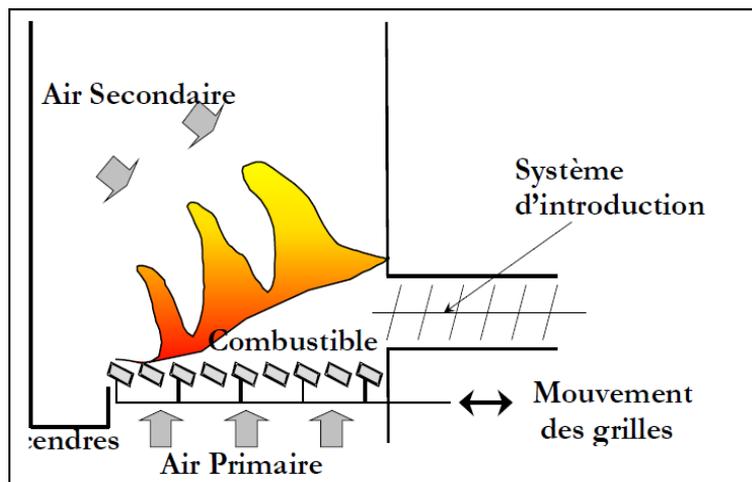


Figure 8 : Schéma de principe d'un foyer à grilles mobiles

Ce type de foyer est très utilisé pour des **installations de puissance moyenne à importante (400 kW à 25 MW)**. Pour des installations plus petites, le coût est trop élevé et des systèmes plus simples sont préférés. Les foyers à grilles mobiles permettent d'accueillir une large gamme de combustibles avec des humidités très variables (**10 à 50 % voire 60 %**).

2.2.2 La chambre de combustion

La flamme se développe dans la chambre de combustion dans laquelle est injecté l'air secondaire pour permettre une oxydation complète des gaz et limiter les émissions d'imbrûlés.

La chambre de combustion est le plus souvent revêtue de béton réfractaire dont le fort pouvoir de rayonnement favorise le séchage du combustible et permet de maintenir une température adéquate. La masse de béton réfractaire est augmentée pour la combustion de bois humide et réduite pour la combustion de bois sec.

Le volume et la géométrie de la chambre de combustion doivent être dimensionnés pour permettre d'avoir un temps de séjour des gaz suffisant dans cette zone chaude pour brûler entièrement et pour favoriser le mélange entre les gaz de combustion et l'air, et ainsi bien oxyder l'ensemble.

2.2.3 La chambre de dilution, pour les générateurs d'air chaud directs

La chambre de dilution permet le refroidissement des fumées sortant de la chambre de combustion (**température de l'ordre de 800 – 1100°C**) afin d'atteindre la **température d'air chaud requise (généralement de 200 à 600°C, jusqu'à 1000°C pour M aguin Promill)** : de l'air frais injecté dans la chambre dilue et refroidit les fumées de combustion. La chambre de dilution peut aussi permettre un premier dépoussiérage de l'air chaud par sédimentation des grosses particules.

Sur certains process, cette chambre n'est pas nécessaire et **les fumées sont envoyées directement dans le process**. Il arrive également que la combustion soit réalisée avec de gros excès d'air, ce qui participe de fait au contrôle de la température, la dilution étant réalisée directement dans la chambre de combustion.

2.2.4 L'échangeur de chaleur, pour les générateurs d'air chaud indirects

Un échangeur de chaleur permet d'assurer un **transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans contact direct**. Dans le cas des générateurs à air chaud indirect, l'échangeur permet de récupérer la chaleur contenue dans les fumées pour réchauffer l'air ambiant injecté par le ventilateur.

Pour la plupart des générateurs utilisés dans l'industrie, les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi à faible inertie thermique au travers de laquelle les échanges se font par conduction. Ainsi, la chaleur que l'un des fluides cède à la paroi par convection le long de la surface de contact est transférée par conduction puis, est cédée à l'autre fluide par convection le long de l'autre face.

Les échangeurs de chaleur sont classifiés selon la configuration d'écoulement des fluides considérés et selon leur type de construction.

2.2.4.1 Mode d'écoulement

On distingue trois modes d'écoulement :

- Ecoulement à **co-courants (figure 9)** : les deux fluides s'écoulent parallèlement et dans le même sens ; la température de sortie du fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Ces échangeurs sont utilisés pour de très faibles puissances échangées et ne sont pas adaptés à notre cas.

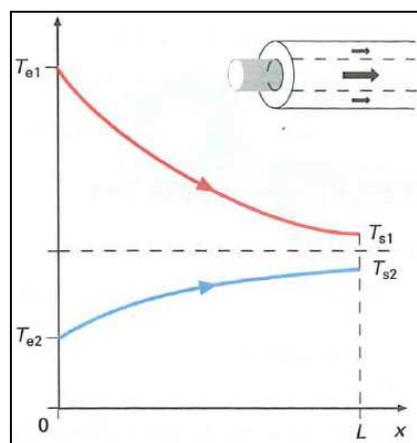


Figure 9 : Profil de température qualitatif dans un échangeur à co-courants

- Ecoulement à **contre-courants (figure 10)** : les deux fluides s'écoulent parallèlement et dans des sens opposés ; la température de sortie du fluide froid peut être supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique. De plus, un échangeur à contre-courants nécessite, pour un même flux de chaleur, des surfaces d'échanges plus faibles qu'un échangeur à co-courants. En revanche, la paroi qui sépare les deux fluides subit des contraintes mécaniques plus importantes dues à une plus grande variation de température.

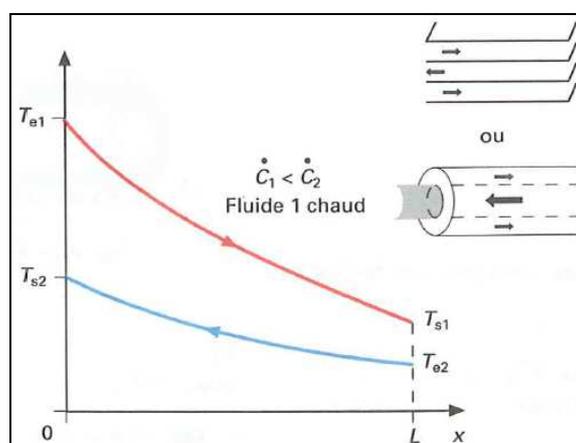


Figure 10 : Profil de température qualitatif dans un échangeur à contre-courants

- Ecoulement **croisé avec ou sans brassage** (figure 11) : les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre. Le fluide non brassé est canalisé alors que l'autre fluide circule librement et peut être considéré comme partiellement brassé. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide. Les échangeurs à courants croisés sont plus compacts et plus efficace pour un même volume donné.

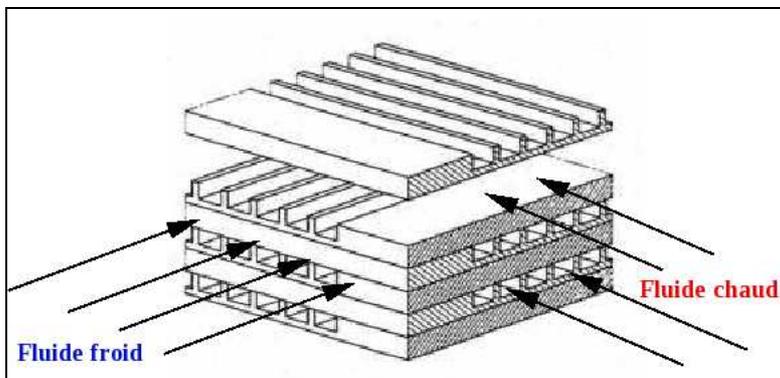


Figure 11 : Exemple d'échangeur à courants croisés

2.2.4.2 Types d'échangeurs

Plusieurs types d'échangeurs de chaleur existent, les plus courants étant :

- Les échangeurs à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
- Les échangeurs à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire.

Les échangeurs tubulaires :

Les échangeurs tubulaires sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et peuvent être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité contrebalancent leur encombrement.

Même si plusieurs systèmes existent, il s'agit le plus souvent d'**échangeurs multitubulaires** qui se présentent sous quatre formes :

- o Les **échangeurs à tubes séparés** : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.
- o Les **échangeurs à tubes rapprochés** : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur, on enroule un ruban en spirale autour de certains d'entre eux.
- o Les **échangeurs à tubes ailetés** qui permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique. Les ailettes peuvent être disposées de différentes façons :
 - Les ailettes transversales continues qui sont traversées par plusieurs tubes et qui sont généralement rectangulaires planes ou ondulées, et les ailettes transversales indépendantes qui sont traversées par un seul tube et qui peuvent être pleines ou segmentées, annulaires ou hélicoïdales (spirales). Elles peuvent être aussi à fils préformés, poinçonnées ou en brosse.
 - Les ailettes longitudinales qui sont disposées selon l'axe des tubes à l'intérieur ou à l'extérieur et qui peuvent être localement torsadées.
- o Les **échangeurs à tubes et calandre** où la calandre est une enveloppe cylindrique entourant un faisceau de tubes. Des boîtes d'échangeur distribuent ou recueillent le fluide aux extrémités des tubes. Leur disposition dépend du type de calandre et du nombre de passes. Des chicanes permettent d'augmenter la vitesse du fluide dans la calandre et rigidifient le faisceau tubulaire.

Les échangeurs à plaques :

Ils sont formés par l'empilement d'un ensemble de plaques métalliques embouties, au travers desquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. S'ils ne peuvent pas toujours être utilisés pour les températures élevées et les fortes pressions, les échangeurs à plaques bénéficient d'avantages tenant notamment à leur meilleur rendement et à leur compacité.

Parmi les échangeurs à plaque, on distingue les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire :

- Les **échangeurs à surface primaire** sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Différentes géométries de plaques peuvent être rencontrées. On distingue deux catégories principales :
 - o Les échangeurs à plaques avec joints : la surface d'échange est composée de plaques métalliques équipées de joints, serrées les unes contre les autres. Le joint assure l'étanchéité de l'échangeur ainsi que la répartition des fluides dans les canaux formés par deux plaques. Ces échangeurs ne peuvent être utilisés que pour des pressions maximales de 30 bars et des températures maximales de 200°C.
 - o Les échangeurs à plaques soudées ou brasées qui permettent de remédier aux inconvénients des joints. Certains de ces échangeurs sont adaptés à l'utilisation de fluides chauds et sous haute pression et présentant des débits très différents de part et d'autre de la surface d'échange.
- Les **échangeurs à surface secondaire** sont constitués d'un empilage de tôles ondulées formant des ailettes séparées par des tôles planes. On distingue, suivant le mode de fabrication et les matériaux utilisés : les échangeurs à plaques serties et les échangeurs à plaques brasées.
 - o Les échangeurs à plaques serties sont constitués d'un assemblage de tôles planes parallèles entre lesquelles sont disposées des ailettes. Les fluides empruntent un canal sur deux et la circulation est soit à contre-courant soit à courants croisés.
 - o Les échangeurs à plaques brasées dans lesquels les fluides circulent dans des passages définis par deux tôles planes consécutives et fermés latéralement par des barres. Des tôles ondulées placées entre ces plaques permettent d'augmenter la surface d'échange.

2.2.4.3 Choix d'un échangeur

De nombreux matériaux sont utilisés pour la fabrication des échangeurs :

- acier,
- acier inoxydable,
- aluminium,
- métaux ou alliages réfractaires,
- graphite,
- céramique,
- verre,
- plastiques, etc.

Le choix d'un échangeur de chaleur dépend de nombreux paramètres :

- propriétés physiques et agressivité des fluides,
- températures et pressions de service,
- encombrement,
- maintenance,
- coût etc.

Lors de l'utilisation d'échangeurs thermiques, les principaux problèmes rencontrés sont liés à des phénomènes d'encrassement, de corrosion, de vibrations et de tenue mécanique.

Pour des applications générateurs air chaud indirect, les échangeurs choisis sont principalement de type **à tubes de fumées et calandres**. Ces systèmes permettent d'avoir un échange efficace et sont facilement nettoyables du côté des fumées avec de simples goupillons.



Photo 3 : échangeur type à tubes de fumées à contre courant, Saacke (All)

Il s'agit de **systèmes à courants croisés et contre-courant**, dont l'efficacité (rapport entre l'énergie apporté à l'entrée et l'énergie restitué à la sortie) est comprise entre **30 et 35% et jusqu'à 70 à 80 % (sous pression)**.

2.3 Les systèmes de dépolluage

Les générateurs d'air chaud direct ou indirect sont pour la plupart équipés de systèmes de dépolluage pour obtenir un air chaud propre pour le process et respecter les limites d'émission de poussières.

Ainsi, la mise en place d'un système de dépolluage plutôt qu'un autre va dépendre **du process et des obligations réglementaires (valeurs limites d'émissions) applicables au site**, s'il est soumis à déclaration ou à autorisation selon la nomenclature ICPE.

Il existe quatre techniques principales :

1. Le **cyclone / multicyclone (fiche 1)** : ce système permet par un mouvement rotationnel des particules et ascensionnel des gaz de séparer et de piéger les particules. Il est le plus utilisé car le plus simple et le moins coûteux, que ce soit en investissement ou en entretien. De plus, **il n'y a pas de limite de température des fumées en entrée**.
2. Le **filtre à manches (fiche 2)** : ces filtres se présentent sous la forme d'un ensemble de manches (**dont la nature dépend de la température des fumées**) regroupées au sein de cellules et dans lesquels les gaz chargés pénètrent. En traversant les tissus, les poussières sont collectées, puis évacuées automatiquement. Les manches sont nettoyées régulièrement par secouage des cellules ou par inversion du flux (décolmatage).
3. L'**électrofiltre (fiche 3)** : ce mode de dépolluage consiste à séparer électriquement les poussières en faisant passer les gaz chargés entre deux électrodes. Les particules sont chargées électriquement, puis récupérées ensuite sur des plaques.
4. Le **condenseur (fiche 4)** : il permet de coupler le dépolluage et la récupération d'énergie par condensation de la vapeur d'eau présente dans les gaz de combustion après refroidissement des fumées par pulvérisation d'eau.

Le cyclone est utilisé largement pour des faibles puissances comme seul système de dépolluage. Il est également utilisé en dépolluage "primaire" afin de limiter en traitement "secondaire" :

- le flux de polluants (électrofiltre),
- les risques liés aux fortes températures et aux escarbilles (filtre à manches),
- le dimensionnement d'un équipement beaucoup plus coûteux en aval (investissement et fonctionnement).

Le filtre à manches et **l'électrofiltre** sont des systèmes plus onéreux et ne sont utilisés que pour des grosses installations pour lesquelles le piégeage par cyclone est trop complexe à mettre en œuvre ou non suffisant pour respecter les valeurs limites d'émission.

Enfin, le système par **condensation des fumées**, assez onéreux, est généralement positionné en aval d'un premier système de dépolluage de type multicyclones pour limiter la partie traitement des eaux. Ce système peut également être en amont d'un système type électrofiltre par voie humide pour respecter des valeurs limites d'émission plus basses (10 à 20 mg/Nm³). Le but premier de ce dispositif est de récupérer l'énergie contenue dans les fumées, et secondairement de les traiter.

