

# Lit fluidisé bouillonnant pour la combustion des résidus forestiers

Anthony **GONCALVES** <sup>\*a</sup>, Lazslo **KISS** <sup>a</sup>, Marie-Isabelle **FARINAS** <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Groupe de Recherche en Ingénierie des Procédés et Systèmes (GRIPS), Université du Québec à Chicoutimi, Canada

---

## RÉSUMÉ

Une technologie de combustion pour les résidus forestiers est présentée. La taille de l'unité correspond à la demande en vapeur d'une usine de production de lactosérum. La chaudière produit 10 t/h de vapeur à 32 bars et 315°C à la turbine de 1MWe et pour le procédé. Le principal objectif du projet était de développer une technologie de combustion qui permet une opération stable de la chaudière avec un taux d'humidité du combustible de 50%.

Le dimensionnement du lit fluidisé est basé sur le développement d'un modèle mathématique associant tous les modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) dans le système à tous les régimes de fonctionnement. La réalisation d'un montage expérimental a permis d'améliorer la compréhension du phénomène de fluidisation et de vérifier les régimes de fluidisation avec quatre différents diamètres de particule (1 à 2mm, 0.841 à 1mm, 0.500 à 1mm, et à 500µm).

Le système a été mis en route en hiver 2009 et les résultats de fonctionnement ont été analysés. La principale conclusion de ce type d'installation est la stabilité de la combustion (température de la chambre de combustion), la réponse aux variations de demande de vapeur (consigne de pression) et le rendement de combustion. Il y a une délicate interaction entre les débits d'air du ventilateur primaire et du ventilateur secondaire pour optimiser le contrôle de la température du lit fluidisé et de la stabilité de la combustion. La température moyenne de fonctionnement se situe autour de 850°C et subit des variations pouvant atteindre 100°C dépendamment de la demande de vapeur et de l'humidité du combustible. Pendant l'été, les variations d'humidité (autour de 20%) du combustible engendrent des températures de fonctionnement trop élevées (plus que 950°C). Ces écarts de température rendent le fonctionnement de l'installation instable car il n'y a pas d'échangeur externe ou interne permettant le contrôle de la température de fluidisation.

**Mots clefs :** *combustion, lit fluidisé, chaudière*

---

## 1. INTRODUCTION

Les réacteurs à lit fluidisé ont trouvé de nombreuses applications pratiques telles que la combustion du charbon et de la biomasse. Les biomasses (déchets organiques) reçoivent un intérêt grandissant pour la production d'énergie car ces combustibles renouvelables réduisent potentiellement le bilan de CO<sub>2</sub>. La combustion en lit fluidisé bouillonnant (*Bubbling Fluidized Bed Combustion, BFBC*) de combustible solide alternatif devient de plus en plus attractif en réponse à la constante augmentation du prix des carburants fossiles et des grandes quantités de résidus qui doivent être traitées. La combustion en lit fluidisé est souvent indiquée comme étant le meilleur choix pour transformer en énergie des carburants alternatifs dû à la haute efficacité de cette technologie. Une combustion efficace pour des combustibles à faible pouvoir calorifique est accessible en appliquant une

bonne structure de contrôle et selon certains auteurs, il est possible d'accomplir une combustion efficace à 99% [1]. Cette technologie (BFBC) est appropriée pour les générateurs de vapeur de grandes centrales thermiques car elle peut supporter une variation de la demande. Elle peut répondre de manière efficace à des variations de 4% par minute [2].

