

Anthony GONCALVES^{1,2}
 M.I FARINAS¹
 Laszlo KISS¹
 Daniel ROUSSE²

¹ GRIPS, université du Québec
 à Chicoutimi, Chicoutimi,
 Québec, Canada

² t3e, école de technologie
 supérieure de Montréal,
 Montréal, Québec, Canada

* anthony@t3e.info

PROCÉDÉ DE CONTRÔLE DE LA TEMPÉRATURE D'UN SYSTÈME DE COMBUSTION À LIT FLUIDISÉ

Résumé : Le but de cet article est de discuter du contrôle de la température d'un système de combustion à lit fluidisé bouillonnant (BFBC) pour la combustion de l'écorce dans une centrale de cogénération de 6 MW. La température du lit est un paramètre important dans le contrôle des BFBC. Cependant, pendant la période estivale, l'humidité du combustible diminue. Conséquemment la température du lit dépasse le point de consigne critique (point de fusion des cendres, eutectique et dégâts matériels) pendant le fonctionnement normal. Habituellement, ces systèmes sont conçus avec un échangeur thermique dans le lit fluidisé pour l'extraction de la chaleur. Ces échangeurs améliorent le contrôle de la température du lit et la maintiennent sous les valeurs critiques. Dans le cas où il n'y a pas d'échangeur interne, le contrôle de la température doit être fait avec un ratio d'air (primaire / secondaire) et le débit de combustible. On propose ici une étude sur le système de contrôle de la centrale thermique, l'analyse des données et des solutions pour le contrôle thermique sont aussi discutés.

Mots clés : biomasse, transfert thermique, contrôle, combustion

Nomenclature

A surface, m ²	c convection
C_p chaleur spécifique, kJkg ⁻¹ K ⁻¹	e ébullition
GCV pouvoir calorifique, kJ/kg	t total
h enthalpie, kJ/kg	f flamme
h coefficient d'échange thermique, kWm ⁻² K ⁻¹	r radiation
m débit, kg/s	g gaz
T température, °C	w mur
R résistance thermique, m ² KW ⁻¹	i entrée
Indices / Exposants	n itération
a adiabatique	o sortie
b biomasse	s vapeur

1. Introduction

Le niveau toujours croissant d'émissions de gaz à effet de serre combiné à la hausse globale des prix du carburant sont les principales raisons derrière les efforts consentis pour améliorer l'utilisation des différentes sources d'énergie. Les économistes, les scientifiques et les ingénieurs du monde entier sont à la recherche: (1) de stratégies visant à réduire la demande; (2) de méthodes pour assurer la sécurité des approvisionnements; (3) de technologies pour accroître l'efficacité énergétique des systèmes, et (4) de nouvelles sources renouvelables d'énergie pour remplacer les combustibles fossiles limités et nuisibles.

Aujourd'hui, la biomasse reçoit un intérêt croissant pour la production d'énergie, car cette source d'énergie renouvelable réduit la demande de combustibles fossiles, diversifie les sources d'énergie traditionnelles, permet un approvisionnement local et est neutre en carbone.

Les lits fluidisés sont utilisés dans plusieurs applications industrielles telles que l'industrie de transformation des minerais et aussi dans la combustion. Les chaudières impliquant une telle technologie sont généralement plus efficaces que leurs homologues avec des grilles fixes ou mobiles et c'est pourquoi la combustion en lit fluidisé (*bubbling fluidized bed combustion*, BFBC) est souvent choisie pour transformer les déchets en énergie. Une combustion efficace des combustibles à faible pouvoir calorifique est possible avec des contrôles appropriés: selon Oka [1], l'efficacité pourrait atteindre 99 % dans certains cas. Par ailleurs, la combustion en lit fluidisé de résidus solides est aussi intéressante pour la génération de vapeur, car elle permet de limiter les variations de régime jusqu'à 4 % par minute [2].