Ci-dessous une **fiche par système utilisé en combustion biomasse**:

Fiche 1: le cyclone et le multicyclone

Cyclone / Multicyclone	
Principe	Schéma de principe
<p>Les fumées chargées en poussières entrent latéralement dans une batterie de tubes à base conique (cyclones). Les gaz sont soumis à un mouvement de rotation. Les particules, sous l'effet de la force centrifuge, sont projetées sur la paroi des cyclones et tombent à la base du système.</p> <p>Les poussières sont collectées et stockées avant évacuation. Les fumées, après ce dépoussiérage, sont évacuées par la cheminée grâce au ventilateur de tirage qui met en dépression l'ensemble de la ligne de traitement.</p>	
Performances	
<p>Les cyclones sont des appareils simples et fiables, bien qu'il existe des risques de colmatage et d'accumulation de particules. Leur efficacité dépend pour une bonne part de la taille des particules présentes dans les fumées. Leur rendement de captation est d'environ 98,5 % pour des particules de 20 microns mais tombe rapidement à 65 % pour des particules de 10 microns. Les dimensions des poussières dépendent de la granulométrie du combustible utilisé. L'exploitant de la chaudière bois devra donc apporter une attention particulière aux performances garanties par le constructeur de l'équipement (avec multicyclone) dans le cas où le combustible majoritaire serait de la sciure de bois.</p> <p>Le seuil de performance généralement garanti est de 150 mg/Nm³ à 11% d'O₂. Dans certaines conditions très strictes (combustibles normalisés) il est possible de garantir une valeur maximale de 100 mg/Nm³ mais cela reste exceptionnel.</p>	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Pas de limite de température des fumées - Solution simple, souvent directement intégrée à la chaudière - Coût inférieur à 5 % du montant des équipements chaudière bois et ses annexes - Coût d'exploitation quasiment nul 	<ul style="list-style-type: none"> - Performances limitées

Fiche 2: le filtre à manches

Filtre à manches	
Principe	Schéma de principe
<p>Les fumées chargées en poussières pénètrent dans le filtre à manches. Ce dernier est constitué de plusieurs cellules de filtration comprenant chacune des rangées de manches ou poches filtrantes. La nature des manches dépend de la température des fumées et de leur composition chimique (tableau 2).</p> <p>Les gaz sont tout d'abord dirigés vers les différentes cellules puis traversent les manches, de l'extérieur vers l'intérieur. Les poussières s'accumulent en gâteau sur le média filtrant.</p> <p>La collecte des gâteaux de filtration est effectuée régulièrement par soufflage d'air comprimé à l'intérieur des manches. Les poussières sont collectées dans une ou plusieurs trémies en partie basse des caissons.</p> <p>Après dépoussiérage, les fumées sont évacuées par la cheminée.</p> <p>Le filtre à manches est impérativement équipé d'un ensemble de by-pass en cas de détection de température anormale.</p>	
Performances	
<p>Les « gâteaux » formés sur les manches possèdent un pouvoir filtrant lié à leur porosité qui s'ajoute à celui des manches eux-mêmes. Il en résulte la capacité des filtres à manches à fixer les particules très fines. De plus, contrairement à l'électrofiltre, le rendement de filtration ne change pas avec la concentration de poussière. Les seuils de performance garantis peuvent être de 10, 30 ou 50 mg/Nm³ à 11% d'O₂. Ces seuils de performance varient en fonction de la nature du combustible. La performance attendue de l'équipement aura une incidence sur les coûts des équipements, variables selon la taille des équipements, le nombre de manches et la technologie choisie pour un filtre à manches. La trémie et l'ensemble du dispositif d'évacuation doivent être parfaitement bien calorifugés et équipés d'un dispositif de chauffage par cordons électriques afin d'éviter les risques de colmatage.</p>	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Performance garantie élevée (jusqu'à 10 mg/Nm³ à 11% d'O₂) indépendantes de la concentration en poussières dans le flux entrant (seuil de rejet garanti quelque soit le combustible biomasse) - Seuil de rejet constant en sortie - Coûts d'investissement moins élevés qu'un électrofiltre à débit d'air et seuil de rejets identiques - Coût d'investissement dépendant du nombre de manches, donc fonction de la puissance de la chaudière - Montant fortement dépendant de la température des fumées - Encombrement moindre qu'un électrofiltre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Changement des manches nécessite de la place et jusqu'à 2 jours d'intervention (personnel qualifié) - Risque incendie, nécessité d'un système de détection et d'extinction incendie - Forte pertes de charges nécessitant d'augmenter sensiblement la puissance du ventilateur d'extraction - Sensible aux polluants acides - Consommation d'air comprimé - Coût d'exploitation élevé (durée de vie de manches d'environ 3 à 5 ans) - Nécessite parfois un système de refroidissement des gaz en entrée (en fonction du média filtrant et de la température des fumées) - Risque de condensation dans les manches, ce qui crée de la corrosion

Tableau 2 : limites de fonctionnement des médias utilisés dans les systèmes de dépoussiérages par filtres à manches

Fibre	Marques	Température continue maximale (°C)	Température de pointe maximale (°C)	Concentration limite d'O ₂ (%)	Résistance à l'hydrolyse
Acrylique Polyacrylonitrile (PAN)	Dralon® Ricem® Dolanit®	125-140	140-150	18	++++
Méta-aramide (PMIA)	Nomex® Conex®	180-205	200-250	32	++
Para-aramide	Kevlar® Twaron®	180-250	300-350		+
Polyester (PES)	-	130-1540	150-180	20	+
Polypropylène (PP)	-	80-100	90-110	18	++++
Polyamide-imide (PAI)	Kermel®	200	240	32	++
Polyamide (PA)	Nylon®	100-110	120-125	20-26	++
PTFE	Teflon® Profilen® Toyoflon®	240-260	280	95	++++
Polyimide	P84®	220-260	240-300	36	++
Polyoléfine		125-130	135	NC	++++
Polyphénylène sulphide (PPS)	Ryton® Procon® Torcon®	190	200-230	40	++++
Cellulose		65-100	100-110	NC	NC
Verre (GL)	-	260	280-300	NC	+++
Métal	Inox FeCr FeCrAl	350 à 480 1000 850			
Céramique	SiC + mullite SiO ₂ Al ₂ O ₃	1000 500 1000			

NC: non connues

Les médias de filtres à manches en **métal et céramique**, technologies émergentes pour la combustion de biomasse mais néanmoins déjà utilisées pour des installations d'incinération, pourraient répondre au besoin de traitement des poussières à haute température, notamment pour traiter un air chaud de plus de 400°C. Moins sensibles à l'abrasion, ils seraient néanmoins plus exposés aux colmatages.

Un distributeur français de générateur d'air chaud biomasse, Innov-energies pour Uniconfort, propose depuis peu ce type de média en tissu métallique inox (filtre à manche métallique), qui pourrait supporter de fortes températures (500°C) tout en garantissant un taux de poussières de 15 mg/Nm³ d'air à 11 %d'O₂.

Fiche 3: l'électrofiltre

Electrofiltres	
Principe	Schéma de principe
<p>L'électrofiltre est constitué de plaques métalliques verticales de grande dimension entre lesquelles circulent les fumées chargées en poussières. Les plaques sont alternativement reliées à une source électrique continue (pour les plaques émettrices) et à la masse (pour les plaques réceptrices) par des électrodes filiformes. Le champ électrique qui en résulte exerce sur les poussières chargées électriquement une force qui les précipite sur les plaques réceptrices où elles viennent s'accumuler. Des marteaux frappent régulièrement les plaques pour décoller les poussières qui tombent dans des trémies à la base du caisson de l'électrofiltre.</p> <p>Les effluents gazeux débarrassés des poussières sont évacués par la cheminée via le ventilateur de tirage qui met en dépression la ligne de traitement. Pour éviter les risques de colmatage la trémie et l'ensemble du dispositif d'évacuation doivent être parfaitement bien calorifugés et équipés d'un dispositif de chauffage par cordons électriques, comme pour le filtre à manches.</p>	
Performances	
<p>Contrairement au multicyclone, l'électrofiltre garde de bonnes performances pour les particules de petite taille. Le rendement de captation est de 95 % pour des particules de 0,1 microns. En théorie, chaque champ d'électrofiltre a un rendement de captation de l'ordre de 90 %. Cependant, ce rendement diminue si la concentration des poussières augmente. C'est pourquoi le multicyclone est généralement conservé en amont d'un électrofiltre pour garantir une concentration connue en entrée et limiter sa taille.</p> <p>Les seuils de performance garantis peuvent être de 30, 50 ou 100 mg/Nm³ à 11% d'O₂. Il est possible de garantir des valeurs inférieures à 20 mg/Nm³ à 11% d'O₂ mais pour des surcoûts importants. Les seuils de performance varient en fonction de la nature du combustible, l'électrofiltre est donc dimensionné pour un type de combustible, contrairement à un filtre à manche, ce qui lui donne moins de souplesse d'utilisation. L'électrofiltre travaille généralement à des températures comprises entre 230 et 350°C. La température maximale est d'environ 450°C, au dessus il y a de forts risques d'explosions.</p>	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Risque incendie faible - Seuil de rejet pouvant descendre jusqu'à 20 mg/Nm³ à 11% d'O₂ - Pertes de charges peu importantes - Faible coût d'exploitation - Robustesse et durée de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Encombrement (vitesse d'écoulement des gaz faible donc volume élevé) - Coût de génie civil élevé, lorsque le filtre est placé en intérieur - Coût d'investissement minimal incompressible quelque soit la puissance de la chaudière (limite 1 MW) - Habilitation électrique nécessaire pour la maintenance (haute tension) - Nuisances acoustiques

Fiche 4: le condenseur

Condenseurs	
Principe	Schéma de principe
<p>Les fumées traversent une ou plusieurs chambres où elles sont soumises à une pulvérisation de gouttelettes d'eau froide.</p> <p>Sous l'action de ce refroidissement, la vapeur d'eau contenue dans les fumées se condense en libérant une quantité importante d'énergie.</p> <p>Cet échange permet de récupérer une quantité importante d'énergie et aussi de capter une partie des particules contenues dans les fumées.</p> <p>L'eau réchauffée et chargée passe dans un échangeur de chaleur installé sur les retours froids du réseau où elle cède ainsi son énergie avant de passer dans un dispositif de traitement ce qui lui permet de travailler en circuit fermé. Au niveau du circuit de traitement seule la fraction des condensats est régulièrement évacuée.</p> <p>Il est cependant préférable d'installer ce dispositif après un premier dépoussiérage pour limiter la partie traitement des eaux.</p>	
Performances	
<p>Le dispositif permet selon la nature des poussières en entrée de l'appareil d'atteindre des concentrations comprises en 50 et 100 mg/Nm³ (à 11% d'O₂). Si ce système est couplé en aval avec un électrofiltre par voie humide, il peut répondre à des valeurs limites de 10 à 20 mg/Nm³ (à 11% d'O₂).</p> <p>Ces dispositifs présentent des investissements très différents selon les techniques employées (échange direct ou indirect, traitement d'eau incorporé ou non, présence d'un filtre en amont). Plutôt développés pour les fortes puissances dans les pays du nord de l'Europe ou l'Autriche, des solutions plus économiques sont en cours de mise au point pour les petites et moyennes puissances.</p>	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison récupération d'énergie et dépoussiérage - Permet de collecter aussi d'autres polluants (acides, goudrons, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût très différent selon les techniques et la taille des installations - Nécessité d'avoir un combustible humide (humidité sur brut > 45 %) et des retours de réseau froids < 50°C - Nécessité d'un traitement des eaux, attention aux transferts de pollution (150 à 250 litres d'eau à traiter/MWh produit)

Pour le système de traitement des fumées par condenseur, la limite de température en entrée du système est de 190°C. Néanmoins, il est possible de mettre en place un laveur de fumées (sans récupération de chaleur) qui peut répondre à des températures élevées mais dont les performances en terme de traitement des poussières est mal connu (<100 mg/Nm³, taux d'O₂ non précisé). Ce système est surtout dimensionné pour le traitement des polluants autres que les poussières, comme les fumées acides.

Pour plus de détails sur ces systèmes de dépoussiérages, se reporter aux études:

- **ADEME - Indiggo (2007)**, portant sur l'évaluation technique, environnementale et économique des systèmes de dépoussiérage pour des chaufferies de puissance inférieure à 4 MW,
- **RECORD (2009)**, portant sur les polluants et les techniques d'épuration des fumées, cas des unités de traitement et de valorisation thermique des déchets.

3. Référencement des principaux fournisseurs de générateurs d'air chaud à partir de biomasse

3.1 Outils et méthodes

Pour mener à bien ce travail, la recherche de fournisseurs a été effectuée sur l'ensemble des sources suivantes :

- Moteur de recherche Internet,
- Publicité et articles des fournisseurs dans la presse spécialisée :
 - o Bioénergies International,
 - o Le Bois International,
 - o Bois et Techniques,
- Catalogues de salons spécialisés ou sur Internet :
 - o LIGNA+ (Hanovre), mai 2009,
 - o Expobois (Villepinte), mars 2010,
 - o Bois énergie (Saint Etienne), mars 2010.
- Connaissance de sites industriels équipés de générateurs à air chaud, via Internet,
- Bureaux d'études ayant travaillé à des projets biomasse et générateurs d'air chaud,
- Via les fournisseurs de chaudière bois,
- Via les fournisseurs de séchoirs bois,
- Via les fédérations et organisations utilisatrices de ces technologies (fédération nationale des tuiles, coop de france luzerne, fédération nationale des producteurs de granulés).

Afin d'avoir des éléments homogènes de tous les fournisseurs, un questionnaire leur a été envoyé, après contact téléphonique confirmant que les technologies vendues étaient bien dans les critères de l'étude, à savoir:

- Générateur à air chaud fonctionnant à partir de biomasse (biomasse admissible à l'appel à projet BCIAT 2010),
- Gamme de production thermique 100 - 1000 tep / an et > 1000 tep / an (soit à partir d'environ 200 kW),
- Technologies et fournisseurs en France et à l'étranger.

Le questionnaire est en annexe 1 de cette étude.

3.2 Résultats de l'enquête

Une fiche par fournisseur de générateur d'air chaud identifié a été réalisée. Elles synthétisent les informations issues du questionnaire, les données transmises par téléphone ainsi que les informations disponibles sur le site Internet du fournisseur. En effet, à la date du rendu de l'étude, certains fournisseurs n'avaient pas envoyé le questionnaire, une recherche sur Internet a tout de même permis de collecter un minimum d'information.

