



COFRET'16-REF: S5-007

# MODELISATION 0D ET CARACTERISATION EXPERIMENTALE D'UNE CHAUDIERE BIOMASSE

*\*Fateh MAMERI<sup>a</sup>, Eric DELACOURT<sup>a</sup>, Marc LIPPERT<sup>a</sup>, Céline MORIN<sup>a</sup>*

<sup>a</sup>LAMIH CNRS UMR 8201, UVHC, Le Mont Houy, F-59313 Valenciennes cedex 9. France

[\\*Auteur correspondant : fateh.mameri@univ-valenciennes.fr](mailto:fateh.mameri@univ-valenciennes.fr)

## RESUME

Le papier présente une étude expérimentale et la modélisation 0D du comportement dynamique d'une chaudière biomasse basée sur le formalisme Bond Graph. La chaudière biomasse utilisée dans cette étude est une chaudière automatique à pellets d'une puissance calorifique nominale de 30 kW avec un lit fixe. La compréhension du comportement dynamique de cette dernière pendant les phases de fonctionnement nous permettra de mieux évaluer ses performances énergétiques et une meilleure adaptation à une machine thermodynamique dans le cas d'une cogénération. Une modélisation 0D en Bond Graph a été réalisée pour quantifier les transferts d'énergie entre les différentes zones en partant du foyer de combustion vers la cheminée. Les résultats de cette modélisation sont confrontés aux mesures expérimentales réalisées sur la chaudière.

**Mots-clés:** chaudière, échangeur de chaleur, biomasse, modélisation 0D, Bond Graph.

## 1. INTRODUCTION

Bien que la biomasse ait un PCI inférieur à celui d'autres combustibles, tels que les hydrocarbures ou le charbon, dû à la teneur élevée en humidité et au taux d'oxygène important, cette source d'énergie reste plus propre avec d'importantes réserves [1]. La biomasse peut être valorisée pour la production simultanée de chaleur et d'électricité.

Dans la conversion thermique de la biomasse, il existe de multiples processus physiques et chimiques impliqués. Ainsi, une connaissance approfondie de ces derniers pourrait améliorer les applications industrielles et domestiques où la combustion de la biomasse est nécessaire, comme les fours, les chaudières et les brûleurs industriels [2].

Dans ce travail nous avons établi un modèle 0D afin de caractériser l'ensemble des flux de chaleur entre les sous-systèmes constituant la chaudière et prédire son comportement en fonction de la variation de la charge.

Le formalisme Bond Graph a été initié par Paynter en 1959 [3]. Cet outil permet de simuler et de modéliser le comportement des systèmes dynamiques. C'est un outil pluridisciplinaire. Ainsi, des procédés dans plusieurs domaines (thermique, chimique [4-5], hydraulique [6], électrique, mécanique [7]) peuvent être modélisés séparément ou couplés. Les systèmes avec transferts de masse et d'énergie, comme dans notre cas, sont plus complexes dans leur modélisation [8], compte tenu des débits masse et des flux d'enthalpie instantanés. Cet outil permet de



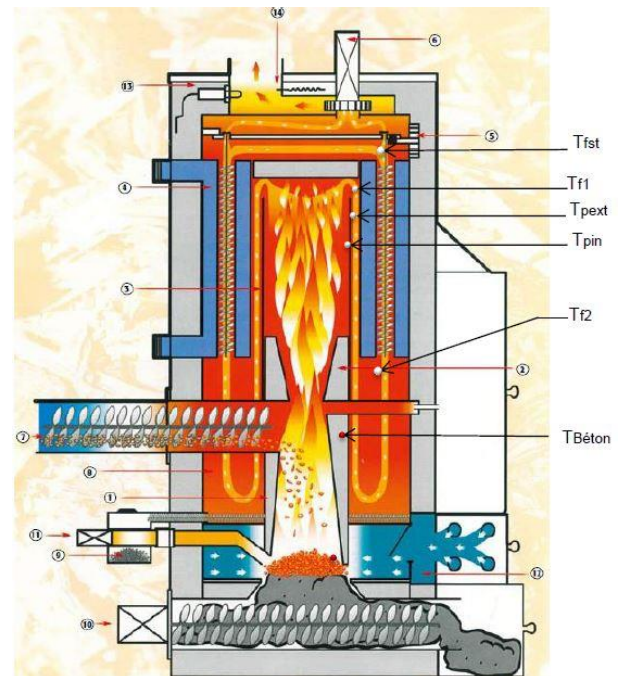
répondre aux besoins en termes de modélisation en offrant un modèle paramétré avec un langage unifié qui interprète les transferts d'énergie au sein du système considéré de manière explicite grâce à sa structure graphique.