La température du lit, qui influence la stabilité de combustion, l'efficacité des chaudières et le taux d'émission de polluants [3-6], est l'un des paramètres les plus importants dans le fonctionnement de ce type de système. Dans plusieurs systèmes, le contrôle de la température se fait à l'aide d'un échangeur de chaleur intégré au lit fluidisé. Cependant, dans le cas du système décrit ici, cet

échangeur est absent. Par conséquent, une stratégie alternative de contrôle de la température doit être utilisée. Cette dernière pourrait ainsi être faite en régulant les conditions substœchiométriques dans le lit ou par refroidissement avec un excès d'air important.

2. Vue d'ensemble de la centrale

La taille de l'unité décrite ici correspond à la demande de chauffage d'une usine de poudre de lactosérum. La chaudière fournit 10 t/h de vapeur à 32 bars et 315 °C à un turbogénérateur à 1 MWe et aussi au procédé de lactosérum. La conception de l'usine de cogénération 6 MWth (figure 1) est optimisée pour la combustion d'écorce avec un taux d'humidité de 50 % à 55 %. La chaudière utilise des tubes d'eau et a été initialement conçue pour un système de grilles fixes. Par conséquent, la section de la chambre de combustion était fixée lors de la conception du lit fluidisé. Et donc, à son tour, la vitesse de fonctionnement nominale de l'unité de fluidisation est déterminée.

2.1 Conception de la grille de fluidisation

La grille de fluidisation et les buses (figure 2) ont été conçues, testées et validées [7]. La surface du lit fluidisé est d'environ 2,3 m×2 m de large et 0,3 m de hauteur. La vitesse de fluidisation est approximativement de 1,5 m/s. L'injection d'air primaire est assurée par un ventilateur de 75 kW, fournissant une pression 1,27 m de colonne d'eau dans des conditions normales d'exploitation, tandis que l'air secondaire est fourni par un ventilateur de 30 kW avec 0,38 m de colonne d'eau. La chute de pression totale au travers du lit est composée de la résistance proportionnelle à la hauteur du lit de sable (poids du lit de sable) plus la chute de pression dans les buses d'air [8-10]. Afin de mesurer la chute de pression réelle, des tests expérimentaux ont été effectués sur les buses.

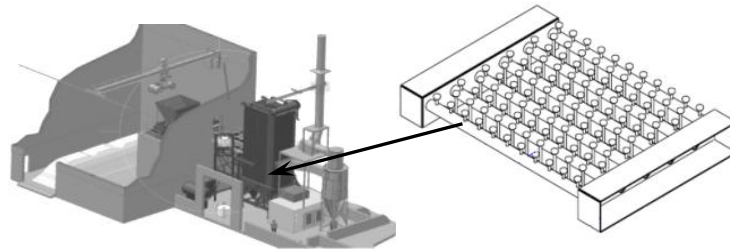


Figure 1 : Vue de la centrale, Figure 2 : Grille de fluidisation

Une bonne conception de grille de fluidisation implique une distribution homogène de l'air ainsi que l'interaction des jets entre eux doit être évitée [11]. Ceci nécessite un compromis bien équilibré entre la vitesse de l'air, les paramètres de la buse, et la puissance du ventilateur. La taille des buses, le nombre et le diamètre des trous ainsi que la vitesse de l'air doivent être déterminés afin d'assurer les conditions optimales pour la combustion et la fluidisation. En outre, la hauteur du lit et la chute de pression correspondante sont des paramètres importants pour la conception du lit [12,13]. La conception de la grille de fluidisation (figure 2) est basée sur la modélisation mathématique et expérimentale. Le logiciel Ergun [14], spécialement développé pour la conception des réacteurs à lit fluidisé, a été utilisé. Ce logiciel ne fournit pas de buses spécifiques comme résultat, mais permet de déterminer la corrélation entre le nombre de trous d'injection d'air, de diamètres, vitesses minimales de fluidisation nécessaire, et la vitesse de l'air à la section de sortie des buses [15,16]. Suivant les principes susmentionnés, de la grille sélectionnée est composée de 130 buses chacune avec 6 trous d'injection d'air et la hauteur du lit est approximativement 0,3 m (figure 2).