La fluidisation fait référence aux conditions dans lesquelles un matériau granulaire prend les caractéristiques d'un fluide. Un gaz passe de bas en haut et au travers d'un lit de particules et ce débit de gaz produit des forces qui tendent à séparer les particules des unes des autres. Le débit de gaz doit rester en dessous de la vitesse d'emportement des particules pour ne pas voir ces dernières s'envoler. Pendant la combustion une partie des cendres et des particules fines doivent être collectées dans un cyclone. La température du lit qui influence la stabilité de la combustion, l'efficacité du générateur de vapeur et le taux d'émission de polluant sont les paramètres les plus

\* Anthony Goncalves  
Adresse électronique : [anthony.goncalves@nexxenergie.com](mailto:anthony.goncalves@nexxenergie.com)

importants de ce type de système. Pendant le démarrage, le lit est préchauffé avec un brûleur auxiliaire (gaz ou huile) et ensuite le lit est alimenté avec la biomasse. Une vue générale de l'installation est présentée à la figure 1. La procédure de démarrage est une des opérations les plus importantes pour initialiser la fluidisation. Dans ce cas, le système d'alimentation est conçu pour de l'écorce de bois en morceau déchiqueté uniformément.

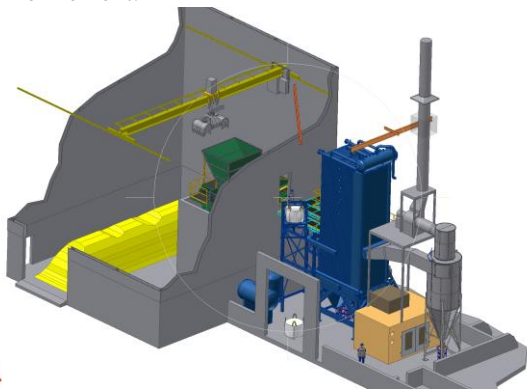


Figure 1 : Vue d'ensemble de l'installation avec la réserve et le système d'alimentation

Le système d'alimentation est le cœur du système car le débit d'alimentation ne peut pas être interrompu. L'homogénéisation de l'écorce en terme de taille et d'humidité est un autre aspect important.

Le combustible est stocké dans une grande pièce où un pont roulant entièrement automatisé transporte l'écorce dans une benne de stockage surélevée. Ensuite, la biomasse est convoyée jusqu'à un tamis rotatif qui alimente une vis sans fin de 40cm de diamètre. La vis sans fin fournit le débit d'écorce (par variation de la vitesse de rotation) en fonction du taux de combustion.

La grille de fluidisation est une autre partie critique qui influence l'opération de l'installation. La taille des buses, le nombre et le diamètre des trous ainsi que la vitesse d'air ont besoin d'être dimensionnés en fonction de l'homogénéité de la fluidisation dans le but d'assurer les conditions appropriées à la combustion. La hauteur du lit et la perte de charge correspondante sont d'autres paramètres importants pour la conception de la grille de fluidisation [10, 11].

La formation d'eutectiques dans le sable du lit fluidisé représente un aspect très négatif sur l'efficacité du réacteur. La formation d'agglomérats affecte sérieusement la combustion et conduit très souvent à la défluidisation puis à l'arrêt involontaire de la centrale. Le point de fusion de la silice diminue quand elle est mélangée à la cendre et la formation d'eutectiques apparaît lorsque des points chauds locaux se forment dans le lit.

## 2. SPÉCIFICATIONS DE LA CHAUDIÈRE

La chaudière disponible était de type à tube d'eau conçu pour une grille de combustion et non pour un lit fluidisé. La première limitation imposée par la chaudière était la taille de la chambre de combustion. La largeur maximale du lit fluidisé était fixée par les murs d'eau existants qui ne devaient pas être altérés. Ainsi, la superficie globale du lit était prédéterminée ce qui impose la vitesse de fluidisation d'opération nominale de l'unité. Le lit fluidisé mesure 2,3mx2m par 0,3m de hauteur ; la vitesse de fluidisation approximative est de 1,5m/s.

Le ventilateur d'air primaire a une puissance de 75kW avec une pression de 1,27m CE (0,12 bars) en opération normale. Le ventilateur secondaire a une puissance de 30kW avec une pression de 0,38m CE (0,04 bars). La pression du ventilateur primaire couvre la perte de charge au travers du lit de sable (proportionnel à la hauteur de sable) et la perte de charge au travers des buses.