Les fiches par fournisseurs sont présentées ci-dessous:

(Nota: NC = non communiqué par le fournisseur; GAC = générateur d'air chaud)

MABRE - Via Pontina km 105 - 04019 Terracina (LT) - ITALIE		
Distributeur français IXION - Bernadas - 47190 AIGUILLON		
Contact : M. GIRARDI	Tél: 06 27 42 11 35	bertrand.girardi@ixion.biz
Type de GAC INDIRECT	Gamme Puissance 139 - 755 kW	Gamme Température air chaud 20 - 65 °C
Domaine d'application	chauffage et séchage basse température	
Secteur d'activité	agriculture: chauffage de serres, bâtiments d'élevage, séchage de maïs	
Références	Roseaie Provent 47600 Fieux (Serres) GAEC de Fontaine 40310 Gabarret (Séchage de Maïs) EARL LAPROVOL 41100 RENAY (Chauffage de Bâtiment élevage industriel)	
Type de biomasse utilisée	plaquettes (granulométrie: 30x50 mm, humidité: 25-30%) granulés	
Echangeur	Echangeur à tubes de fumées, en acier ou inox Température entrée air = air ambiant Température entrée fumées = NC Température sortie fumées = NC Température sortie air réchauffé = 50 à 65°C	
Systèmes de traitement des fumées	Non proposé	
Sources: questionnaire reçu le 22/03/2010		

Technique Energie Bois - 2 rue de l'Industrie - 86110 MIREBEAU www.teb-bois.fr		
Distributeur français Technique Energie Bois		
Contact : M. PRIEUR	Tél: 05 49 60 71 73	p.prieur.teb@wanadoo.fr
Type de GAC INDIRECT	Gamme Puissance 40 - 290 kW	Gamme Température air chaud 15 - 18 °C
Domaine d'application	chauffage et séchage basse température	
Secteur d'activité	Industries du bois	
Références	Sté SLMC à limoges Sté Helleux à fougères	
Type de biomasse utilisée	toute biomasse (granulométrie: 20x15x5, humidité: 40 maxi, consommation: 1kg de bois à 15% d'humidité pour 3,8kW/h)	
Echangeur	Echangeur à tubes de fumées, en acier E24-2ep6 Température entrée air = air ambiant Température entrée fumées = NC Température sortie fumées = 180 à 250 °C Température sortie air réchauffé = 50 °C	
Systèmes de traitement des fumées	Multicyclone	
Sources: questionnaire reçu le 12/04/2010		

SAMSOD Applications - rue de Decize - 58260 LA MACHINE www.samsoud.fr		
Distributeurs français LOMIBOIS - ZI Lons Pergny 39 001 LONS LE SAUNIER SEDIB - ZA Brive Ouest rue Louis l'Epine 19101 BRIVE LA GAILLARDE		
Contact : M. SORET	Tél: 06 85 05 58 54	a.soret@samsoud.fr
Type de GAC INDIRECT	Gamme Puissance 58 - 186 kW	Gamme Température air chaud 10 - 20 °C
Domaine d'application	chauffage	
Secteur d'activité	entreprises de la filière bois (ébéniste, menuisier, charpentiers, etc.)	
Références	plusieurs dizaines de références en menuiseries et ébénisterie	
Type de biomasse utilisée	copeaux, sciure, chutes (granulométrie: 20, humidité: 30, consommation: 10 - 53 kg/h pour 160000kcal/h avec un PCI de 3800 kcal/kg)	
Echangeur	Echangeur à plaques, en acier noir Température entrée air = de -10 à +10 °C Température entrée fumées = 750 °C Température sortie fumées = 300 °C Température sortie air réchauffé = 70°C	
Systèmes de traitement des fumées	Multicyclone	
Sources: questionnaire reçu le 16/04/2010		

GRUSS Filtration - 22, Rue Ampère BP 38 - 67501 HAGUENAU Cedex www.gruss.fr		
Distributeur français GRUSS		
Contact : M. BALTZER	Tél: 03 88 05 45 00	jbaltzer@gruss.fr
Type de GAC INDIRECT	Gamme Puissance jusqu'à 235 kW	Gamme Température air chaud 40 - 65 °C
Domaine d'application	chauffage et séchage basse température	
Secteur d'activité	Industrie et agriculture	
Références	NC	
Type de biomasse utilisée	NC	
Echangeur type tubes de fumées, en acier ou inox	NC	
Systèmes de traitement des fumées	Non proposé	
sources: éléments donnés par téléphone, questionnaire non reçu		

UNICONFORT - Via dell'Industria, 21 - 35018 San Martino di Lupari (PD) - Italie www.uniconfort.com		
Distributeur français Innov - Energies - 18 rue Giffard - 38230 Pont de Chéruy www.innov-energies.fr		
Contact : M. BEDROSSIAN	Tél: 04 72 46 97 04 / 06 17 15 90 07	info@innov-energies.fr
Type de GAC DIRECT - INDIRECT	Gamme Puissance 700 - 6 000 kW	Gamme Température air chaud 100 - 500 °C
Domaine d'application	process et séchage moyenne et haute température	
Secteur d'activité	industrie, énergie, agriculture	
Références	NC	
Type de biomasse utilisée	toute biomasse (granulométrie: de la sciure à 80 x 80 x 400 mm, humidité: 60%, consommation: selon le combustible)	
Echangeur	Echangeur à tubes de fumées, inox réfractaire, rendement de 65 à 74% (récupération chaleur) Température entrée air = 20 °C Température entrée fumées = 1 100 °C Température sortie fumées = 400 °C Température sortie air réchauffé = 350 °C	
Systèmes de traitement des fumées	Multicyclone Filtre à manches métalliques	
questionnaire reçu le 10/05/2010		

TALBOTT's Biomass Energy Systems Limited - Tollgate Drive, Tollgate Industrial Estate - Stafford ST16 3HS - Royaume-Uni www.talbotts.co.uk/index.htm		
pas de distributeur français		
Contact : M. Ivan TATT	Tél: +0044 1785 213 366	ivan.tatt@talbotts.co.uk
Type de GAC INDIRECT	Gamme Puissance 50 - 3000 kW	Gamme Température air chaud NC
Domaine d'application	chauffage et process	
Secteur d'activité	industrie du bois, établissements publics et commerciaux	
Références	nombreuses références en industrie du bois, tertiaire et centre commerciaux	
Type de biomasse utilisée	toute biomasse	
Echangeur	Echangeur à tubes de fumées Température entrée air = 10-20°C Température entrée fumées = 1000°C Température sortie fumées = 150°C Température sortie air réchauffé = 300°C	
Systèmes de traitement des fumées	NC	
Sources: site Internet, questionnaire non reçu		

COMPTÉ-R - ZI de Vaureil - 63220 ARLANC www.compte-r.com		
Distributeur français Compte -R		
Contact : M. CHIEZE	Tél: 04 73 95 01 91	bruno.chieze@compte-r.com
Type de GAC DIRECT - INDIRECT	Gamme Puissance 2000 - 10000 kW	Gamme Température air chaud 200 - 800 °C
Domaine d'application	process moyenne et haute température	
Secteur d'activité	tous les secteurs, dont séchage et déshydratation (granulés, tuileries-briqueteries)	
Références	Cogra, SGA, Deshydrome, SPPS, Italian Pellets, IMERYS, Rairies Montrieux	
Type de biomasse utilisée	toute biomasse (granulométrie: 150 x 80 x 30 mm, humidité: 20-60%, consommation: 500 à 5000 kg/h)	
Echangeur	Echangeur à tubes de fumées en acier au carbone selon la température Température entrée air = ambiant Température entrée fumées = 850 °C Température sortie fumées = 250 °C Température sortie air réchauffé = 600°C	
Systèmes de traitement des fumées	En aval du process: Filtre à manche En amont du process : cyclofiltres	
Sources: questionnaire reçu le 19/04/2010		

VYNCKE Energietechnik - Gentssesteenweg 224 - 8530 Harelbeke - Belgique www.vyncke.be		
Distributeur français Vyncke		
Contact : M. CALLENS	Tél: +0032 56730630	gca@vyncke.com
Type de GAC DIRECT - INDIRECT	Gamme Puissance 3000 - 30000 kW	Gamme Température air chaud 200 - 950 °C
Domaine d'application	process moyenne et haute température	
Secteur d'activité	industrie du bois et industrie agro-alimentaire	
Références	LINEX France (19MW), fabricant de panneaux de particules SONAE INDÚSTRIA France (40MW), fabricant panneaux TIMAC (groupe Rouiller)(8MW), fabricant d'engrais (granulés) TIMAC Agro (8MW), fabricant d'engrais	
Type de biomasse utilisée	toute biomasse	
Echangeur	Température entrée air = NC Température entrée fumées = NC Température sortie fumées = NC Température sortie air réchauffé = NC	
Systèmes de traitement des fumées	Multicyclone	
Sources: questionnaire reçu le 24/03/2010 et site Internet		

WEISS - 95, Rue Derobert 73400 UGINE www.weiss-france.fr		
Distributeur français WEISS France		
Contact : M. CORNELIUS	Tél: 06 07 35 40 03	b.cornelius@weiss-France.fr
Type de GAC NC	Gamme Puissance NC	Gamme Température air chaud NC
Domaine d'application	NC	
Secteur d'activité	NC	
Références	NC	
Type de biomasse utilisée	NC	
Echangeur type tubes de fumées, en acier ou inox	NC	
Systèmes de traitement des fumées	NC	
questionnaire non reçu		

MAGUIN - 2 rue Pierre Sémard 02800 CHARMES www.maguin.com		
Distributeur français MAGUIN PROMILL - RN 12 - 28410 SERVILLE		
Contact : M. DEURE	Tél: 02 37 38 91 74	promill.sechage@maguin.com
Type de GAC DIRECT	Gamme Puissance 2000 - 30 000 kW	Gamme Température air chaud 500 - 1000
Domaine d'application	process séchage et déshydratation moyenne et haute température	
Secteur d'activité	industrie du bois, engrais et fourrages (granulation), industrie chimique et agro-industries	
Références	nombreuses références granulation luzerne, bois, engrais en europe	
Type de biomasse utilisée	Ecorces, plaquettes forestières, copeaux, chutes (humidité: 20-50 %)	
Echangeur	pas d'échangeur	
Systèmes de traitement des fumées	laveurs de fumées	
Sources: questionnaire reçu le 24/03/2010 et site Internet		

NEXT ENERGIES - 54 rue du grand jardin 35 400 St MALO www.nextenergies.fr		
Distributeur français NEXT ENERGIES		
Contact : M. BOUCAS / M. LEJEANNE	Tél: 02 99 19 69 86	jboucas@next-energies.com ylejeanne@next-energies.com
Type de GAC DIRECT	Gamme Puissance 2000 - 30 000 kW	Gamme Température air chaud 200 - 650 °C
Domaine d'application	process séchage et déshydratation moyenne et haute température	
Secteur d'activité	Industrie de la granulation	
Références	Scierie ARCHIMBAUD (12MW) Société EO2 (9MW)	
Type de biomasse utilisée	Plaquettes forestières, copeaux, chutes (granulométrie: 10-150 mm, humidité: 25-55 %, consommation: 1000 à 10000 kg/h)	
Echangeur	pas d'échangeur	
Systèmes de traitement des fumées	Non proposé	
Sources: questionnaire reçu le 24/03/2010		

SAACKE - 25-27 r Marcel Dassault, 93147 BONDY Cedex		
Distributeur français SAACKE France www.saacke.fr		
Contacts : M. COURTOT (commercial) / M. BREUIL (process)	Tél: 01 48 48 20 54	l.courtot@saacke.fr f.breuil@saacke.fr
Type de GAC brûleurs et process thermique pour les installations existantes	Gamme Puissance 500 - 20 000 kW	Gamme Température air chaud 600 - 1100 °C
Domaine d'application	chauffage et process moyenne et haute température (séchage)	
Secteur d'activité	tous secteurs (cimenterie, agroalimentaire, sucrerie, matériaux, etc.)	
Références	Lafarge (brûleur fonctionnant à l'écorce de café), Knauf, Darbo (poussières de bois)	
Type de biomasse utilisée	poudres (sciures de bois < 1 mm), liquides (vinasse), gaz (biogaz) humidité sciure de 5%, consommation de 270 à 10000 kg/h	
Echangeur	Echangeur à tubes de fumées acier, inox, réfractaires Température entrée air = air ambiant Température entrée fumées = 800°C Température sortie fumées = 100 - 300°C Température sortie air réchauffé = 600°C	
Systèmes de traitement des fumées	Partenaires : Sidac et Europe Environnement multicyclones, filtre à manches, laveur de fumées	
Sources: questionnaire reçu le 21/04/2010		

FAMA - 23 Quai Alphonse le Gallo - 92100 BOULOGNE BILLANCOURT www.fama.fr		
Distributeur français FAMA		
Contacts : M.OUAKI	Tél: 01 41 22 06 70	fama@fama.fr
Type de GAC grilles basculantes ou mobiles pour GAC et autres chaudières	Gamme Puissance > 20 000 kW	Gamme Température air chaud NC
Domaine d'application	process moyenne et haute température	
Secteur d'activité	toute application séchage et déshydratation	
Références	NC	
Type de biomasse utilisée	toute biomasse non traitée <100 mm	
Echangeur	pas d'échangeur	
Systèmes de traitement des fumées	Non proposé	
Sources: appel tél du 26/02/2010, questionnaire non reçu		

Globalement, nous avons répertorié 3 catégories de fournisseurs de générateurs d'air chaud à alimentation automatique à partir de biomasse:

1. Les fournisseurs dont les gammes de puissances sont généralement **< 300 kW**: ils utilisent uniquement la technologie air chaud indirect avec un échangeur de chaleur, pour des besoins de chauffage type atelier industriel, serres, bâtiments avicoles, séchage de maïs, etc. La gamme de température est restreinte, de 10 à 65°C. Les 4 premiers fournisseurs sont dans ce cas.
2. Les fournisseurs proposant une gamme étendue, **de 500 kW à plus de 30 MW**: les deux types de générateurs sont utilisés pour des besoins process en séchage et déshydratation, industries du bois. La gamme de température est très large, de 100 à 1000°C. 6 fournisseurs sont dans cette gamme.
3. Les fournisseurs de brûleurs spéciaux (biomasse sciures) et de grilles pour combustion biomasse : ils ne fournissent pas le générateur d'air chaud biomasse mais peuvent convertir des installations déjà en fonctionnement (fioul, charbon, gaz) à la biomasse (sciure). Ces systèmes sont également dans une gamme de forte puissance, de **500 kW à plus de 20 MW** (les deux derniers fournisseurs), et de température (jusqu'à 1100°C).

Nous n'avons pas de données fournisseurs de la part de WEISS à la date du rendu de l'étude (pas de données sur leur site Internet).

4. Inventaire et description des différentes technologies de comptage d'énergie thermique

Il n'existe pas de compteurs d'énergie thermique "clé en main" pour gaz caloporteur (alors qu'il existe de nombreux systèmes pour les liquides). L'identification des différents capteurs nécessaires à la mesure des données permettra néanmoins de calculer indirectement l'énergie thermique contenue dans le gaz.

La principale difficulté de mesure réside ici dans la nécessité de connaître dans le même temps **le débit et la température du gaz**, mais aussi **sa teneur en eau qui représente une quantité de chaleur très importante**. Si les deux premières données sont assez simples à mesurer, le suivi de l'humidité d'un gaz à haute température est très difficile.

Il convient aussi de **séparer les deux technologies employées** par les générateurs d'air chaud car le nombre, l'emplacement et les caractéristiques des capteurs à utiliser ne seront pas les mêmes :

- pour les générateurs d'air chauds **indirects**, il suffit de mesurer le débit et l'humidité de l'air à l'entrée dans l'échangeur de chaleur, ainsi que les températures à l'entrée et à la sortie de l'échangeur. Par intégration, on obtient alors l'énergie récupérée par cet air ;
- pour les générateurs d'air chauds **directs**, la mesure est plus difficile car la teneur en eau du gaz dépend de la teneur en eau de l'air de dilution et de celle des fumées. Cette dernière dépend elle-même de la teneur en eau du combustible, de sa teneur en hydrogène et de la qualité de combustion.