2.2 Modèle thermique

La simulation de l'équilibre thermique du générateur de vapeur et le lit fluidisé a été réalisée dans un code spécialement développé par notre groupe pour cette application. Le code utilise une base de données qui contient les paramètres thermophysiques (densité, viscosité, etc.) de l'eau, de gaz, et de sable pour chaque température calculée. La composition chimique des gaz de combustion est également présente dans la base de données. Le bilan énergétique simplifié global du système est donné par l'équation 1.

$$GCV \cdot m_b = m_g C_{p_g} (T_f - T_{g,o}) + m_s (h_{s,o} - h_{s,i}) + \text{Pertes} \quad (1)$$

Les pertes d'énergie sont les pertes par parois et par la cheminée. L'utilisation du pouvoir calorifique inférieur (PCI) doit tenir compte de l'humidité du combustible. Le bilan énergétique est calculé dans

chaque partie de la chaudière (figure 3) (chaque partie est subdivisée en 8 sections) et donné par l'équation 2.

$$m_g C P_g (T_n - T_{n+1}) = h_t A_n \left(\frac{T_n + T_{n+1}}{2} - T_{s,w} \right) \quad (2)$$

Le coefficient de transfert thermique total h_t est donné par l'équation 3.

$$h_t = \frac{1}{h_c} + R_w + \frac{1}{(h_c + h_r)} \quad (3)$$

R_w est la résistance de conduction à travers le mur (certains murs sont faits de béton réfractaire), h_c est la résistance de convection sur le côté gaz (calcul à la température moyenne entre les tubes et le gaz) et h_r est le rayonnement des gaz de combustion (CO_2 et H_2O) sur le tube en utilisant la méthode Hottel et al [18].

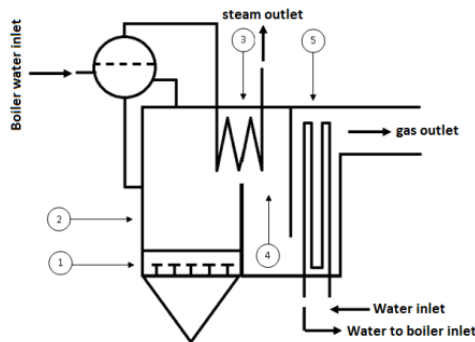


Figure 3 : Schéma du générateur

Dans l'équation 3, les températures sont inconnues. La température dans la chambre de combustion et la température des fumées à la sortie doivent être déterminées. Dans ce code, la proportion de la combustion qui a lieu dans le lit et sur le lit n'est pas prise en compte puisque la simulation suppose que toute la combustion a lieu dans le lit. Ainsi, la température de combustion en lit fluidisé doit être estimée avec la température de flamme adiabatique pour la première itération est donnée par l'équation 4.

$$m_{air} h_{air} + m_b h_b + m_b GCV = m_g C P_g (T_a - T_{ref}) \quad (4)$$

La température de référence T_{ref} est de 25 °C. Les résultats fournis par le simulateur sont présentés dans la Figure 4. La courbe supérieure (triangle) est la variation de température par rapport au débit de vapeur pour une humidité de la biomasse de 40 % tandis que la courbe inférieure (diamant) est pour un combustible de 55 % d'humidité. Comme prévu, le résultat de la simulation (figure 4) montre que les combustibles humides diminuent la température du lit pour un fonctionnement similaire (débit de vapeur). La chaleur latente d'évaporation consomme une partie de l'énergie de combustion (absorption) et entraîne une diminution proportionnelle de la température du lit.