### 2.1 CONCEPTION DE LA GRILLE DE FLUIDISATION

Comme il a été mentionné plus tôt, la grille de fluidisation (figure 2) est critique pour obtenir une bonne opération du système. Le principal rôle d'une grille de fluidisation est d'assurer une distribution uniforme du fluide (ici de l'air) sous toute la section du lit fluidisé. La taille et la forme des buses, le nombre et le diamètre des trous ainsi que la vitesse de l'air à la sortie des buses doivent être déterminés pour assurer de bonnes conditions à la combustion. La grille de cette installation est faite de 130 buses comprenant 6 trous d'injection d'air.



Figure 2 : La grille de fluidisation tel qu'installé dans la chambre de combustion

La conception de la grille est basée sur la modélisation mathématique et sur l'observation d'un montage expérimental. Le logiciel Ergun [3] spécialement développé pour la conception de réacteur à lit fluidisé a été utilisé. Ce logiciel n'est pas convivial et requiert une connaissance fondamentale de la fluidisation. Il ne

\* Anthony Goncalves  
Adresse électronique : [anthony.goncalves@nexxenergie.com](mailto:anthony.goncalves@nexxenergie.com)

donne pas une conception de buse concrète comme résultat mais permet de faire les corrélations entre le nombre de buses et de trous d'injection d'air, le diamètre des trous, la vitesse de fluidisation minimale et la vitesse à la sortie des buses. Pendant la conception de la grille de fluidisation, une distribution homogène de l'air est requise et d'autre part l'interaction individuelle des jets d'air doit être évitée (un jet ne doit toucher ni un autre jet, ni la paroi d'une buse). Les buses de fluidisation doivent assurer une perte de charges permettant la distribution uniforme de l'air dans le lit mais ne doit pas surdimensionner le ventilateur de fluidisation.

#### 4. SYSTÈME D'ALIMENTATION

Le système de stockage et de transport du combustible (figure 3) a été brièvement décrit dans l'introduction.

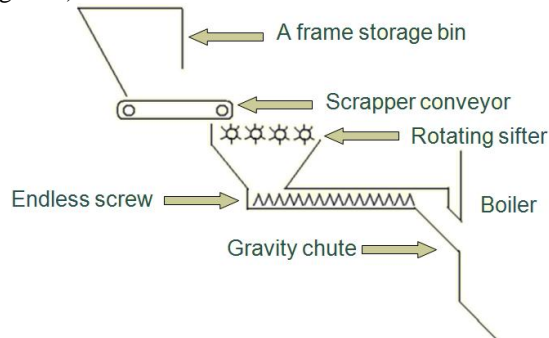


Figure 3 : Schéma du parcours du combustible (de la gauche vers la droite)

La figure 3 montre un schéma explicite du parcours du combustible avant de se rendre dans la chambre de combustion. Le combustible est déposé dans la benne de stockage à l'aide d'un grappin automatisé. Un convoyeur à chaîne transporte la biomasse jusqu'au tamis rotatif qui assure une granulométrie homogène à l'installation. Ensuite, la vis sans fin pousse le combustible au-dessus de la chute et alimente la chambre de combustion. Il a été conçu pour un débit massique de biomasse d'environ 4 tonnes/hes. Pendant l'hiver, l'humidité et la glace contenues dans le combustible provoquent des blocages tout au long des convoyeurs.

En utilisant des matériaux spécifiques et en adaptant le système de contrôle de l'alimentation, ce phénomène a complètement disparu. La surface rugueuse de la chute d'alimentation, fabriquée en réfractaire opposait une trop grande friction à l'écoulement de combustible dans le foyer. Un amas d'écorces accumulés sur la chute tombait involontairement dans le lit. Une défluidisation était donc provoquée, suivie par une apparition de points chauds locaux et engendrait la formation d'eutectiques. La chute en réfractaire a été remplacée par une chute lisse opposant très peu de

résistance à l'écoulement de l'écorce et le problème a disparu.