A partir de ces données, il est proposé ci-dessous les dispositifs permettant de suivre en continu la quantité d'énergie produite quelle que soit la technologie employée.

Notons cependant qu'il s'agit ici de systèmes qui n'ont pas pu être validés par des mesures. Ceci demanderait d'être validé définitivement avec des campagnes de mesures.

4.1 Technologies pour les générateurs d'air chaud biomasse à fumées indirectes

Dans le cas d'un générateur à air chaud avec échangeur de chaleur fumées-air, le compteur d'énergie thermique pourrait être constitué :

- d'un **capteur de débit** traversé par l'air chaud à la sortie de l'échangeur ou, en cas de température élevée, placé dans une ligne d'échantillonnage permettant de diminuer la température de l'air,
- d'un **capteur d'humidité** placé dans la veine d'air chaud à l'entrée de l'échangeur,
- de **deux sondes de température** placées dans la veine gazeuse d'air chaud à l'entrée et à la sortie de l'échangeur et, en cas de température élevée, d'une troisième sonde placée dans une ligne d'échantillonnage permettant de diminuer la température de l'air,
- d'un **calculateur** permettant de calculer et d'indiquer la quantité d'énergie thermique échangée à partir des valeurs numériques des grandeurs mesurées.

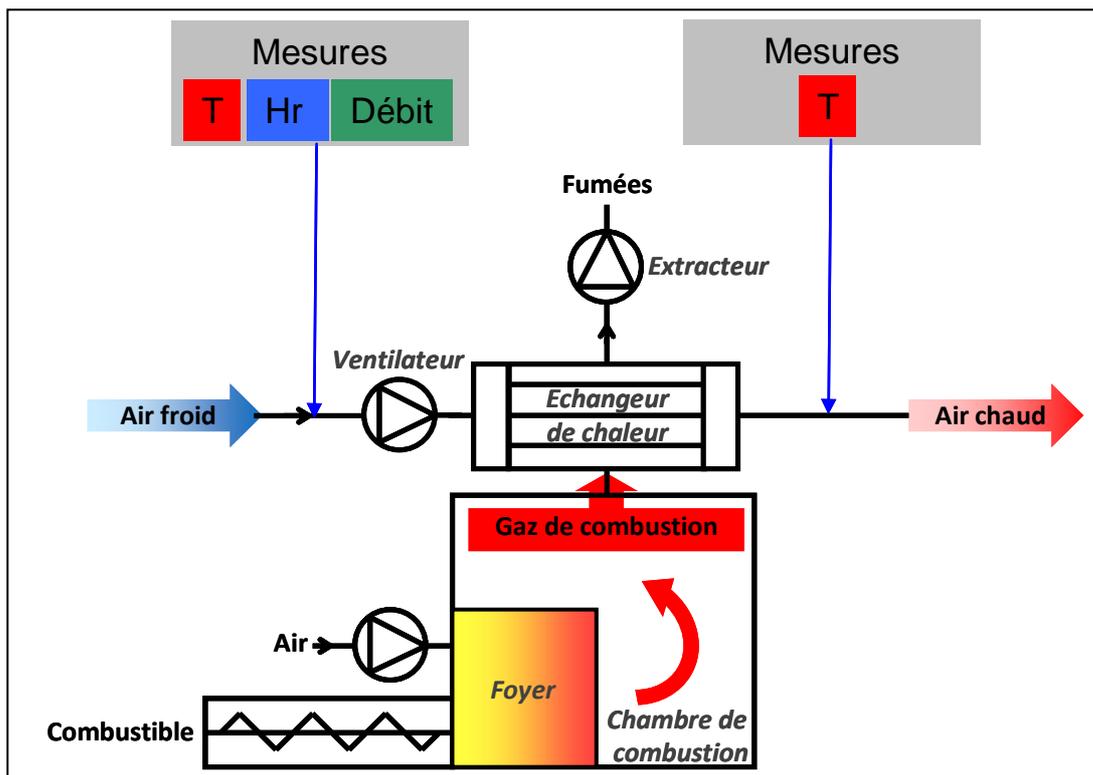


Figure 12 : positionnement des capteurs pour le comptage d'énergie pour les générateurs d'air chaud biomasse à fumées indirectes

La quantité d'énergie échangée est donnée par la relation suivante :

$$E = Q_m \times (h_s - h_e) \times 3600$$

$$E = Q_m \times \{ [(c_{p,as} \times \theta_s) + r_s (c_{p,v} \times \theta_s + L_{v,0})] - [(c_{p,as} \times \theta_e) + r_e (c_{p,v} \times \theta_e + L_{v,0})] \} \times 3600$$

$$E = Q_m \times [c_{p,as} \times (\theta_s - \theta_e) + L_{v,0} \times (r_s - r_e) + c_{p,v} \times (\theta_s \times r_s - \theta_e \times r_e)] \times 3600$$

$$E \cong Q_m \times [1,006 \times (\theta_s - \theta_e) + 2501 \times (r_s - r_e) + 1,840 \times (\theta_s \times r_s - \theta_e \times r_e)] \times 3600$$

Avec :

E , énergie thermique échangée (en kWh),

Q_m , débit massique (en kg/s),

h_s , enthalpie spécifique de l'air à la sortie de l'échangeur de chaleur (en kJ/kg),

h_e , enthalpie spécifique de l'air à l'entrée de l'échangeur de chaleur (en kJ/kg),

r_s , rapport de mélange de l'air humide à la sortie de l'échangeur de chaleur (en kg d'eau/kg d'air sec),

r_e , rapport de mélange de l'air humide à l'entrée de l'échangeur de chaleur (en kg d'eau/kg d'air sec),

$c_{p,as}$, capacité thermique massique à pression constante de l'air sec ($\cong 1,006$ kJ/kg/°C),

$c_{p,v}$, capacité thermique massique à pression constante de la vapeur d'eau ($\cong 1,840$ kJ/kg/°C),

$L_{v,0}$, chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C ($\cong 2501$ kJ/kg/°C),

θ_s , température de l'air à la sortie de l'échangeur de chaleur (en °C),

θ_e , température de l'air à l'entrée de l'échangeur de chaleur (en °C).

Le rapport de mélange de l'air humide en amont et en aval de l'échangeur de chaleur étant constant ($r_e = r_s$), le calcul peut être simplifié et devient :

$$E \cong Q_m \times [1.006 \times (\theta_s - \theta_e) + 1.840 \times r_s \times (\theta_s - \theta_e)] \times 3600$$

En cas de température élevée (supérieure à 350°C), la mesure de l'humidité (voire du débit) pourrait se faire via une ligne de prélèvement afin de diminuer la température de l'air. La ligne de prélèvement et la cellule d'échantillonnage devront être chauffées pour éviter tout risque de condensation (la température devra être supérieure à la température de rosée). Il faudra aussi éviter les coudes et les zones « mortes » où la circulation de l'air ne se fait pas de manière optimale. Enfin, il faudra veiller à utiliser des matériaux qui n'adsorbent pas l'eau tels que l'acier inoxydable ou le PTFE.

4.1.1 Sondes de température électriques

Type de sonde	Principe	Avantages / Inconvénients
Couple thermo-électrique (Thermocouple, Sonde pyrométrique)	Utilisation de l'effet thermo-électrique = génération de courant ou de tension résultant de la mise en présence de 2 matériaux différents. Différents types de thermocouples en fonction des matériaux utilisés, gammes de mesures différentes.	<ul style="list-style-type: none"> - Très large gamme de température (-270°C à 2700°C) - Capteur actif - Robuste - Temps de réponse court - Mesures ponctuelles - Grande variété de forme de sonde - Faible sensibilité - Non linéarité - Nécessité d'une jonction de référence connue ou d'une compensation électrique
Résistance métallique (Sonde thermométrique)	Résistance dont la valeur dépend de la température (coefficient de température > 0)	<ul style="list-style-type: none"> - Large gamme de température (-260°C à 1400°C) - Très bonne précision - Bonne sensibilité - Bonne stabilité à long terme - Bonne interchangeabilité - Grande variété de forme de sonde - Mesures non ponctuelles - Risque d'auto-échauffement
Semi-conducteur (Thermistance)	Variation de la résistivité d'un semi-conducteur avec la température (coefficient de température < 0)	<ul style="list-style-type: none"> - Gamme de température moyenne (-100°C à 450°C) - Faible coût - Très grande sensibilité - Fiabilité - Temps de réponse très court - Faible encombrement - Forme adaptable - Précision moyenne - Mauvaise stabilité à long terme - Interchangeabilité médiocre - Risque d'auto-échauffement

Tableau 3: type de sonde électrique de température

4.1.2 Capteur d'humidité

4.1.2.1 Définitions

Il existe plusieurs paramètres permettant de quantifier l'humidité de l'air ou d'un gaz dont les principaux sont les suivants :

- **Rapport de mélange r** : rapport de la masse de vapeur d'eau m_v à la masse d'air sec (ou de gaz avec lequel la vapeur d'eau est associée) m_{as} présentes dans un même volume.

$$r = \frac{m_v}{m_{as}}$$

- **Humidité absolue ρ (en kg/m³)** : rapport de la masse de vapeur d'eau m_v (en kg) au volume total d'air (ou de gaz) V (en m³).

$$\rho = \frac{m_v}{V}$$

- **Humidité relative HR (en %)** : rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau P_v et la pression de vapeur saturante P_{vsat} pour une température et un volume d'air (ou de gaz) donnés. L'humidité relative indique le pourcentage d'air (ou de gaz) saturé en vapeur d'eau.

$$HR = \frac{P_v}{P_{vsat}} \times 100$$

- **Température (ou point) de rosée T_r** : température à laquelle il faut refroidir l'air humide (ou le gaz humide) pour atteindre la saturation et donc obtenir un début de condensation. Lorsque la température de rosée est atteinte, la pression partielle de vapeur d'eau est égale à la pression de vapeur saturante ($P_v = P_{vsat}$) et l'humidité relative vaut 100 %.

Pour des températures de rosée inférieures à 0°C, on parle plutôt de température de gelée car la vapeur saturée est alors en équilibre avec de la glace. Lorsque l'on mesure le point de rosée d'un gaz à une pression supérieure à la pression atmosphérique, on parle généralement de « point de rosée sous pression ». En effet, l'augmentation de la pression d'un gaz augmente sa température de rosée.

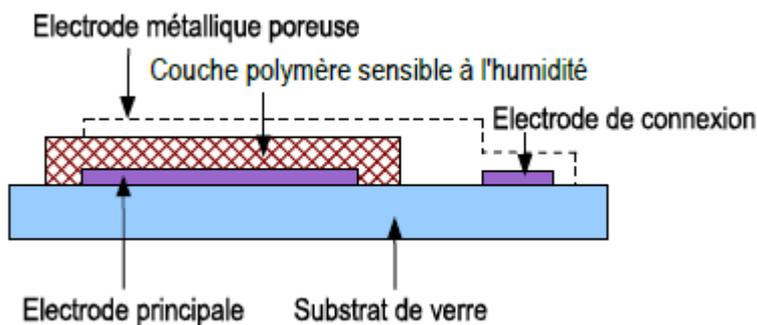
Remarque : le rapport de mélange r peut être obtenu à partir de l'humidité relative en partant de la relation $r = \delta \times \frac{P_v}{P - P_v}$ où P est la pression de l'air (ou du gaz), P_v la pression partielle de vapeur d'eau et δ le rapport entre la masse molaire de la vapeur d'eau et la masse molaire de l'air (ou du gaz). Pour l'air, δ vaut 0,622. La mesure de l'humidité relative permet d'obtenir le rapport $\frac{P_v}{P_{vsat}}$ et P_{vsat} peut être obtenu par le calcul, dans des tables ou dans des abaques.

4.1.2.2 Principales technologies

Hygromètre capacitif

Principe

Les sondes capacitives sont constituées d'une lame de polymère sensible à l'humidité de quelques micromètres d'épaisseur sur lequel sont déposées deux électrodes métalliques poreuses, l'ensemble se comportant comme un condensateur. Lorsque le polymère absorbe de l'eau son volume varie. La distance entre les deux électrodes change et la capacité du condensateur varie. On l'insère dans un montage oscillant et la mesure des variations de la fréquence de cette capacité donne l'humidité de l'air. Ces sondes mesurent une humidité relative pour une température donnée. Le signal est indépendant de la pression ambiante.



Caractéristiques (1)

- Très facile à mettre en œuvre et à utiliser
- Faible coût de l'élément sensible (celui-ci peut être changé facilement)
- Demande peu d'entretien
- Risque de dérive surtout aux faibles valeurs (< 2 % HR) et fortes valeurs (>90 %HR)
- Incertitude de l'ordre de ± 1 à 2 °C
- Souvent imparfaitement reproductibles (étalonnages requis)
- Les caractéristiques du matériau hygroscopique évoluent avec le temps
- **Température maximale : 180°C**
- L'utilisation en milieu pollué provoque rapidement un encrassement du capteur, impliquant non seulement une augmentation du temps de réponse mais aussi parfois des mesures totalement erronées.
- S'il est relativement facile de passer d'un taux d'humidité faible à un taux élevé, l'inverse n'est pas toujours vrai. Le capteur doit en effet évacuer l'excédent d'humidité qu'il a emmagasiné. Selon les cas, le « temps de purge » peut varier de quelques minutes à quelques heures

(1) Valeurs indicatives

Hygromètre à oxyde métallique

Principe

Ces hygromètres sont de la même famille que les hygromètres à variation d'impédance mesurant l'humidité relative, mais ils ont été spécialement étudiés pour mesurer la température de rosée. La plupart est constituée d'une mince couche poreuse d'oxyde d'aluminium déposée sur une plaque d'aluminium anodisé. Une très fine couche d'or déposée sur cette surface et la base en aluminium forment les deux électrodes d'un condensateur dont le diélectrique est la couche d'oxyde d'aluminium.

Caractéristiques (1)

- Adapté pour mesurer les points de rosée négatifs (gaz secs et très secs) jusqu'à - 110°C
- Sensibilité aux agressions chimiques (nécessité de filtres)
- Incertitude de l'ordre de ± 1 à 2 °C

- Peu sensible à la température ambiante (compensation toutefois souhaitable)
- Peut être utilisé à des pressions allant du vide jusqu'à plusieurs centaines de bars et à des fortes vitesses d'air
- **Température maximale : 350°C**

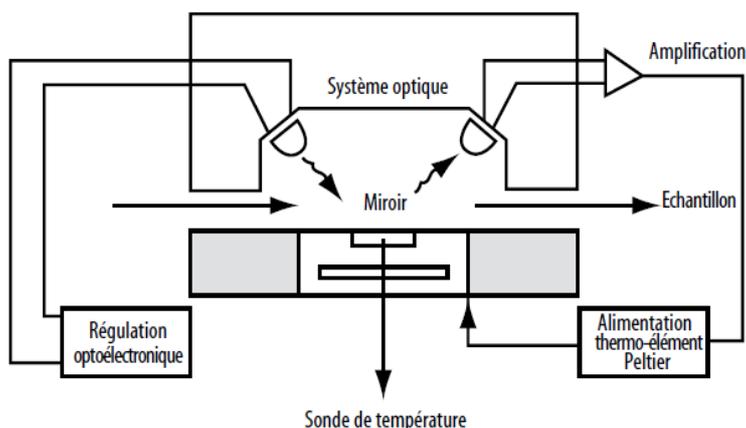
(1) Valeurs indicatives

Hygromètre à condensation

Principe

L'hygromètre à condensation mesure un point de rosée. Un échantillon de l'air à mesurer est prélevé et amené au contact d'un miroir (en métal inoxydable) que l'on refroidit par des modules à effet Peltier en cascade et dont on mesure la température.