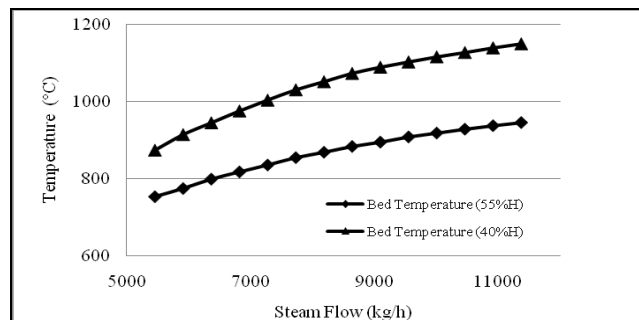


Figure 4 : Température du lit en fonction du débit de vapeur

3. Investigation

La centrale thermique a été utilisée pendant 1 an et demi au moment de la rédaction de cet article. En été, le contrôle de la température du lit de sable est problématique, puisque les copeaux d'écorce sont trop secs par rapport aux critères de conception originale d'humidité (50 % à 55 %). Par exemple, pendant les essais présentés ici, l'humidité de la biomasse est approximativement de 40 %. S'il n'y a pas assez d'eau à évaporer, la température atteint des valeurs trop élevées dans la chaudière. Étant donné qu'il n'y a pas d'échangeur interne, le contrôle de la température doit être réalisé avec le ratio d'air primaire et secondaire et le débit de carburant.

Cette approche alternative de contrôle de température a été expérimentée pendant une semaine. Pendant les tests, un système d'acquisition de données a enregistré les paramètres toutes les 30 secondes sur 10 canaux différents. Nous avons enregistré les paramètres suivants: température du lit (3 thermocouples), le taux d'air primaire, taux d'air secondaire, diamètres des particules, le débit de vapeur, et le niveau de cendres dans le système d'élimination. Ces paramètres ont été analysés pour comprendre leurs influences respectives et conjointes sur la fluctuation de la température du lit.

4. Résultats et discussion

Deux stratégies différentes pour le contrôle de la température du lit ont été utilisées. Le premier (figure 5) maintient le lit à la condition substœchiométrique en diminuant le débit d'air du ventilateur primaire. Cette méthode diminue le taux de combustion qui a lieu dans le lit. Sur la figure 6, la température moyenne est de 861 °C, mais elle oscille autour de cette valeur. Ainsi, la température du lit augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la température critique (920 °C) autorisée par le système. Puis, une protection de sécurité du contrôleur arrête le débit de biomasse, et le ventilateur d'air primaire refroidit le lit jusqu'à une température acceptable soit atteinte. Ce mécanisme explique la fluctuation périodique de la figure 5. Comme prévu, le débit d'oxygène suit la même fluctuation. Il diminue lors de la combustion ainsi que la température du lit, puis avec le redémarrage de l'alimentation en combustible à un taux nominal et le comportement inverse est observé.

La deuxième méthode (figure 6) augmente le flux d'air primaire du ventilateur et extrait l'excès de chaleur. Dans la figure 6, la température du lit moyen était de 860 °C. La vitesse du ventilateur d'air primaire a été augmentée à chaque taux de combustion pour le refroidissement de lit. L'état de fluidisation n'a pas été respecté en raison d'un changement de paramètres. La vitesse de fluidisation augmente, mais la grille de fluidisation n'est pas optimisée pour ce débit d'air. On observe alors une transition du régime bouillonnant vers le régime turbulent. Par conséquent, l'efficacité de la combustion de la biomasse diminue en raison d'un haut ratio air/carburant [18] et la qualité des gaz de combustion se dégrade également en raison d'une teneur élevée en particules fines. Le système de filtration alors est surchargé et de la fumée brune apparaît dans les gaz de combustion. Par conséquent, le niveau des cendres dans le système d'élimination augmente. La limite d'application de cette méthode provient de la vitesse terminale des particules, c-a-d la vitesse d'air à laquelle les particules quittent le foyer avec les fumées.