Le système de contrôle assure un débit de combustible suffisant (taux de combustion) en réponse à la demande de vapeur en actionnant par commande proportionnelle la vitesse de la vis sans fin.

#### 5. PROCÉDURE DE DÉMARRAGE

Pendant le démarrage, le lit est préchauffé avec un brûleur de démarrage et ensuite l'alimentation avec la biomasse commence. La procédure de démarrage est une importante étape dans l'opération d'une telle installation. En effet, si la procédure de démarrage n'est pas respectée (température de démarrage trop faible, débit de combustible trop rapide), la fluidisation risque de ne pas être homogène en température et en bouillonnement ce qui conduit à un haut risque de fusion des cendres et du sable. La procédure de démarrage est la suivante :

1. Vérification de la hauteur de sable (opérateur);
2. Démarrage de la fluidisation (ventilateur primaire);
3. Allumage du brûleur auxiliaire;
4. Chauffage du sable jusqu'à la température d'auto-ignition (environ 700°C) [4];
5. Alimentation en biomasse à vitesse réduite;
6. Augmentation progressive du débit d'alimentation (écorces) jusqu'à la température de 850°C.

Le principal problème avec l'utilisation d'un brûleur de démarrage placé au-dessus du lit est le faible taux de transfert de chaleur entre le sable et la flamme. Dans notre cas, le brûleur de démarrage a été sous-dimensionné. Une solution temporaire consistait à mélanger l'écorce de démarrage à de l'huile afin d'atteindre plus rapidement la température nécessaire de 700°C [4]. Normalement, l'air de fluidisation doit être préchauffé afin d'atteindre les conditions de démarrage rapidement.

#### 6. OPÉRATION ET STRATÉGIE DE CONTRÔLE

Le réacteur à lit fluidisé opère correctement seulement sous certaines conditions. Il y a un étroit lien entre le ventilateur d'air primaire et secondaire, la température du lit et la stabilité de la combustion. Une caractéristique importante dans l'équilibre énergétique du système est la température du lit fluidisé. Une augmentation de l'air de fluidisation augmente la température (augmentation du taux de combustion, dégagement de chaleur) et inversement [5, 1]. Ce qui démontre le fait qu'une partie de la combustion prend place à l'intérieur du lit et l'autre partie prend place au-dessus du lit (apparition de flamme). Il y a certaines méthodes permettant le contrôle du régime de

\* Anthony Goncalves  
Adresse électronique : [anthony.goncalves@nexxenergie.com](mailto:anthony.goncalves@nexxenergie.com)

fluidisation et même la prévention de la formation d'eutectique avec des prises de mesures dans le débit d'air primaire combiné avec des lectures de températures du lit, mais ces méthodes n'ont pas été considérées dans notre installation pour des raisons économiques. La variation d'humidité du combustible peut provoquer de fortes variations de température dans le lit et un rigoureux suivi de la biomasse et une homogénéisation du combustible respectant les critères de conception concernant l'humidité (50%) doit être faite. Le rôle du ventilateur secondaire est de compléter la combustion des composés volatils émanant du lit [8].

Le système a été mis en opération durant l'hiver 2009 et un système d'acquisition permet l'enregistrement en continu des variables les plus importantes :

1. Trois thermocouples immergés dans le lit de sable (figure 4)
2. La vitesse des ventilateurs (primaire, secondaire et cheminée)
3. Le pourcentage d'oxygène dans les fumées
4. La pression de vapeur

Le régime de fluidisation est atteint quand les trois thermocouples montrent la même température [2] (figure 5).