Lorsque le point de rosée est atteint, l'eau se condense et atténue l'intensité d'un faisceau lumineux réfléchi par le miroir. La mesure de la température permet de connaître la température de rosée et par suite l'humidité relative de l'air.



Caractéristiques(1)

- couvre toute la gamme des mesures d'humidité de **-110 à 100°C**
- bonne précision (jusqu'à $\pm 0,1$ °C)
- hygromètres de référence
- nécessité de refroidir, grande consommation d'énergie
- mise en œuvre lourde (prélèvement d'échantillon)
- risque d'encrassement du miroir

(1) Valeurs indicatives

Autres technologies

Une entreprise américaine (MAC Instruments) propose un capteur d'humidité absolue utilisable jusqu'à **650°C, voire 1200°C** (ce matériel est revendu par *CalPower* en Italie). Le procédé utilise un capteur réagissant à la pression partielle de vapeur d'eau.

Nous n'avons pas pu tester le fonctionnement de ce capteur et ainsi valider définitivement le choix. Il semble cependant que pour certaines applications (notamment pour les générateurs directs), **ce capteur soit la seule proposition viable pour suivre l'énergie fournie.**

4.1.3 Mesure de débit massique

Définitions

On distingue deux types de débit :

- **le débit volumique**, défini par $Q_v = v_{\text{moy}} \times S$ (en m³/s) avec v_{moy} , vitesse moyenne du gaz (en m/s) sur la section S (en m²),
- **le débit massique** défini par $Q_m = \rho \times v_{\text{moy}} \times S = \rho \times Q_v$ (en kg/s) avec v_{moy} , vitesse moyenne du gaz (en m/s) sur la section S (en m²) et ρ , la masse volumique du gaz (en kg/m³).

Pour un gaz, la masse volumique dépend directement de la température et de la pression. Le calcul du débit massique d'un gaz à partir du débit volumique nécessite donc la connaissance de la température, de la pression ou de la masse volumique du gaz.

Principales technologies

Nous présentons ci-après les deux seules technologies permettant une mesure directe du débit massique : le **débitmètre Coriolis** et le **débitmètre thermique massique**. Les autres technologies (débitmètres à organe déprimogène, débitmètres utilisant la pression dynamique, débitmètres à section variable) mesurent le débit volumique et peuvent, pour certains, donner une valeur calculée du débit massique à partir de mesures de pression différentielle, de pression statique et de température.

Débitmètre Coriolis

Principe

L'accélération de Coriolis apparaît lorsque l'on soumet une masse à la fois à un mouvement de rotation et à un mouvement de translation. A cette accélération correspond une force :

$$F = 2 \times m \times \omega \times v$$

avec ω la vitesse angulaire instantanée du mouvement circulaire, v la vitesse de translation et m la masse du fluide.

Dans un débitmètre Coriolis, une bobine excitatrice placée en C, soumet le tube de mesure à un mouvement oscillant autour de l'axe de repos A-B.

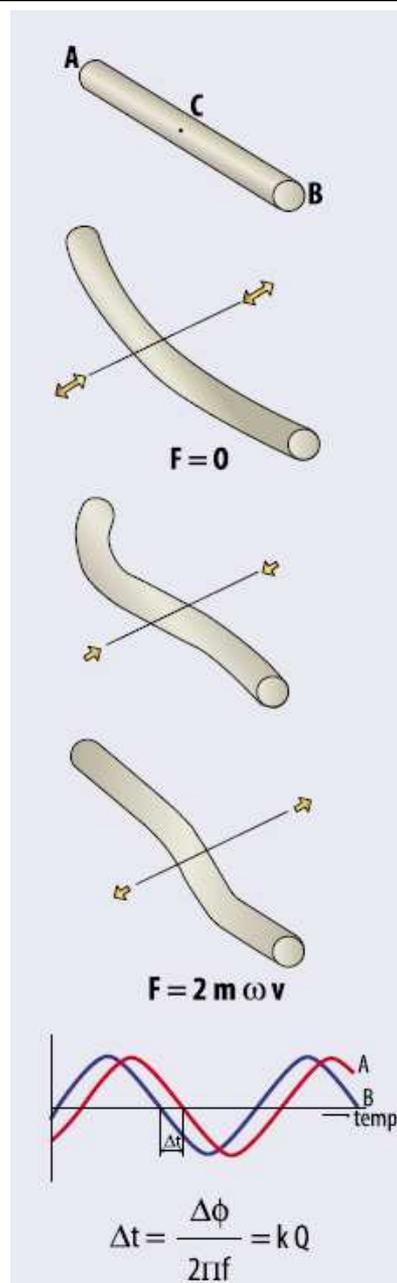
Lorsque les particules du fluide se déplacent avec la vitesse v dans le tube de mesure, elles provoquent des forces de Coriolis qui agissent sur les deux moitiés du tube, dans des sens opposés. En effet, le fluide retarde l'oscillation lorsqu'il doit lui-même en acquérir le mouvement (entre A et C) et l'accélère lorsqu'il restitue l'énergie prélevée (entre C et B). Il en découle une distorsion du tube très faible qui se superpose à l'oscillation de base.

Le mouvement total est mesuré à l'aide de capteurs inductifs placés en A et en B. Ainsi, en présence de débit, un retard de phase $\Delta\phi$ est observé entre l'oscillation en A et l'oscillation en B. Ce déphasage auquel correspond un intervalle de temps Δt est directement proportionnel au débit massique Q_m :

$$\Delta t = \frac{\Delta\phi}{2\pi f} = k \times Q_m$$

où f est la fréquence d'oscillation et k une constante.

Le comportement oscillant du tube de mesure dépend aussi de la température. Celle-ci est mesurée en permanence et les valeurs sont corrigées en permanence.



Caractéristiques⁽¹⁾

- Gaz propre ou chargé
- Diamètre de la conduite : jusqu'à 350 mm
- Longueur droite amont : 0
- Pas de tranquilliseur
- **Température maximale : jusqu'à 450°C**
- **Pression maximale : jusqu'à 400 bars**
- Incertitude de mesure : jusqu'à $\pm 0,1\%$
- Mesure en plus la masse volumique, le volume et la température
- Indépendant du profil d'écoulement
- **Prix élevé**

(1) Valeurs indicatives

Débitmètre massique thermique

Principe

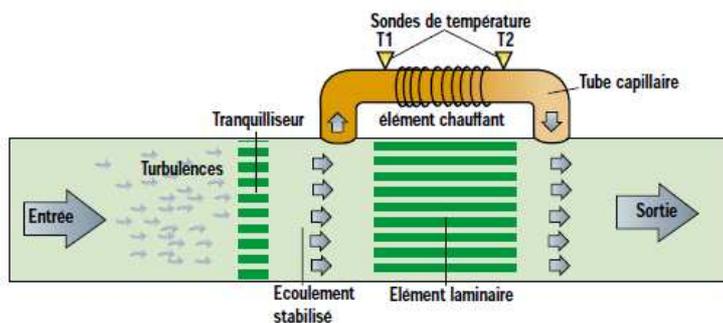
Capteur thermique à capillaire

Le débit massique Q_m d'un gaz est fonction de la capacité thermique massique à pression constante c_p de ce gaz ainsi que de la différence de température ΔT mesurée aux bornes du capteur :

$$\Delta T = k \times c_p \times Q_m.$$

Le tube de mesure comprend deux sondes de température placées l'une en amont (T_1) et l'autre en aval (T_2) d'un élément chauffant bobiné à l'extérieur du tube et qui amène le fluide à une température fixe, lorsque le débit massique est nul, $T_2 = T_1$. Lorsque le débit massique augmente, T_1 décroît et T_2 augmente linéairement tant que le débit est limité. Quand le débit massique augmente, il y a de moins en moins de molécules de gaz qui prélèvent l'énergie et la mesure de température n'est plus proportionnelle au débit massique.

Pour augmenter la plage de mesure, la mesure se fait sur une fraction de l'écoulement : le flux gazeux principal s'écoule dans un élément à action laminaire et le flux secondaire sur lequel porte la mesure passe par un capillaire. Il est indispensable que le profil d'écoulement soit laminaire, autant dans la conduite principale que dans le capillaire. Dans ces conditions, la perte de charge au passage du dispositif est suffisamment linéaire pour que l'on puisse déduire le débit total du débit mesuré dans le capillaire.



Capteur thermique à insertion

On distingue le débitmètre thermique massique à capillaire qui se monte en dérivation de la conduite et le débitmètre thermique sans capillaire qui utilise une sonde à insertion (appelé aussi anémomètre).

Le principe de mesure fait appel à un élément sensible chauffant et à une sonde de température. Chauffé par un courant électrique, l'élément est refroidi par l'écoulement incident, la réponse qu'il fournit dépend essentiellement de la vitesse et de la température de l'écoulement. La loi d'échange thermique qui permet de relier les paramètres de l'écoulement aux grandeurs physiques mesurables de l'élément chauffant (résistance, tension, etc.) est traduite par la loi de King.

L'élément de mesure est inséré dans le flux de gaz, soit dans une manchette préfabriquée, soit directement dans la gaine et accepte, par conséquent, des gaz chargés. La mesure est d'avantage tributaire des conditions d'écoulement. Il est important de bien connaître le profil de vitesse pour déterminer la longueur d'insertion qui offrira une mesure la plus représentative du débit moyen. S'il perd en précision par rapport aux systèmes à capillaire, il est plus avantageux d'un point de vue économique.

Caractéristiques ⁽¹⁾

- | | |
|---|--|
| - En ligne ou à insertion | - Pression maximale : jusqu'à 350 bars |
| - Gaz propre ou chargé | - Incertitude de mesure : jusqu'à $\pm 0,1 \%$ |
| - Diamètre de la conduite : jusqu'à 530 mm | - Prix peu élevé |
| - Longueur droite amont : 0 à 10 x diamètre | - Dépendant de l'étalonnage |
| - Température maximale : jusqu'à 500°C | |

(1)

Valeurs

indicatives

4.2 Technologies pour les générateurs d'air chaud biomasse à fumées directes

Dans le cas d'un générateur à air chaud à **fumées directes**, le comptage d'énergie thermique pourrait se faire par différence entre l'énergie totale à la sortie de la chambre de dilution et l'énergie apportée par l'air de dilution.

Ce choix permet de positionner les capteurs de mesure d'humidité dans les zones les moins nocives (température plus basse et moins de pollution).

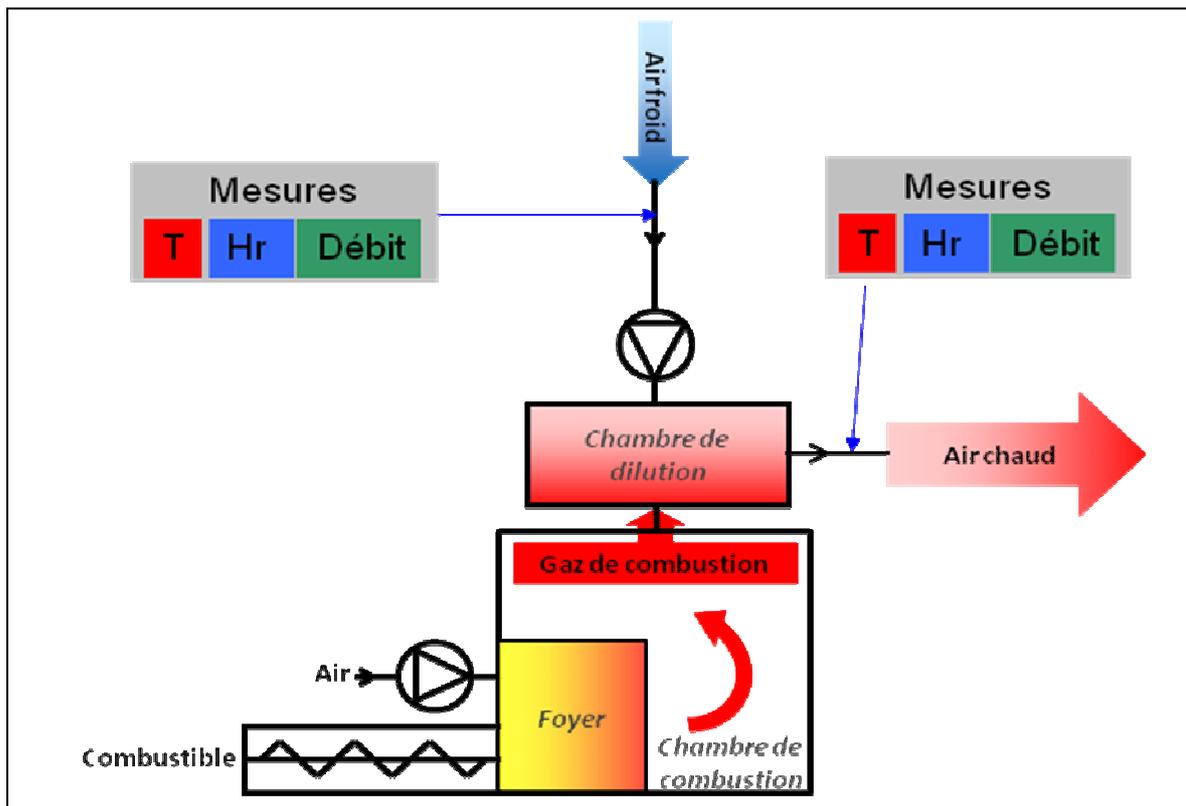


Figure 13: positionnement des capteurs pour le comptage d'énergie pour les générateurs d'air chaud biomasse à fumées directes

La quantité d'énergie échangée est donnée par la relation suivante :

$$E = (Q_{ms} \times h_s - Q_{me} \times h_e) \times 3600$$

$$E = \{Q_{ms} \times [(c_{p,as} \times \theta_s) + \gamma_s (c_{p,v} \times \theta_s + L_{v,0})] - Q_{me} \times [(c_{p,as} \times \theta_e) + \gamma_e (c_{p,v} \times \theta_e + L_{v,0})]\} \times 3600$$

$$E = [c_{p,as} \times (Q_{ms} \times \theta_s - Q_{me} \times \theta_e) + L_{v,0} \times (Q_{ms} \times \gamma_s - Q_{me} \times \gamma_e) + c_{p,v} \times (Q_{ms} \times \theta_s \times \gamma_s - Q_{me} \times \theta_e \times \gamma_e)] \times 3600$$

$$E \cong [1,006 \times (Q_{ms} \times \theta_s - Q_{me} \times \theta_e) + 2501 \times (Q_{ms} \times \gamma_s - Q_{me} \times \gamma_e) + 1,840 \times (Q_{ms} \times \theta_s \times \gamma_s - Q_{me} \times \theta_e \times \gamma_e)] \times 3600$$

Avec :

E , énergie thermique échangée (en kWh),

Q_{ms} , débit massique à la sortie de la chambre de dilution (en kg/s),

Q_{me} , débit massique de l'air de dilution (en kg/s),

h_s , enthalpie spécifique de l'air à la sortie de la chambre de dilution (en kJ/kg),

h_e , enthalpie spécifique de l'air de dilution (en kJ/kg),

r_s , rapport de mélange de l'air humide à la sortie de la chambre de dilution (en kg d'eau/kg d'air sec),

r_e , rapport de mélange de l'air de dilution (en kg d'eau/kg d'air sec),

$c_{p,as}$, capacité thermique massique à pression constante de l'air sec ($\cong 1,006$ kJ/kg/°C),

$c_{p,v}$, capacité thermique massique à pression constante de la vapeur d'eau ($\cong 1,840$ kJ/kg/°C),

$L_{v,0}$, chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C ($\cong 2501$ kJ/kg/°C),

θ_s , température de l'air à la sortie de la chambre de dilution (en °C),

θ_e , température de l'air de dilution (en °C).