Dans ce papier nous décrivons la chaudière et les différents capteurs qui ont permis la mesure de températures et débits. Puis, l'évolution des températures des fumées dans la chambre de combustion est présentée. Le modèle OD de la chaudière est détaillé et une comparaison entre résultats issus de ce modèle et ceux obtenus par l'étude expérimentale est réalisée.

## 2. DESCRIPTION DE LA CHAUDIERE

La présente étude est axée sur une chaudière domestique automatique à pellets de bois d'une puissance de 30 kW (voir Fig. 1), équipée d'un échangeur de chaleur eau-gaz incorporé qui a un double rôle : le refroidissement de la chaudière et la récupération de l'énergie thermique par le fluide de travail. La circulation d'eau dans le circuit hydraulique est assurée par une pompe qui veille à ce que la chaudière atteigne rapidement sa température de consigne  $T_c$  de 80°C. L'introduction des pellets dans le foyer de la chaudière se fait par une vis sans fin. Elle se fait de manière cyclique tant que la température de l'eau de sortie est inférieure à la température de consigne. Lorsque la consigne est atteinte, l'alimentation s'arrête. L'air primaire arrive par les trappes situées dans la partie inférieure de la chaudière et sa circulation est assurée par un ventilateur d'extraction monté sur le capot supérieur de la chaudière dont la vitesse de rotation est réglée par une sonde lambda située dans le tube d'échappement à la sortie de la chaudière. Pour dissiper l'énergie thermique du fluide de travail, le circuit hydraulique est relié à deux aérothermes situés à l'extérieur de la cellule d'essai.

Afin de pouvoir réaliser une caractérisation expérimentale de la chaudière plusieurs capteurs ont été installés à différents endroits dans la chaudière. La température de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'échangeur eau – gaz brûlés est enregistrée par deux sondes platine Pt100 d'un diamètre de 3 mm (incertitude de 0,8°C à 100°C). Un débitmètre électromagnétique, d'une plage d'utilisation allant de 20 à 500 dm<sup>3</sup>/h avec une incertitude de 0,5%, mesure le débit d'eau circulant dans l'échangeur de la chaudière.



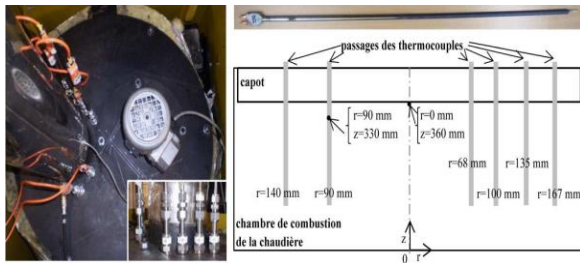
**Fig.1.** Positions des thermocouples au niveau de la chaudière.

(1) Brûleur. (2) Tuyère. (3) Pot de combustion. (4) Corps de chauffe. (5) Tabulateurs. (6) Extraction de fumées. (7) Vis d'alimentation du brûleur. (8) Chambre de décantation. (9) Dépoussiérage automatique de l'échangeur. (10) Décendrage automatique du foyer. (11) Allumage automatique. (12) Entrée d'air. (13) Sonde Lambda. (14) Sonde de fumées.

Le débit des fumées est fourni par un débitmètre de type aile Pitot (précision de 3 à 5%). Dans le même conduit, en sortie de chaudière, a été placé un thermocouple type K (platine-10% rhodium / platine) constitué de fils de diamètre 0,2 mm (incertitude de 0,25% de la mesure) pour mesurer la température des fumées.