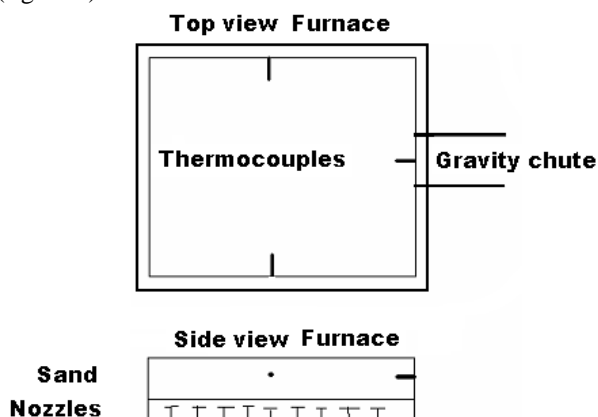


Figure 4 : Schéma de la disposition des thermocouples dans le lit fluidisé

Le pourcentage d'oxygène dans les gaz de combustion est une preuve de combustion. En effet, si le taux d'oxygène est inférieur à 21% (niveau normal dans l'air atmosphérique) c'est le résultat de la réaction chimique de combustion utilisant une partie de l'oxygène.

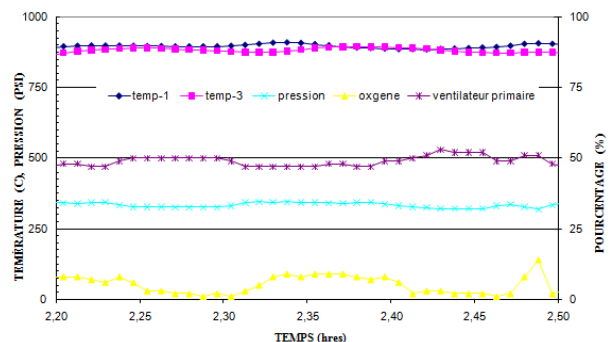


Figure 5 : Fonctionnement typique en régime établie de l'installation

La figure 5 montre le fonctionnement typique de l'installation quand les critères de conception sont rencontrés. Les températures du lit et la pression de vapeur sont stables. Une fluctuation du ventilateur primaire et de l'oxygène montre les corrections prises par le système de contrôle pour assurer un fonctionnement stable de l'installation.

La calibration d'un tel système nécessite de nombreux ajustements. En effet, les ajustements à apporter afin d'obtenir une opération stable sont nombreux (vitesse des ventilateurs, température du lit, etc.). De plus, la calibration des boucles de contrôle demande des ajustements (temps de réponse, coefficient d'amortissement) et sont calibrées expérimentalement (figure 6).

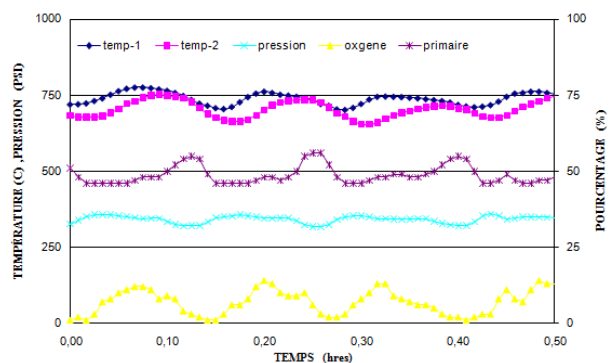


Figure 6 : Fonctionnement de l'installation avec mauvaise calibration

La figure 6 montre des conditions d'opérations quand l'installation n'est pas calibrée correctement. On peut voir de fortes variations des températures, pressions, vitesses des ventilateurs et taux d'oxygène. Le fonctionnement instable est principalement dû à une mauvaise calibration des appareils et boucles de contrôle lorsque les critères de conception sont respectés (humidité de la biomasse et demande de vapeur).

Durant l'été, le taux d'humidité de la biomasse diminue et le bilan thermique de l'installation n'est plus respecté. Le lit atteint des températures dangereuses pour le

\* Anthony Goncalves  
Adresse électronique : [anthony.goncalves@nexxenergie.com](mailto:anthony.goncalves@nexxenergie.com)

fonctionnement de l'installation. Le comportement de l'installation se rapproche de celui présenté à la figure 6. En effet, la température du lit fluidisé augmente jusqu'à atteindre la valeur critique de 950°C dans le lit. Le système de contrôle arrête l'alimentation en biomasse jusqu'au recouvrement d'une température acceptable. La production de lactosérum est affectée par l'instabilité du générateur de vapeur.