Les mêmes types de capteurs que précédemment pourront être utilisés pour mesurer les données nécessaires au calcul de l'énergie thermique : humidité, température et débit de l'air. La mesure de l'humidité des gaz de combustion en sortie de chaudière devra se faire via une ligne de prélèvement ou avec un capteur d'humidité utilisable à haute température (voir § 3.1.2.2 « **Autres technologies** »).

En cas d'utilisation d'une ligne de prélèvement, celle-ci devra être chauffée pour éviter tout risque de condensation (la température devra être supérieure à la température de rosée). Il faudra aussi éviter les coudes et les zones « mortes » où la circulation de l'air ne se fait pas de manière optimale. Enfin, il faudra veiller à utiliser des matériaux qui n'adsorbent pas l'eau tels que l'acier inoxydable ou le PTFE.

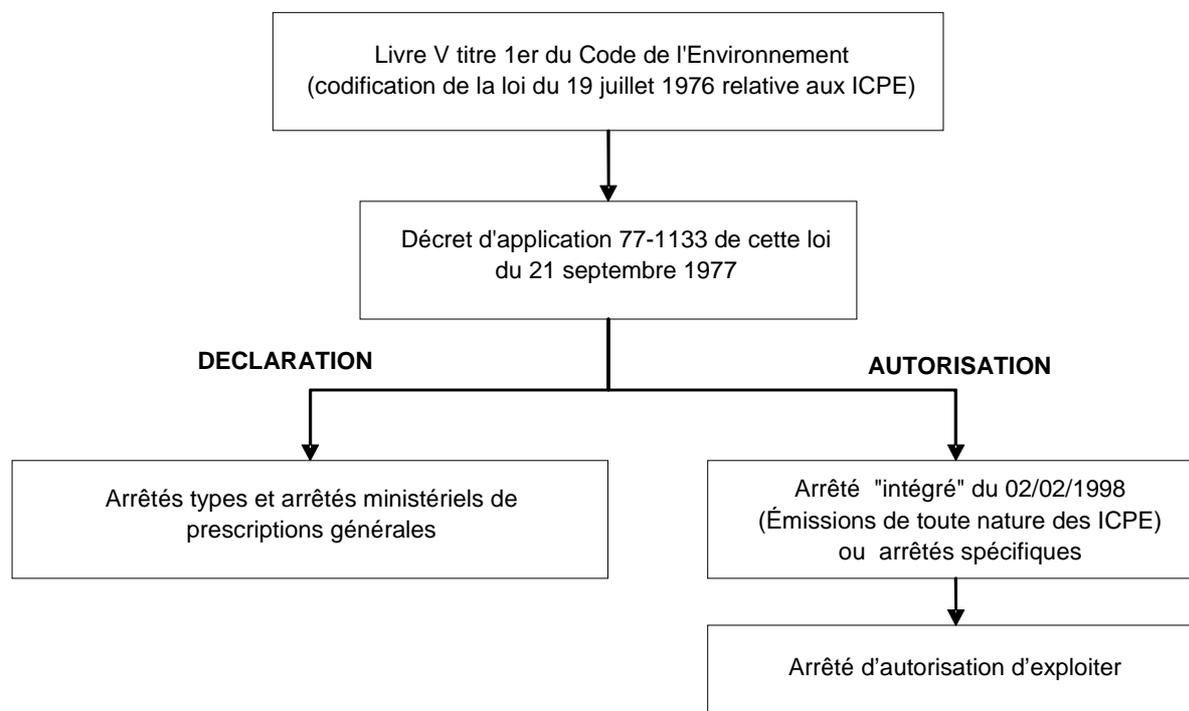
5. Réglementation sur les émissions polluantes issues des technologies de générateurs à air chaud biomasse

5.1 Généralités

Les usines, ateliers, dépôts, chantiers et, d'une manière générale, les installations exploitées ou détenues par toute personne physique ou morale, publique ou privée, qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publiques, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature et de l'environnement, soit pour la conservation des sites et des monuments « ainsi que des éléments du patrimoine archéologique » sont soumis aux dispositions du **titre 1^{er} du Livre V du Code de l'environnement et son décret d'application n°77-1133 du 21 septembre 1977**.

Ces installations sont définies dans la nomenclature des installations classées (**Décret du 20 mai 1953 modifié**). Ce décret soumet les installations à autorisation ou à déclaration suivant la gravité des dangers ou des inconvénients que peut présenter leur exploitation (**Art. L. 511-2 du Code de l'environnement**).

Les installations soumises à autorisation préfectorale sont celles qui présentent de graves dangers ou inconvénients pour les intérêts précédemment cités. L'autorisation n'est accordée que si ces dangers ou inconvénients peuvent être prévenus par des mesures que spécifie l'arrêté préfectoral (**Art. L. 511-1 du Code de l'environnement**). Cet arrêté fixe les conditions d'installation et d'exploitation jugées indispensables pour la protection des intérêts mentionnés ci-dessus, les moyens d'analyse et de mesure et les moyens d'intervention en cas de sinistre.



Afin de préserver les intérêts énumérés ci-dessus et de prévenir les pollutions et les nuisances, les installations listées dans la nomenclature ICPE (Décret du 20 mai 1953 modifié) sont soumises à une réglementation particulière. Cette nomenclature, en perpétuelles modifications, liste les rubriques par :

- **Substances et préparations** (matières premières), numérotées en 1000 (ex. 1530 dépôt de bois)
- **Activités**, numérotées en 2000 (ex. 2410, atelier où l'on travaille le bois)

en complément de l'ancienne nomenclature dont il reste quelques rubriques (ex. 167C, incinération de déchets industriels).

En fonction des seuils prévus par ce texte, un site peut être soumis à :

- **Déclaration** : La déclaration concerne une (des) rubrique(s) et non pas la totalité du site, un arrêté type de la rubrique peut donner des valeurs limites d'émissions,
- **Autorisation** : L'autorisation concerne la totalité du site, il faut se reporter généralement à l'arrêté du 02/02/1998 modifié pour les valeurs limites d'émissions, sauf s'il existe un arrêté spécifique.

Au niveau de l'activité de combustion, le **décret n°98-817 du 11 septembre 1998** a créé une nouvelle rubrique 2910 spécifique à cette activité, qui comporte 2 sous-rubriques :

- Combustibles classiques et biomasse "propre"¹ (2910A) en tant que combustible : les seuils de **déclaration (> 2MW) et autorisation (≥ 20MW)** pour la puissance des installations de combustion,
- Autres combustibles dont biomasse faiblement adjuvantée (2910B, bois imprégné de colle, vernis, peinture des industries de la 2nde transformation) : le seuil est en revanche plus bas pour **l'autorisation (> 0,1 MW). Dans ce cas, les valeurs limites d'émissions sont fixées au cas par cas dans l'arrêté préfectoral.**

Les chaudières dont la puissance thermique est **< 300 kW**, sous soumises à la **norme EN 303.5** qui définit les exigences en terme de conception, construction et sécurité.

Les chaudières dont la puissance est **< 2 MW sont assujetties au règlement sanitaire départemental**, ce règlement ne définit pas de valeurs limites réglementaires, un contrôle est fait par la DRASS sans contrainte précise sur les émissions de poussières. Donc pour les puissances comprises entre **300 kW et 2 MW, il n'existe pas de références de VLE** pour la combustion de biomasse sans adjuvant (installations classées 2910A).

Pour les puissances **< 100 kW**, il n'existe pas d'arrêté type de déclaration pour la combustion de biomasse faiblement adjuvantée (installations classées 2910B).

Pour information, le règlement sanitaire départemental constitue le texte de référence pour imposer des prescriptions en matière d'hygiène et de salubrité aux activités qui ne relèvent pas du champ d'application de la loi du 19 juillet 1976 sur les ICPE. En effet, les dispositions du règlement sanitaire cessent d'être applicables dès lors que les activités visées rentrent dans la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

¹ La biomasse se présente à l'état naturel et n'est ni imprégnée ni revêtue d'une substance quelconque. Elle inclut le bois sous forme de morceaux bruts, d'écorces, de bois déchiquetés, de sciures, de poussières de ponçage ou de chutes issues de l'industrie du bois, de sa transformation ou de son artisanat

5.2 Textes applicables à la technologie des générateurs d'air chaud biomasse

Cette partie présente la réglementation française relative aux polluants atmosphériques, se rapportant directement ou indirectement aux deux technologies de générateurs d'air chaud biomasse, à savoir :

- **Générateurs d'air chaud biomasse indirect** : les fumées de combustion passent dans un échangeur de chaleur (fumées/air) avant d'être rejetées à l'atmosphère,
- **Générateurs d'air chaud biomasse directs** : les fumées de combustion passent directement dans le process (exemple : air chaud dans un séchoir de tuiles avant cuisson) avant rejet à l'atmosphère.

Comme nous l'avons vu dans la partie 2. "inventaire et description des technologies de générateurs d'air chaud biomasse", le système générateur d'air chaud est une combinaison d'un foyer biomasse, d'un échangeur (facultatif), et d'un système de traitement des rejets du process ou des fumées.

Dans le cas du générateur d'air chaud biomasse indirect, la réglementation applicable est la même que pour une chaudière bois eau chaude classique. En revanche pour les générateurs d'air chaud direct, les valeurs limites d'émissions sont fortement liées au process et au site, qui est lui même soumis à la réglementation ICPE (déclaration ou autorisation).

La recherche a donc porté sur les installations de combustion et les activités liées au séchage de produits, et les activités spécifiées dans **l'Arrêté Intégré du 02/02/98 modifié** portant sur les émissions de toute nature des ICPE soumises à autorisation.

5.2.1 Générateur d'air chaud biomasse indirect

Comme nous l'avons vu précédemment, la réglementation applicable pour le générateur d'air chaud indirect est la même que pour une chaudière biomasse classique (production d'eau chaude, vapeur, etc.). Lors de son exploitation, il y a deux points de rejets bien distincts:

- **Point 1** : les fumées de combustion issues du générateur d'air chaud biomasse,
- **Point 2** : éventuellement les rejets de l'activité, si le générateur est lié au process de l'entreprise (exemple : déshydratation de produits alimentaires).

Dans le cas du chauffage d'atelier par un générateur d'air chaud, il n'y a pas de point de rejet autre que les fumées de combustion.

Les principaux textes applicables aux générateurs d'air chaud indirect touchent uniquement la **partie combustion**:

- o Pour les puissances comprises entre **300 kW et 2 MW**, il n'existe pas de références de VLE pour la combustion de biomasse sans adjuvant (installations non classées 2910A), de même que pour les puissances comprises entre **100 kW et 20 MW** il n'existe pas d'arrêté type proposant des VLE pour la combustion de biomasse faiblement adjuvantée (installations non classées 2910B), néanmoins les constructeurs garantissent généralement des valeurs s'approchant de **l'Arrêté ministériel du 25 juillet 1997 modifié**;
- o **L'Arrêté ministériel du 25 juillet 1997 modifié** relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE soumises à **déclaration** sous la rubrique 2910 (combustion),
- o **L'arrêté ministériel du 30 juillet 2003** relatif aux rejets atmosphériques des chaudières présentes dans une installation existante de combustion d'une puissance supérieure à 20 MW (**autorisation**),
- o **L'arrêté ministériel du 20 juin 2002** relatif aux rejets atmosphériques des chaudières présentes dans une installation nouvelle de combustion d'une puissance supérieure à 20 MW (**autorisation**),

- **Le projet de révision** (non sorti à ce jour) pour les chaudières présentes dans les installations de combustion nouvelles ou modifiées d'une puissance thermique supérieure à 20 MW.

Une synthèse des valeurs limites de rejet à l'atmosphère est présentée dans le tableau 4 du § 5.3.

5.2.2 Générateur d'air chaud biomasse direct

Dans le cas des générateurs d'air chaud biomasse direct, les gaz chaud issus de la chaufferie sont envoyés directement dans le process (exemple : séchoir de sciures de bois) avant d'être envoyés à l'atmosphère via une cheminée.

Il n'y a donc qu'un point de rejet regroupant les fumées de combustion et les éventuels rejets du process.

La réglementation applicable pour le générateur d'air chaud direct est conditionnée par le classement ICPE du site (déclaré ou autorisé). Les principaux textes applicables aux générateurs d'air chaud biomasse directs sont :

- **L'Arrêté intégré du 02 février 1998 modifié** relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE soumises à **autorisation**,
- **L'Arrêté ministériel du 25 juillet 1997 modifié** relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE soumises à **déclaration** sous la rubrique 2910 (combustion),

Une synthèse des valeurs limites de rejet à l'atmosphère est présentée dans le tableau 4 du § 5.3.

5.3 Synthèse de la réglementation française concernant les polluants issues des systèmes générateurs à air chaud à partir de biomasse non adjuvantée

Le tableau 4 présenté ci-dessous rassemblent l'ensemble des valeurs limites d'émission (VLE) applicables soit dans le cadre d'installation de combustion, soit dans le cadre l'une installation autorisée visée dans l'arrêté du 02/02/1998.