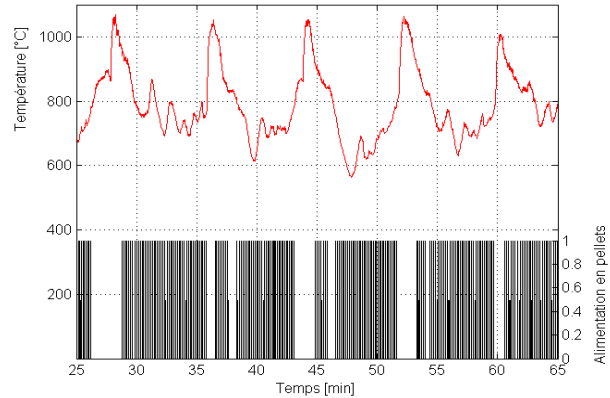
La chambre de combustion est équipée de plusieurs thermocouples pour la mesure des températures à des endroits ciblés. Six thermocouples de type S (incertitude de 0,25%), constitués de fils de diamètres 0,13 et 0,2 mm, sont installés à différentes positions radiales (à partir du centre : 68 mm, 90 mm, 100 mm, 135 mm, 140 mm, 167 mm) et à différentes positions verticales grâce à un système de raccords coulissants situé sur le capot de la chaudière (voir Fig. 2).



**Fig.2.** Positions des thermocouples dans la chambre de combustion

D'autres thermocouples de type K (incertitude de 0,75%) sont placés dans le béton réfractaire du foyer de la chaudière ( $T_{\text{Béton}}$ ), au premier et au deuxième passage des fumées ( $T_{f1}$  et  $T_{f2}$ ). Deux thermocouples de type K sont également soudés de part et d'autre de la paroi du pot de combustion ( $T_{\text{pext}}$  et  $T_{\text{pin}}$ ). Un dernier thermocouple est placé à la sortie des tubes des fumées de l'échangeur ( $T_{\text{fst}}$ ) (voir Fig.1).

La Figure 3 présente la température des gaz brûlés dans la chambre de combustion mesurée par le thermocouple inséré dans l'axe de la chaudière ( $r=0$ ,  $z=360\text{mm}$  (voir Fig.2)) ainsi que les cycles de fonctionnement de la vis d'alimentation. L'arrêt d'apport de pellets induit une chute de la température des gaz brûlés dans la chambre de combustion avec un décalage temporaire de 2 à 3 minutes en moyenne ce qui définit les cycles thermiques de la chaudière. L'arrêt prolongé de la vis des pellets est dû à la température d'eau à la sortie qui a atteint la température de consigne ( $80^\circ\text{C}$ ), elle se remet en marche dès que cette dernière est inférieure à  $80^\circ\text{C}$ .



**Fig.3.** Température des gaz brûlés dans la chambre de combustion ( $r=0$ ,  $z=360\text{mm}$ ) et alimentation en pellets sur des cycles de fonctionnement de la chaudière.

### 3. MODELISATION 0D BOND GRAPH

Le modèle dynamique de la chaudière est représenté sur la Figure 4, englobant l'ensemble des zones qui constituent le système étudié, à savoir : le foyer, le pot de combustion (chambre de combustion), le passage entre le pot de combustion et la paroi interne de l'échangeur eau-gaz brûlés et les tubes des fumées se trouvant dans l'échangeur.

Le modèle se compose de deux types de systèmes d'énergie : le système hydraulique du cycle d'eau et des fumées et le système thermique du cycle des fumées. Les différents éléments sont introduits ci-dessous.

Dans cette première approche, nous introduisons la température des fumées mesurée dans le foyer de combustion de la chaudière (brûleur) qui nous provient d'un fichier de mesures échantillonnées à une fréquence de 5 Hz comme condition limite temporelle d'entrée (élément  $Se$  du système thermique sur la Figure 4). Pour le système hydraulique, nous renseignons le débit massique des fumées qui est considéré constant, tel que  $q_{m\_fumées} = 0.0222 \text{ kg/s}$  (élément  $Sf$  du système hydraulique sur la Figure 4)). L'échangeur de chaleur eau-gaz brûlés est également modélisé en renseignant le débit d'eau comme condition limite



d'entrée, tel que  $q_{m\_eau} = 0,5 \text{ kg/s}$  (élément Sf1 sur le schéma Bond Graph de la Figure 4).