C'est pour cette raison qu'un rigoureux suivi de la provenance du combustible en terme de taille et d'humidité doit être fait. Des solutions sont actuellement à l'étude pour ajouter un échangeur de chaleur à l'intérieur du lit fluidisé et ainsi assurer un meilleur contrôle de la température.

## 7. CONCLUSION

Un lit fluidisé bouillonnant pour la combustion intégrée dans un générateur de vapeur a été présenté. Quand on considère un BFBC pour la combustion de résidus forestiers, il est très important de déterminer avant la conception les limites du combustible en terme de taille et d'humidité qui sera disponible et de respecter ces critères. De plus, un combustible homogène (taille, humidité) assurera un fonctionnement du système d'alimentation continu.

Les avantages de ce type d'installation sont :

- la flexibilité au niveau des variations de charges (demande de vapeur)
- l'efficacité de combustion (99%)
- le peu d'entretien (changement de sable)

Les inconvénients de ce type d'installation sont :

- les variations de température du lit fluidisé du à la variation d'humidité
- la conception nécessite une connaissance de la fluidisation
- l'utilisation par les opérateurs demande un temps de prise en main

Pour conclure, la technologie BFBC est une bonne solution pour brûler des carburants résiduels et les convertir en énergie grâce à sa flexibilité et la possibilité de réaliser une opération efficace et propre. De plus, le vaste domaine scientifique et technique de la combustion en lit fluidisé offre des opportunités de recherche.

## 8. RÉFÉRENCES

- [1] S.N Oka, Fluidized Bed Combustion, Marcel Dekker, Inc., New York 2004.
- [2] P. Basu, Combustion and Gasification in Fluidized Bed, CRC Press, 2006.
- [3] Khali Shakourzadeh, Ergun, University of Compiègne (UTC), Paris, France.
- [4] Stulz et Kitto, "Steam-its generation and use Babcock and Wilcox", 40<sup>th</sup> edition, pp.16-17, 1992
- [5] D.L. Kraft, Bubbling Fluid Boiler Emissions Firing Bark & Sludge, TAPPI Engineering Conference, 1998.
- [6] J. Nijenhuis, R. Korbee, J. Lensselink, J.H.A. Kiel, J.R. van Ommen, A method for agglomeration detection and control in full-scale biomass fired fluidized beds, Chemical Engineering Science 62 (2007) 644-654.
- [7] A. Hadavand, et al., An innovative bed temperature-oriented modeling and robust of a circulating fluidized bed combustor, Chem. Eng. J. (2008), doi:10.1016/j.cej.2007.11.032
- [8] Fabrizio Scala, Riccardo Chirone, Fluidized bed combustion of alternative solid fuels, Experimental thermal and Fluid Science 28 (2004) 691-699
- [9] Guadalupe Ramos Caicedo, Monica Garcia Ruiz, Juan J. Prieto Marqués, Jesus Guardiola Soler, Minimum fluidization velocities for gas-solid 2D beds, Chemical Engineering and Processing 41 (2002) 761-764
- [10] A. Hepbsali, Estimation of bed expansion in a freely-bubbling three dimensional gas-fluidized bed, Int. J. Energy Res., 22, 1365-1380 (1998)
- [11] A. Delebarre, J-M. Morales, L. Ramos, Influence of the bed mass on its fluidization characteristics, Chemical Engineering Journal 98 (2004) 81-88
- [12] A.J. Croxford, M.A. Gilberston, Control of the state of a bubbling fluidized bed, Chemical Engineering Science 61 (2006) 6302-6315

\* Anthony Goncalves  
Adresse électronique : [anthony.goncalves@nexxenergie.com](mailto:anthony.goncalves@nexxenergie.com)