Taux exprimés en mg/Nm ³ , sur gaz sec	Réglementation s'appliquant aux générateur air chaud biomasse									
	Générateur air chaud indirect					Générateur air chaud direct				
Rubrique ICPE	2910	2910	2910			2910	2910	2910		
Régime ICPE	non classé	déclaration	autorisation			non classé	déclaration	autorisation		
Puissance thermique (P) de l'installation (MW)	< 2	2 - 20 (nouvelle)	≥ 20 (existante)	≥ 20 (nouvelle)	≥ 20 (nouvelle ou modifiée)	<2	2-20 (nouvelle)	>20		
Référence réglementaire	règlement sanitaire départemental	Arrêté du 25/07/1997	Arrêté du 30/07/2003	Arrêté du 20/06/2002	Arrêté en projet	aucune	Arrêté du 25/07/1997	Arrêté intégré du 02/02/1998 modifié		
								cas général	séchage	déshydratation de fourrages
Taux O ₂ (%)	-	11	6	6	6	taux réel (pas de correction)	11	taux réel (pas de correction)		
Poussières	-	150, si P< 4 100, si 4 ≤ P ≤ 20	100, si P<500 50, si P _≥ 500	50, si P<100 30 si P _≥ 100	30, si 20<P<50 20, si P>50	-	150, si P< 4 100, si 4 ≤ P ≤ 20	100, si le flux est <1kg/h 40, si le flux est >1kg/h	100, quel que soit le flux	200 (mesuré sur gaz humide), quel que soit le flux
CO	-	250	300	200, si P<100 150, si P _≥ 100	200, si 20<P<100 150, si P>100	-	250	fixé par l'arrêté préfectoral		
NO _x	-	500 (exprimé en NO ₂)	650 (voir exception)	400, si P<100 300, si 100<P<300 200, si P>300	400 si 20<P<50 250 si 50<P<100 200 si 100<P<300 150 si P>300	-	500 (exprimé en NO ₂)	500, si le flux est >25kg/h		
COV totaux	-	50	110 (exprimé en Ctotal)	110 (exprimé en Ctotal)	50 (exprimé en ctotal)	-	50	110 (exprimé en Ctotal), si le flux total est >2kg/h		
COV annexe III	-	-	-	-	-	-	-	20, si le flux est >0,1kg/h		
HAP	-	-	0,1	0,1	0,01	-	-	-		
SO _x	-	200 (exprimé en SO ₂)	2000, si P<500 400, si P _≥ 500	200	200, si 20<P<300 150, si P>300	-	200 (exprimé en SO ₂)	300 (exprimé en SO ₂), si le flux est >25kg/h		
HCl	-	-	-	-	30	-	-	50, si le flux est >1kg/h		
HF	-	-	-	-	5	-	-	5, si le flux est >500g/h		
Dioxines/furannes	-	-	-	-	0,1 ng (dioxines)	-	-	-		
Métaux et leurs composés	∑ (Cd+Hg+Tl)	-	-	0,1 et 0,05/métaux	0,1 et 0,05/métaux	0,1 et 0,05/métaux	-	-	0,1 et 0,05/métaux si le flux de la ∑ est >1kg/h	
	∑ (As+Se+Te)	-	-	1	1	1	-	-	1 si le flux de la ∑ est >5g/h	
	∑ (Pb)	-	-	1	1	1	-	-	1 si le flux de la ∑ est >10g/h	
	∑ (Sb+Cr+Co+Cu+Sn+Mn+Ni+V+Zn)	-	-	20, si 20<P<50 10, si P _≥ 50	10, si 20<P<50 5, si P _≥ 50	20, si 20<P<50 (10 si plan protection atmosphère) 5, si P _≥ 50	-	-	5 si le flux de la ∑ est >25g/h	
Autres fibres que l'amiante	-	-	-	-	-	-	-	si la quantité de fibres mise en œuvre dépasse 100 kg/an: 1 (fibres), 50 (poussières totales)		

Tableau 4 : Synthèse des valeurs limites de rejets des générateurs d'air chaud à partir de biomasse non adjuvantée

Précisions sur les installations visées aux Arrêtés "combustion" :

- Le débit des gaz de combustion est exprimé en m³ dans les conditions normales de température et de pression (273 K et 1011300 Pa),
- Les limites de rejets en concentration sont exprimés en **mg/m³ sur gaz sec**, la teneur en oxygène étant ramené à 6 ou 11% dans le cas de la biomasse².

Précisions sur les installations visées à l'Arrêté du 02/02/1998 modifié :

- **"Art. 24:** le débit des effluents gazeux est exprimé en m³/h rapportés à des conditions normalisées de température (273K) et de pression (101,3 kPa) après déduction de la vapeur d'eau (gaz sec); les concentrations en polluants sont exprimées en g ou mg / m³ rapporté aux mêmes conditions normalisées. Pour les installations de séchage, **les mesures se font sur gaz humide.**
L'arrêté d'autorisation précise la teneur en oxygène des gaz résiduels à laquelle sont rapportées les valeurs limites sauf dans les cas où l'oxygène est proscrit ou présente un taux négligeable."
- La **puissance P** correspond à la somme des puissances des appareils de combustion sous chaudière qui composent l'ensemble de l'installation.
- Dans certaines zones et conformément **aux articles L222-4 à L222-7 du code de l'Environnement**, des plans de protection de l'atmosphère peuvent être mis en place et définir des valeurs limite de rejets plus adaptées à la situation locale,
- Dans le cas où une installation rejette le même polluant par divers rejets canalisés, les VLE s'appliquent à chaque rejet canalisé dès lors que le flux total de l'ensemble des rejets canalisés et diffus dépasse le seuil fixé,
- Concernant le taux d'O₂ en sortie de cheminée, et vu que l'arrêté concerne le process global, il n'est pas imposé un taux d'O₂ spécifique, ce taux est précisé dans l'arrêté préfectoral du site mais correspond au fonctionnement normal. Les VLE imposées sont donc fixes quel que soit le taux d'O₂.
- Pour les installations soumises à autorisation, les valeurs limites d'émission de l'arrêté préfectoral peuvent être sévériées si les enjeux le justifient.

La **DREAL des Vosges** a été consultée sur cette partie réglementaire, l'organisme nous a confirmé que dans le cas des:

- Installations de combustion indirecte (cas des générateurs mais aussi dans l'aciérie), les textes applicables sont ceux des installations de combustion,
- Installations de combustion directe (dans de nombreux secteurs utilisant des fours comme l'aciérie), si l'installation est soumise à:
 - o Déclaration: le texte applicable est l'Arrêté combustion du 25/07/1997,
 - o Autorisation: le texte applicable est l'Arrêté intégré du 02/02/1998 modifié.

² La conversion d'une concentration Cn% exprimée à n% d'O₂ à une concentration C11% exprimée à 11% d'O₂ se fait en appliquant la formule suivante :

$$C11\% = Cn\% \times (21 - 11) / (21 - n)$$

Avec : C11% concentration exprimée à 11% d'O₂
Cn% concentration exprimée à n% d'O₂
n : % d'O₂ dans les fumées sèches

6. Synthèse des systèmes de traitement de fumées applicables aux générateurs d'air chaud à partir de biomasse

Une description des systèmes de traitement de fumées possibles pour les générateurs d'air chaud biomasse a été faite dans la partie 2 du document.

Il s'agit maintenant de présenter des solutions de traitement conformes à la réglementation en vigueur et aux exigences du fond chaleur de l'ADEME, qui soient les plus adaptées aux produits suivants:

- **Fumées de combustion du générateur d'air chaud indirect, en sortie de l'échangeur de chaleur fumées/air :**

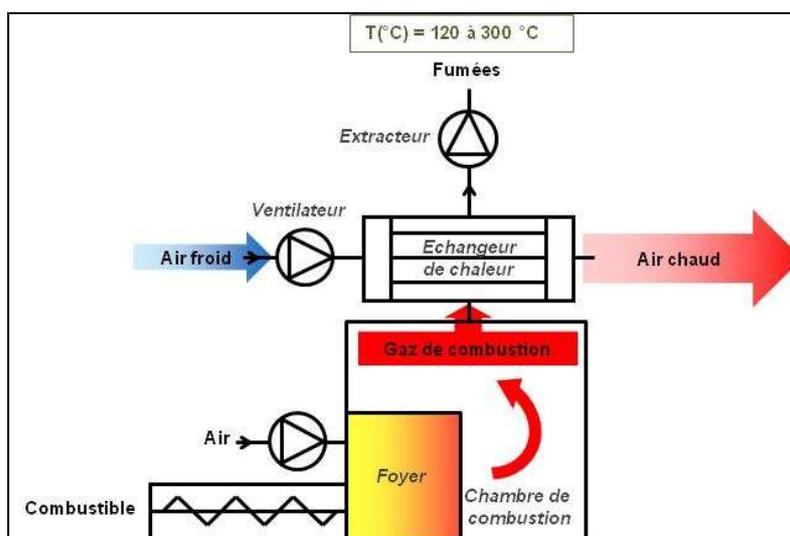


Figure 14: schéma de fonctionnement du générateur d'air chaud indirect

- **Fumées de combustion du générateur d'air chaud direct, en sortie de la chambre de dilution, avant ou après le process :**

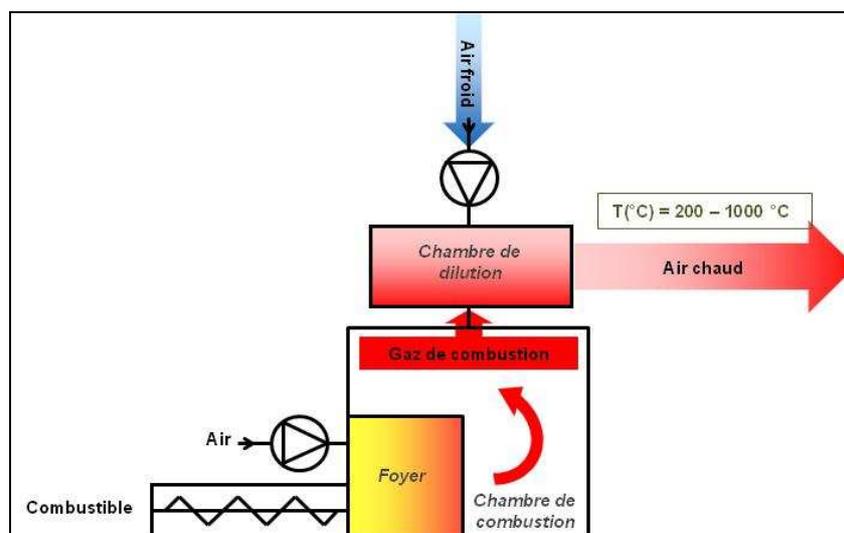


Figure 15: schéma de fonctionnement du générateur d'air chaud direct

En résumé, le choix du système de traitement des fumées est basé:

- Sur la température de l'air chaud ou des fumées au point où l'on souhaite le traiter,
- Sur les valeurs limites d'émission en poussières qui doivent être respectées en sortie d'installation.

Le tableau 5 ci-dessous fait la synthèse des systèmes de traitement des fumées applicables aux générateurs d'air chaud en fonction de la température de l'air ou des fumées à traiter, et des valeurs limites d'émissions de poussières à respecter :

Systèmes de traitement des fumées applicables aux générateurs d'air chaud biomasse directs et indirects proposés sur le marché français						
Exigences ADEME	Exigence en poussières (mg/Nm ³)		Systèmes de traitement des fumées			
	à 11% d'O ₂	à 6% d'O ₂	Cyclone	Filtre à Manches	Electrofiltre	Condenseur
-	150	-	x			x
-	100	-		x	x	x
Fond chaleur hors BCIAT	50	-		x	x	si couplé EF
BCIAT < 20 MWth	30	45		x	x	si couplé EF
BCIAT 20 à 50 MWth	20	30		x	x	si couplé EF
BCIAT > 50 MWth	<13,3	20		x	x	si couplé EF
Température en entrée du système (°C)	Systèmes de traitement des fumées					
	Cyclone	Filtre à Manches	Electrofiltre	Condenseur		
jusqu'à 250	x	médias utilisés couramment dans les systèmes biomasse	x		jusqu'à 190°C	
250 - 500	x	médias métalliques		jusqu'à 450°C		
500 - 1100	x					

Cy = cyclone et multicyclone; FAM = filtre à manches; EF = électrofiltre; Co = condenseur

Tableau 5: synthèse des éléments de choix sur les systèmes de traitements des poussières proposés sur le marché français

Concernant **les générateurs d'air chaud biomasse directs et indirects**, les exigences de l'administration portent sur les rejets à l'atmosphère.

Pour les projets reçus à l'appel à projet BCIAT et plus largement au fond chaleur, l'ADEME exige, comme l'administration, un système de traitement des fumées performant en sortie du système de combustion, en amont ou aval du process, afin de respecter les valeurs limites d'émissions en poussières qui seront exigées dans la future évolution de la réglementation ICPE sur les arrêtés combustion.

Le choix de traiter en amont ou en aval du process va dépendre de **la nature, des valeurs limites d'émission en poussières, du volume à traiter et de la température des fumées**, mélangées ou non au process.

Dans le cas du **système de traitement en amont du process**:

- Si la température des fumées en sortie de chambre de dilution est comprise entre 200 et 500°C, il est possible de mettre en place un électrofiltre ou un filtre à manches équipé de médias spécifiques,

- Si la température des fumées en sortie de chambre de dilution est supérieure à 500°C, le cyclone est la solution pour des exigences poussières de 150 mg/Nm³, pour des exigences plus basses il n'existe pas de solutions actuellement sur le marché français qui pourraient convenir au process en aval.

Le choix de traiter les fumées en amont du process est opté quand le volume d'air à traiter est trop important en aval, qui impliquerait un dimensionnement trop important des éléments de traitement de l'air chaud en sortie. En revanche, dépoussiérer en amont peut avoir des conséquences importantes vis à vis des besoins process, comme:

- Une perte importante d'énergie, d'où un mauvais rendement global,
- Un investissement et une maintenance supplémentaire,
- Un encombrement plus important, etc.

Dans le cas du **système de traitement en aval du process**:

- La température est généralement beaucoup moins élevée qu'en début de process,
- La nature et le volume de l'air sont très différents des fumées en entrée car cet air s'est chargé en polluants du process,
- Les systèmes de traitements seront donc plus spécifiques "process", pour traiter de grands volumes d'air chaud humide.

Pour plus de détails sur ces systèmes de dépoussiérages, se reporter à l'étude:

- ADEME - Indiggo (2007), portant sur l'évaluation technique, environnementale et économique des systèmes de dépoussiérage pour des chaufferies de puissance inférieure à 4 MW,
- RECORD (2009), portant sur les polluants et les techniques d'épuration des fumées, cas des unités de traitement et de valorisation thermique des déchets.

Se reporter également au tableau 2 du § 2.3. portant sur les limites techniques des médias utilisés dans les systèmes de dépoussiérages par filtres à manches.

7. Conclusion

Le fond chaleur de l'ADEME a l'objectif de susciter le développement de projets de production de chaleur à partir de biomasse. Cette biomasse peut être utilisée en chaudière pour la production d'eau chaude, eau surchauffée ou vapeur (**températures jusqu'à 120°C**), mais aussi pour produire de **l'air chaud (température jusqu'à 1100°C)**. Cette étude avait pour objectif de référencer les technologies de générateurs d'air chaud biomasse disponibles sur le marché français et les systèmes de traitement appropriés, les systèmes de comptage de l'énergie produite, ainsi que la réglementation applicable aux rejets de ces systèmes.

Les générateurs d'air chaud sont utilisés pour la production d'air chaud de process ou pour le chauffage de locaux.

Ces systèmes possèdent les mêmes dispositifs (silo, désilage, système d'alimentation) que pour les chaudières biomasse classiques; **la différence se fait au niveau de l'échangeur**, le fluide caloporteur n'est plus un liquide mais de l'air.

Dans cette étude, nous avons vu que les générateurs d'air chaud à partir de biomasse peuvent être de deux types:

- Les **générateurs d'air chaud à fumées directes**, sans échangeur de chaleur, les fumées de combustion sont envoyées directement dans le process avant rejet à l'atmosphère;
- Les **générateurs d'air chaud à fumées indirectes**, les fumées de combustion passent dans un échangeur de chaleur (fumées/air) avant d'être rejetées à l'atmosphère.

Les systèmes directs trouvent leur application principalement dans les process à haute température et pour lesquels les fumées chargées en poussières n'est pas une limite. Ils ont l'avantage d'avoir un meilleur rendement (pas d'échange de chaleur) et d'être très simples techniquement sur la partie combustion et exploitation. Ces générateurs sont en revanche plus complexe pour le choix de la meilleure technique disponible de traitement des fumées, notamment dû à la température d'entrée des fumées dans le système de traitement.