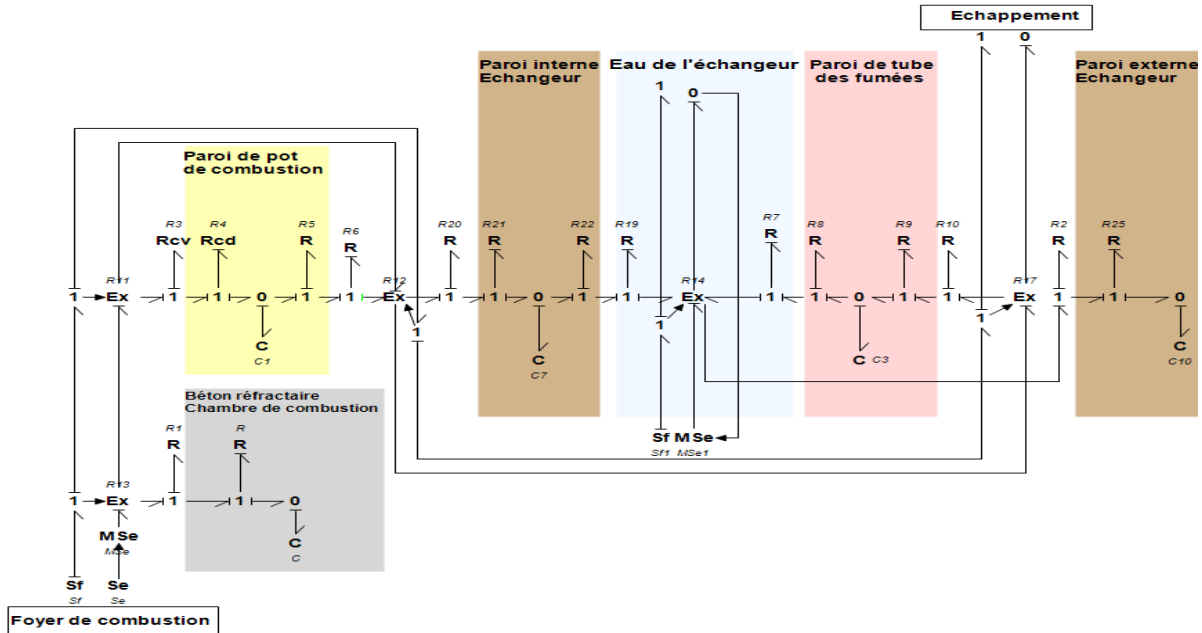


Fig.4. Schéma Bond Graph

Afin de caractériser les différents échanges d'énergie et de matière entre les fluides de travail et les parois des zones constituant la chaudière, nous définissons des variables d'effort et de flux dont le produit correspond à une puissance transmise. Concernant les variables de transfert hydraulique, la pression  $P$  constitue l'effort et le débit massique  $q_m$ , le flux (voir Fig. 5). Pour les transferts thermiques, le flux d'enthalpie  $\dot{H}$  ou le flux de chaleur  $\dot{Q}$  sont utilisés comme variables de flux. La température est utilisée comme variable d'effort [9]. Il s'agit ici d'un pseudo Bond Graph, le produit effort flux n'est pas complètement homogène à une puissance mais il est comparatif.



Fig.5. Liaisons type d'un graphe de liaisons

Le couplage de deux processus thermique et hydraulique est assuré par l'élément noté Ex ( $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{17}$ ) (voir Fig. 4). Cet élément quantifie en particulier le flux d'enthalpie acquis ou perdu par le fluide lors d'un échange avec la paroi à chaque instant  $t$ . Il permet également de calculer la

température des fumées en sortie à partir d'un bilan de flux. Si nous prenons l'exemple de Ex ( $R_{12}$ ) se trouvant entre le pot de combustion et la paroi interne de l'échangeur (voir Fig. 6), le système d'équation est décrit ci-dessous.