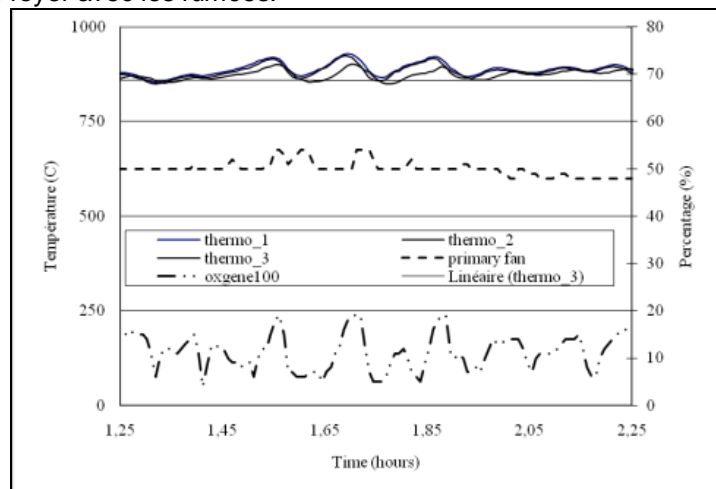


Figure 5 : Résultat en condition substœchiométrique

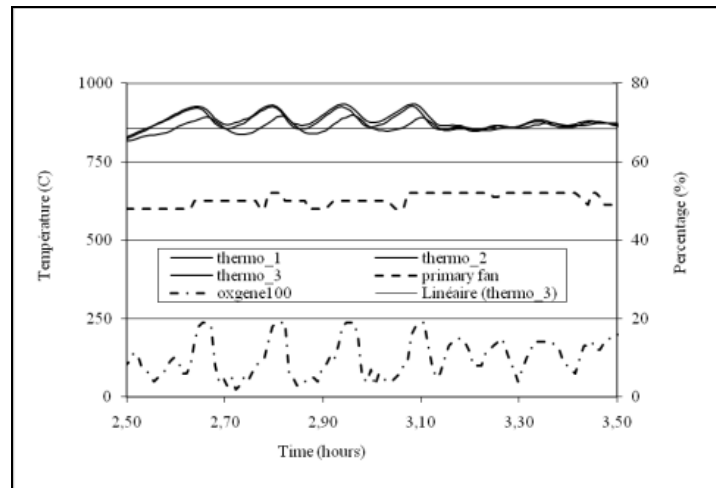


Figure 6 : Résultat en condition turbulente

Dans la figure 6, les oscillations du système sont produites par le contrôleur de processus de combustion. Lorsque la température augmente et atteint la valeur critique, le système s'arrête automatiquement, l'alimentation en biomasse est stoppée, jusqu'à ce que la température du lit diminue à sa valeur nominale. Pour les résultats présentés dans la figure 6, le combustible est le même qu'à la figure 5 (40 %RH). Une fois le débit d'air augmenté jusqu'à la fluidisation turbulente, le seul paramètre en mesure de changer la température du lit est le débit de carburant, qui a un lien direct avec le taux de production de vapeur en terme d'équilibre thermique. Lorsque le débit de carburant diminue, le débit de vapeur n'est pas respecté et la puissance de sortie du système diminue. Une fois la température de fonctionnement rétablie, le débit de carburant reprend à la puissance désirée.

Avec les deux stratégies de contrôle, nous avons tout de même observé des périodes stables entre les périodes de fluctuations qui suggèrent que des conditions d'exploitation en régime permanent sont possibles avec ces stratégies de contrôle dans la mesure où elles seraient optimisées. . En outre, une étude plus approfondie doit être faite sur l'ajustement de la hauteur du lit. En effet, l'augmentation de la chute de pression causée par l'élévation de la hauteur du lit pourrait permettre d'accroître la vitesse de fluidisation avant l'apparition des turbulences dans le lit fluidisé.