Dans le cas des projets aidés dans le fond chaleur de l'ADEME, il sera nécessaire de placer un système de dépoussiérage efficace à la sortie du générateur d'air chaud direct. Le choix de traiter en amont ou en aval du process va dépendre de **la nature, des valeurs limites d'émission en poussières, du volume à traiter et de la température des fumées**, mélangées ou non au process. Ce choix peut aussi comporter certains inconvénients, comme les **pertes de charge importantes**, investissement, maintenance, encombrement, etc.

Les systèmes indirects sont le plus souvent destinés aux applications (process, chauffage) nécessitant un air pur. Ils utilisent un gaz chaud propre et les fumées peuvent plus facilement être dépolluées à la sortie de l'échangeur : les technologies disponibles sont les mêmes que pour les chaudières biomasse habituelles. Le rendement du générateur est plus faible que les systèmes directs car l'échangeur thermique ne permet pas de récupérer l'ensemble de l'énergie produite. L'échangeur est généralement de type à tubes de fumées et calandres.

Afin de comptabiliser **l'énergie produite** par ces systèmes, il n'existe pas à ce jour de compteurs d'énergie thermique "clé en main" pour gaz caloporteur. La mise en place de capteurs permettant de suivre en continu certains paramètres sont néanmoins envisageables: pour les générateurs d'air chaud, le compteur d'énergie thermique est constitué de capteurs de débits, d'humidité, de sondes de températures, et d'un calculateur permettant de calculer la quantité d'énergie thermique échangée. Le paramètre limitant est une température élevée, qui rend difficile la mesure de l'humidité.

Concernant les **fournisseurs ou fabricants de générateurs d'air chaud biomasse** pour les systèmes:

- indirects: positionnés plutôt sur les petites à moyennes puissances, appliqués au chauffage de bâtiments industriels et agricoles;
- directs: positionnés plutôt sur les moyennes à fortes puissances, de plus de 1MW, appliqués aux process séchage et déshydratation moyenne et haute températures.

Ci dessous la liste des fournisseurs répertoriés:

Fournisseurs	Type de générateur	Gamme de puissance (kW)	Gamme de Température (°C)
MABRE	Indirect	139 - 755	20 - 65
Technique Energie Bois	Indirect	40 - 290	15 - 18
Samsoud Applications	Indirect	58 - 186	10 - 20
Gruss	Indirect	NC - 235	40 - 65
Uniconfort	Direct / Indirect	700 - 6000	100 - 500
Talbott's	Indirect	50 - 3000	NC
Compte-R	Direct / Indirect	2000 - 10000	200 - 800
Vyncke	Direct / Indirect	3000 - 30000	200 - 950
Weiss	NC	NC	NC
Maguin Promill	Direct	2000 - 30000	500 - 1000
Next Energies	Direct	2000 - 30000	200 - 650
Saacke	brûleurs et process thermique pour les installations existantes	500 - 20000	600 - 1100
Fama	grilles basculantes ou mobiles pour GAC et autres chaudières	> 20000	NC

Tableau 6: liste des fournisseurs de générateurs d'air chaud

Enfin, l'étude de **la réglementation en vigueur en France métropolitaine et DOM-TOM sur les valeurs limites d'émissions des générateurs d'air chaud** a permis de préciser les textes applicables selon l'utilisation d'une combustion directe ou indirecte:

- **Installations de combustion indirecte:** classé selon la rubrique ICPE 2910 (autorisation ou déclaration), il faut se reporter aux **arrêtés "combustion"**, les valeurs limites concernant les poussières vont de **150 à 13,3 mg/Nm³ à 11% d'O₂** selon la puissance de l'installation de combustion (Arrêtés du 25/07/1997, du 30/07/2003, du 20/06/2002 et le projet de révision).
- **Installations de combustion directe:** classé selon la rubrique ICPE 2910, il faut se reporter à **l'Arrêté du 02/02/98 pour les installations soumises à autorisation**, le cas général exige **100 mg/Nm³ pour des flux < 1kg/h sinon 40 mg/Nm³**. Dans des cas plus spécifiques comme la déshydratation de fourrage, les valeurs limites peuvent être élevées (200 mg/Nm³). Les installations soumises à déclaration se reportent sur l'arrêté "combustion" (Arrêté du 25/07/1997).

8. Bibliographie

Partie Chaudière:

Nussbaumer, Th.; « Biomass Combustion in Europe – Overview on Technologies and Regulations », New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), Final Report 08-03, NYSEDA 9477, Albany, NY, USA, April 2008

Rogaume, Y. ; « Production de chaleur à partir du bois - Combustible et appareillage », Techniques de l'ingénieur, BE 8747, 15 p, 2005

Rogaume, Y. ; « Production de chaleur à partir du bois - Installations industrielles », Techniques de l'ingénieur, BE 8748, 17 p, 2005

Partie Echangeurs:

« Echangeurs de chaleur - Généralités », Techniques de l'ingénieur, B 2340, 18 p, 1994.

« Echangeurs de chaleur - Descriptions des échangeurs », Techniques de l'ingénieur, B 2341, 21 p, 1994.

Partie Capteurs:

« Le débitmètre thermique », un faux vrai massique, MESURES, n°731, pages 63-68, Janvier 2001

« Le débitmètre Coriolis fait du dosage de plus en plus vite », MESURES, n°754, pages 51-54, Avril 2003

« Les mesures de débit », MESURES, n°755, pages 62-73, Mai 2003

« Les mesures d'humidité dans l'air et les gaz », MESURES, n°765, pages 58-67, Mai 2004

« Toute la débitmétrie », MESURES, n°796, pages 48-56, Juin 2007

« Mesures d'humidité : le point de rosée, d'accord, à condition de savoir ce que l'on fait », MESURES, n°797, pages 74-77, Septembre 2007

Partie Dépoussiérage:

Battistoni, F.; Ginestet, A.; « Recensement des nouvelles techniques de dépoussiérage – Rapport final : nouveaux procédés et nouveaux médias filtrants », NTV 2003/038, 83 p, CETIAT, Juillet 2003

Bicocchi, S. ; « Les polluants et les techniques d'épuration des fumées. Cas des unités de traitement et de valorisation thermique des déchets. Etat de l'art. », Cadet International pour RECORD, 399 p, n°08-0227/1A, 2009.

Carlsson, K.; « Gas cleaning in flue gas from combustion of biomass », Deliverable 2E-3 of the EU project ThermalNet, EcoExpert, April 2008

Le Cloirec, P. ; « Traitement des fumées », Techniques de l'ingénieur, BE 8856, 16 p, 2006

Mousseau, S. ; « Evaluation technique, environnementale et économique des techniques disponibles de dépoussiérage pour les chaufferies bois de puissance installée comprise entre 0 et 4 MW - Synthèse », ADEME, 21 p, Septembre 2007

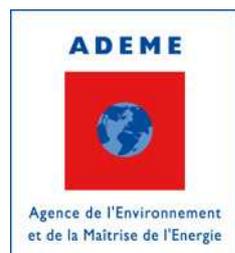
Partie Fournisseurs

L'ensemble des documents, plaquettes commerciales, questionnaires reçus, site Internet des fournisseurs de générateurs d'air chaud biomasse cités.

Partie réglementation environnement:

Outil informatique en ligne (payant) "ELNET: environnement et nuisances": base de données sur l'ensemble des textes communautaire et français se rapportant à l'environnement, Editions Législatives 2010.

9. Annexes



ENQUETE « GENERATEURS A AIR CHAUD A PARTIR DE BIOMASSE »

CONTEXTES ET OBJECTIFS

Conformément à l'engagement pris par l'État français dans le cadre du Grenelle Environnement, l'ADEME s'est vu confier la gestion d'un « Fonds chaleur renouvelable », pour développer la production de chaleur à partir de sources renouvelables, dont la biomasse. Dans ce cadre, l'ADEME a mis en place un fond chaleur et un appel à projet BCIAT afin de susciter le développement de projets de production de chaleur.

Il apparaît que la biomasse, classiquement utilisée en chaudière pour produire de la chaleur sous forme d'eau chaude, d'eau surchauffée ou de vapeur, peut aussi alimenter des générateurs à air chaud dans le secteur industriel. Partant de ce constat, l'ADEME a lancé un appel à proposition pour la réalisation d'un état de l'art de la technologie « générateur à air chaud à partir de biomasse »

Le champ d'investigation est délimité par les aspects suivants :

- **Générateur à air chaud fonctionnant à partir de biomasse** (biomasse admissible à l'appel à projet fond chaleur et BCIAT 2010),
- **Production thermique à partir de 100 tep/an** (1200MWh ou environ 150kW).

ADMINISTRATIF

Nom	Cliquez ici pour taper du texte.	Statut	Choisissez un élément.
Adresse	Cliquez ici pour taper du texte.		
CP Ville	Cliquez ici pour taper du texte.	Pays	Cliquez ici pour taper du texte.
Tél	Cliquez ici pour taper du texte.	Fax	Cliquez ici pour taper du texte.
Mél	Cliquez ici pour taper du texte.	Site Internet	Cliquez ici pour taper du texte.

Si vous êtes fabricant, quel(s) est(sont) votre(vos) distributeur(s) français ou si vous êtes **distributeur**, quel(s) est (sont) la (les) marque(s) distribuée(s) :

Nom, coordonnées, et contact: Cliquez ici pour taper du texte.

Nom, coordonnées, et contact: Cliquez ici pour taper du texte.

Nom, coordonnées, et contact: Cliquez ici pour taper du texte.

TECHNOLOGIE DES GENERATEUR D'AIR CHAUD

Quel est le type de process thermique mis en œuvre dans votre gamme ?

- Indirect (foyer + échangeur air/fumées)
- Direct (fumées de combustion)

Autre : Cliquez ici pour taper du texte.

DOMAINES D'APPLICATION DES GENERATEURS A AIR CHAUD

Secteurs d'activités de vos clients : Cliquez ici pour taper du texte.

Domaines d'utilisation (Exemple : chauffage, process (séchage)) : Cliquez ici pour taper du texte.

Consigne de température (T° de travail du client) : Cliquez ici pour taper du texte. °C

REFERENCES DANS LE DOMAINE DES GENERATEURS A AIR CHAUD

Cliquez ici pour taper du texte. (Indiquez également des sites que nous pourrions visiter).

QUALITE DU COMBUSTIBLE / BIOMASSE

Type de biomasse : TOUTES

Plaquettes granulés chutes

Copeaux sciure autres : Cliquez ici pour taper du texte.

Granulométrie : Cliquez ici pour taper du texte. mm

Humidité : Cliquez ici pour taper du texte. % (bois énergie)

Consommation : Cliquez ici pour taper du texte. kg/h

DONNEES TECHNIQUES (MERCI DE FOURNIR SI POSSIBLE UN SCHEMA DE FONCTIONNEMENT)

1- Partie combustion biomasse

Type de chaudière/foyer biomasse : Foyer volcan (précisez la poussée)
 A grille (fixes ou mobiles)
 Lit fluidisé
 Autre : Cliquez ici pour taper du texte.

Température de fonctionnement : Cliquez ici pour taper du texte. °C

Puissance thermique : de Cliquez ici pour taper du texte. à Cliquez ici pour taper du texte. kW

Puissance électrique : de Cliquez ici pour taper du texte. à Cliquez ici pour taper du texte. kW

Mode de pilotage :

Manuel (pour Cliquez ici pour taper du texte. kW)

Automatique pour Cliquez ici pour taper du texte. kW

→ préciser les paramètres suivis : Cliquez ici pour taper du texte.

Rendement de la chaudière : Cliquez ici pour taper du texte. %

Système d'alimentation du foyer : Cliquez ici pour taper du texte.

Brevet sur cette technologie ? Choisissez un élément.

→ merci de préciser : Cliquez ici pour taper du texte.

Composition des fumées : Cliquez ici pour taper du texte. %CO
Cliquez ici pour taper du texte. %CO2

2- Partie Echangeur

Principe de fonctionnement et caractéristiques : Cliquez ici pour taper du texte.

Matériaux de construction utilisés : Cliquez ici pour taper du texte.

Température des fumées à l'entrée de l'échangeur : Cliquez ici pour taper du texte. °C maxi

Température de l'air à l'entrée de l'échangeur : Cliquez ici pour taper du texte. °C maxi

Température de l'air à la sortie de l'échangeur : Cliquez ici pour taper du texte. °C maxi

Température des fumées à la sortie de l'échangeur : Cliquez ici pour taper du texte. °C maxi

Rendement de l'échangeur : Cliquez ici pour taper du texte.

Débit d'air de ventilation : Cliquez ici pour taper du texte. Nm³/h

Pression de travail : Cliquez ici pour taper du texte.

Brevet sur cette technologie ? Choisissez un élément.

→ merci de préciser : Cliquez ici pour taper du texte.

3- Partie Système de traitement des fumées

Système existant de traitement des fumées/dépoussiérage ? Choisissez un élément.

Si non : en sous-traitance : Choisissez un élément.

Si oui :

- quels sont vos sous-traitants/avec qui travaillez vous ? Cliquez ici pour taper du texte.
- avec qui ne travaillez vous pas ? Cliquez ici pour taper du texte.

Technologie(s) mise(s) en œuvre :

- Multi cyclones
- Filtre à manche
- Electro filtre (Cliquez ici pour taper du texte. %O2)
- Condenseurs et traitement des effluents récupérés
- Autre : Cliquez ici pour taper du texte.

Données constructeur/performances attendues sur les émissions de COV et poussières : Cliquez ici pour taper du texte. mg/Nm³ (préciser à quel %O₂ ont été déterminés ces éléments)

Température des fumées en entrée et en sortie du système : Cliquez ici pour taper du texte.

Ordre de prix selon le niveau de performance souhaité (100, 50, 30 voire 10mg de poussières/Nm³) : Cliquez ici pour taper du texte.

Brevets ? Choisissez un élément.

→ merci de préciser : Cliquez ici pour taper du texte.

SYSTEME DE COMPTAGE DE L'ENERGIE PRODUITE

Système de comptage inclus dans l'offre ? Choisissez un élément.

Noms de fournisseurs de compteurs d'énergie adaptable aux générateurs à air chaud : Cliquez ici pour taper du texte.

DONNEES ECONOMIQUES

Coût d'investissement dans un générateur à air chaud : (fourchette entrée de gamme (kW) et haut de gamme (kW))de Cliquez ici pour taper du texte. à Cliquez ici pour taper du texte. €HT

- ➔ *merci de préciser ce qui est compris dans le prix (accessoires, échangeur...) :*
Cliquez ici pour taper du texte.
- ➔ *merci de préciser ce qui fait monter le prix (chaudière ou échangeur ou autre) :*
Cliquez ici pour taper du texte.

Pouvez-vous préciser les coûts d'exploitation associés (temps homme, fournitures, maintenance...) : Cliquez ici pour taper du texte.

Merci d'inclure vos documents commerciaux / plaquettes dans le retour électronique du questionnaire, avec les schémas de fonctionnement.

**Merci d'avoir pris le temps de remplir ce questionnaire.
Merci de renvoyer ce questionnaire au CRITT BOIS (par email uniquement).
Sylvie DUCROS - Mél : sylvie.ducros@cribois.net**