En entrée :

$$\dot{H}_{\text{entrée\_fumées}}(t) = q_{m\_fumée} \times c_{p\_fumées} \times T_{\text{entrée\_fumées}}(t) \quad (1)$$

$$T_{\text{Péch}}(t) = T_{\text{entrée\_fumées}}(t) \quad (2)$$

$$T_{\text{Ppot}}(t) = T_{\text{entrée\_fumées}}(t) \quad (3)$$

$$\dot{H}_{\text{sortie\_fumées}}(t) = \dot{H}_{\text{entrée\_fumées}}(t) + \dot{Q}_{\text{Pot}}(t) - \dot{Q}_{\text{Péch}}(t) \quad (4)$$

En sortie :

$$T_{\text{sortie\_fumée}}(t) = \frac{\dot{H}_{\text{sortie\_fumées}}(t)}{q_{m\_fumées} \times c_{p\_fumées}} \quad (5)$$

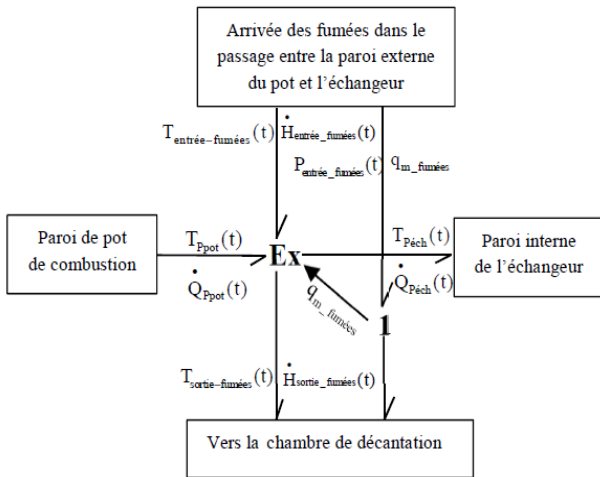
On affecte la température d'entrée  $T_{\text{entrée\_fumées}}$  à chaque instant  $t$  aux parois de l'échangeur et du pot de combustion notées respectivement:  $T_{\text{Péch}}(t)$  et  $T_{\text{Ppot}}(t)$  telle que:



$$T_{Péch}(t) = T_{Ppot}(t) = T_{entrée\_fumées}(t)$$

La température de sortie des fumées est alors calculée à partir de l'équation 5.

**Fig.6.** Élément Ex (R12)



Le stockage et/ou le déstockage de l'énergie thermique au niveau des parois dans les différentes zones de la chaudière (béton réfractaire, paroi de pot de combustion et parois de l'échangeur) sont représentés par le élément C ( $C, C_1, C_7, C_3, C_{10}$ )(voir Fig.4). La loi générique qui le caractérise est :

$$\dot{Q} = m \times c_p \times \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

Ce qui permet de calculer la température par la relation suivante :

$$T = \frac{1}{m \times c_p} \int \dot{Q} dt \quad (7)$$

Où m et  $c_p$  sont, respectivement, la masse et la chaleur spécifique de la paroi considérée.

La dissipation du flux de chaleur par conduction, rayonnement et convection est représentée par les éléments R (voir Fig.4).

La relation constitutive de l'élément R ( $R, R_1, R_2, \dots, R_{24}, R_{25}$ ) qui donne le flux de chaleur s'exprime comme suit :

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{r} \quad (8)$$

Avec r la résistance thermique [ $K.W^{-1}$ ]. Pour un échange par conduction dans un cylindre :

$$r = \frac{\ln(r_{out}/r_{in})}{2\pi\lambda H} \quad (9)$$

Pour un échange par convection :

$$r = \frac{1}{hS} \quad (10)$$

Avec h le coefficient d'échange thermique par convection.

Les coefficients d'échanges de chaleur par convection pour les différentes configurations géométriques se trouvant au niveau de la chaudière sont déduits de corrélations semi-empiriques de la littérature [10-11].

Dans l'estimation des coefficients d'échange par convection, certaines hypothèses ont été adoptées :

- Les densités de flux surfaciques sont constantes le long de la surface.
- Seules les températures moyennes des fumées durant la phase de régulation sont considérées. Les températures sont moyennées temporellement puis spatialement dans les différentes zones de la chaudière.
- La pression des gaz dans la chaudière est supposée constante et très proche de la pression atmosphérique.
- Les parois externes de la chaudière sont considérées adiabatiques (pas d'échanges de chaleur avec le milieu environnant).

Le tableau ci-dessous liste les caractéristiques des différentes zones de la chaudière et regroupe les coefficients  $h_m$  des échanges convectifs calculés à une température moyenne.