5. Conclusion

Le contrôle de la température d'un BFBC, sans échangeur de chaleur interne a été étudié dans une centrale thermique de 6 MW à la biomasse avec un taux d'humidité et un pouvoir calorifique variable. Lorsque ces caractéristiques se situent en dehors des critères de conception, la température d'équilibre du lit peut être déplacée en dehors de la plage souhaitée et doit être contrôlée en conséquence. Deux stratégies de contrôle ont été étudiées: la première maintient le lit aux conditions substœchiométrique en diminuant le débit d'air du ventilateur principal, la seconde est d'augmenter le débit du ventilateur d'air primaire pour extraire l'excès de chaleur.

On a constaté que le maintien du lit dans des conditions substœchiométrique n'offre pas une amélioration significative. D'autre part, le refroidissement du lit avec le ventilateur d'air primaire est limité par la limite régime de fluidisation. En faite, ces deux méthodes ont été jugées insuffisantes pour les grandes variations de la teneur en humidité dans le combustible. La quantité de chaleur dans le lit est difficile d'extraire sans échangeur de chaleur interne.

Sinon, la solution classique pour un réacteur à lit fluidisé sans échangeur interne est de s'assurer que le combustible respecte les critères de conception (contrôle de l'humidité dans la salle de stockage) toute l'année. Alternativement, une autre stratégie de contrôle (que nous n'avons pas encore essayé) serait de contrôler la hauteur du lit.

Un BFBC sans échangeur de chaleur interne est conçu pour un combustible particulier. Cependant, aujourd'hui, une centrale électrique utilisant une technologie de combustion telle que la fluidisation doit être capable de brûler une grande variété de résidus entrants et garder la haute efficacité de combustion, tout en restant écologique. Le développement des techniques de contrôle de la température répond à cette exigence, et c'est ce que nous étudions actuellement.

7. 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] 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
- [4] D.L. KRAFT, Bubbling Fluid Boiler Emissions Firing Bark & Sludge, TAPPI Engineering Conference, 1998
- [5] G.F. GILMAN, Boiler Control Systems Engineering, 2005
- [6] F. SCALA, R. CHIRONE, Fluidized bed combustion of alternative solid fuels, Experimental thermal and Fluid Science 28 (2004) 691-699
- [7] A. GONCALVES, L. KISS, M.I. FARINAS, D. ROUSSE A bubbling fluidized bed combustion system for forest residues, Proc. WREC 2011, Linkoping, 2011
- [8] D. GELDART, Large particle fluidisation, John Wiley & Son. 1973
- [9] K. SHAKOURZADEH, Calcul des réacteurs à lis fluidisés, Technique de l'ingénieur, J4100-2
- [10] K. SHAKOURZADEH, Techniques de fluidisation, Technique de l'ingénieur, J 3 390
- [11] J.M.D. MERRY, Penetration of a horizontal gas jet into a fluidised bed, Trans. Inst. Chem. Eng., 49, 189, 1971
- [12] A. HEPSALI, Estimation of bed expansion in a freely-bubbling three dimensional gas-fluidized bed, Int. J. Energy Res., 22, 1365-1380 (1998)
- [13] A. DELABARRE, J-M. MORALES, L. RAMOS, Influence of the bed mass on its fluidization characteristics, Chemical Engineering Journal 98 (2004) 81-88
- [14] K. SHAKOURZADEH, Ergun, University of Compiègne (UTC), Paris, France.
- [15] G. R. CAICEDO, M. G. Ruiz, J. P. MARQUES, J. G. SOLER, Minimum fluidization velocities for gas-solid 2D beds, Chemical Engineering and Processing 41 (2002) 761-764
- [16] C.Y. WEN and C.H. YU, Generalized method for predicting the minimum fluidisation velocity, AIChEJ, 12, 612, 1966
- [17] Y. A. CENGEL, Heat and Mass Transfer, 3^{ième} édition
- [18] P. BASU, C. KEFA, and L. JESTIN, *Boilers and Burners Design and Theory*, Springer, New-York, 2000