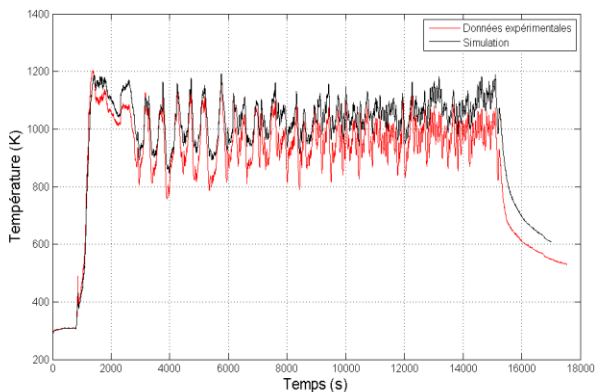
**Tableau.1** Récapitulatif des grandeurs utilisées

Zone	$r_{int}$ [m]	$r_{ext}$ [m]	H [m]	Dh [m]	Surface d'échan- ge [m <sup>2</sup> ]	V [m/s] ]	$\rho$ fumées [kg/s]	$\mu$ fumées [Pa.s]	Re	$\lambda$ fumées [W/m.K]	$c_p$ fumées [J/kg.K]	Pr	$h_m$ [W/m <sup>2</sup> . K]
Béton réfractaire	0,0975	0,179	0,45	0,19 5	0,275	8,53	0,1993	5,93E-05	2796,8	0,068	1649	1,45	62,73
Intérieur pot de combustion	0,1777	0,179	0,32	0,35 5	0,357	6,58	0,2585	4,29E-05	7051,8	0,058	1673	1,24	42,87
Passage autour du pot	0,1799	0,2008	0,5	0,08 3	0,0655	3,43	0,495	3,22E-05	4408,5	0,037	1199	1,04	8,509
Intérieur tubes échangeur	0,0266	0,0302	0,5	0,05 3	0,0834	0,01 6	0,608	3,65E-05	14,127	0,026	1174	1,64	15,43
Eau - paroi échangeur	0,2048	0,298	0,5	0,27 3		0,01 1	980,6	0,00055	5392,2	0,663	4184	3,47	167,74
Autour des tubes	0,0266	0,0302	0,5	0,15 7	0,0947	0,01 1	981	0,000467	1380,7	0,021	1916	42,4	23,91

#### 4. RESULTATS ET DISCUSSION

Nous nous sommes particulièrement intéressés au suivi, en régime dynamique, de la température des gaz brûlés au sein de la chaudière, du flux de chaleur emmagasiné par les parois et celui récupéré par le fluide de travail circulant dans l'échangeur de chaleur eau-gaz brûlés.

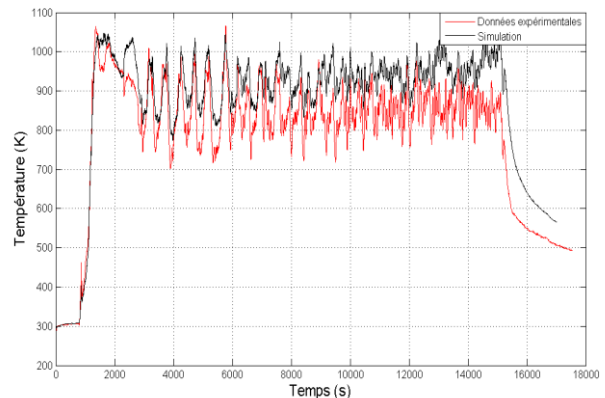
L'évolution de la température des fumées dans le pot de combustion mesurées par le thermocouple inséré au centre de la chambre de combustion est comparée à celle obtenue par le modèle 0D (voir Fig.7). L'évolution de la température des fumées calculée est proche des mesures expérimentales. Le modèle reproduit de façon satisfaisante le comportement thermique des fumées dans la chambre de combustion.



**Fig.7.** Comparaison des températures expérimentales et calculées des fumées dans le pot de combustion.

Les températures des fumées mesurées et calculées dans le passage entre le pot de combustion et la paroi interne de l'échangeur de chaleur sont présentées Figure 8)

La température obtenue par les mesures expérimentales a été estimée comme étant la moyenne entre la température des fumées dans la chambre de décantation  $T_{f2}$  et la température au premier passage des fumées entre le pot de combustion et l'échangeur eau-gaz brûlés  $T_{f1}$  (voir Fig.1).

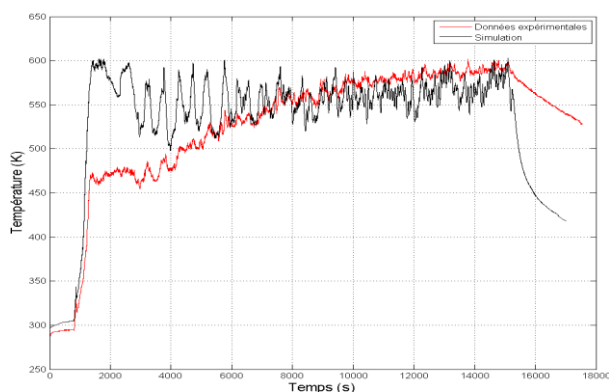


**Fig.8.** Comparaison des températures expérimentales et calculées des fumées dans le passage entre le pot de combustion et la paroi interne de l'échangeur.

Nous constatons que la simulation reproduit également de manière satisfaisante les mesures expérimentales.



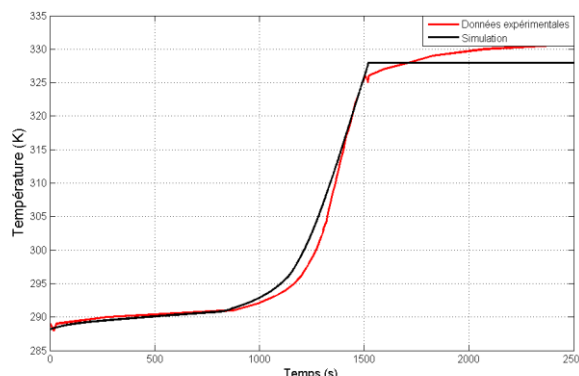
Une légère surestimation des températures obtenues par le modèle 0D est observée ce qui peut être expliqué par les valeurs des coefficients de convection déduites des corrélations qui doivent tenir compte de la complexité des configurations géométriques existantes dans la chaudière.



**Fig.9.** Comparaison des températures expérimentales et calculées des fumées à la sortie des tubes des fumées dans l'échangeur.

Les températures des fumées mesurées et calculées sont comparées également à la sortie des tubes de l'échangeur (voir Fig.9). La montée en température des fumées juste après l'amorçage de la combustion des pellets est beaucoup plus importante dans le cas de la simulation. Cet écart de température peut être dû aux erreurs pour estimer les coefficients des échanges convectifs. Par ailleurs, les propriétés thermodynamiques des fumées ont été calculées à des températures moyennes et ne tiennent pas compte des variations de la température.

La Figure 10 présente l'évolution de la température d'eau à l'entrée de l'échangeur eau-gaz brûlés durant la phase de démarrage. Les températures à l'entrée de l'échangeur fournies par le modèle 0D suivent l'évolution de celle mesurées par thermocouple à l'entrée de l'échangeur. Dans la chaudière, l'eau circule en circuit fermé tant que sa température n'a pas atteint la température de consigne. En conséquence, sa température va donc augmenter après un certain délai.



**Fig.10.** Comparaison des températures expérimentales et calculées d'eau à l'entrée de l'échangeur.

## 5. CONCLUSION

Ce papier présente une modélisation du comportement dynamique d'une chaudière biomasse en utilisant le formalisme Bond Graph validée par les résultats d'une campagne de mesures expérimentales, notamment la température des fumées dans plusieurs endroits dans la chaudière ainsi que celle de l'eau à l'entrée de l'échangeur. Un modèle dynamique 0D a été développé pour pouvoir prédire de manière fiable le comportement de la chaudière.

Nous avons constaté qu'il y a une corrélation entre la quantité de pellets apportée et l'évolution de la température des fumées dans la chambre de combustion. Des résultats satisfaisants entre mesures et calculs ont été trouvés, excepté pour les températures de fumées à la sortie des tubes de l'échangeur et la température d'eau à l'entrée de l'échangeur qui peuvent être dues au choix des corrélations pour estimer les coefficients globaux des échanges convectifs et aux propriétés des gaz brûlés calculés à des températures constantes.

Dans la suite de ce travail, une étude plus fine sera menée afin de compléter le modèle 0D en estimant au mieux les coefficients globaux d'échange convectifs en prenant en compte le fonctionnement alternatif de la vis de pellet.



## REMERCIEMENTS

Fateh Mameri bénéficie d'une bourse de doctorat financée par de l'ADEME et la Région Nord-Pas-de-Calais. Les auteurs remercient Jesse Schiffler qui a participé aux campagnes des mesures expérimentales.

## NOMENCLATURE

$T_{fst}$  : température des fumées en sortie des tubes de l'échangeur [K].

$T_{f1}$  : température au premier passage des fumées entre le pot de combustion et l'échangeur eau-gaz brûlés [K].

$T_{pext}$  : température du pot de combustion, côté extérieur [K].

$T_{pint}$  : température du pot de combustion, côté intérieur [K].

$T_{r2}$  : température des fumées dans la chambre de décantation [K].

$T_{béton}$  : température du béton réfractaire constituant le foyer de combustion [K].

$T_c$  : température de consigne [K].

$\dot{H}$  : flux d'enthalpie [W].

$\dot{Q}$  : flux de chaleur [W].

$r$  : résistance thermique [ $K \cdot W^{-1}$ ].

$\lambda$  : conductivité thermique [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ].

$r_{out}$  : rayon externe du cylindre considéré [m].

$r_{in}$  : rayon interne du cylindre considéré [m].

$C_p$  : chaleur spécifique à pression constante [ $J/kg \cdot K$ ].

$m$  : masse [kg].

$q_{m\_fumées}$  : débit massique des fumées [ $kg/s$ ].

$q_{m\_fumées}$  : débit massique d'eau à l'entrée de l'échangeur.

$\rho_{fumées}$  : masse volumique des fumées [ $kg/m^3$ ].

$V$  : vitesse [m/s].

$H$  : hauteur cylindre [m].

$S$  : surface d'échange [ $m^2$ ].

$D_h$  : diamètre hydraulique [m].

$\mu$  : viscosité dynamique [Pa.s].

$h_m$  : coefficient de convection moyen,  $h_m = \frac{Nu \times \lambda}{D}$

$Pr$  : nombre de Prandtl,  $Pr = \frac{\mu \times c_p}{\lambda}$

$Re$  : nombre de Reynolds,  $Re = \frac{\rho \times V \times D}{\mu}$

$Nu$  : nombre de Nusselt.

## REFERENCES

- [1] Demirbas A., Combustion characteristics of different biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science* **30** P.219–230, 2004
- [2] Li C., Gillum C., K. Toupin, D. Burl, Biomass boiler energy conversion system analysis with the aid of exergy-based methods. *Energy Conversion and Management* **103**, 665–673, 2015.
- [3] Paynter H. M., *Analysis and design of engineering systems: class notes for M.I.T. course 2.751*- Cambridge, Mass M.I.T. Press c1961, 1-303, 1961.
- [4] Roman M., Bobasu E., Iancu E. and Sendrescu D., On bond graph modelling of thermo-chemical processes. *Acta Montanistica Slovaca Ročník*, **15**, 33-37, 2010.
- [5] Ould-Bouamama B., El Harabia R., Abdelkrim M.N., Ben Gayed M.K., Bond graphs for the diagnosis of chemical processes, *Computers and Chemical Engineering*, **36**, 301–324, 2012.
- [6] Ould-Bouamama B., Bond graph approach as analysis tool in thermofluid model library conception, *Journal of the Franklin Institute*, **340**, 1–23. 2003.
- [7] Cauffriez L., Grondel S., Loslever P., Aubrun Ch., Bond Graph modeling for fault detection and isolation of a train door mechatronic system control, *Engineering Practice*, **49**, 212–224, 2016.
- [8] Thoma J., Ould-Bouamama B., *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering*, Springer- Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2000.
- [9] Medjaher K., Samantaray A.K., Ould-Bouamama B., Bond Graph Model of A Vertical U-Tube Steam Condenser Coupled with a Heat Exchanger, *Simulation Modeling Practice and Theory*, **17**, 228-239, 2009.
- [10] Bertin Y., Refroidissement des machines électriques tournantes, *Technique de l'ingénieur*, **D3460**, 1-20, 1999.
- [11] Padet J., Convection thermique et massique - Nombre de Nusselt: partie 2, *Technique de l'ingénieur*, **BE8207**, 1-10, 2005.