

Gazéification étagée de plaquette forestière : test et caractérisation d'un réacteur pilote de 75 kWth

Staged gasification of wood chips: test and characterization of a 75 kWth pilot plant

Résumé

Un pilote de gazéification étagée de 75 kWth a été installé au Cirad. Il comprend 2 réacteurs couplés, l'un de pyrolyse, l'autre de gazéification et est instrumenté pour mesurer en continu les températures et pressions du procédé ainsi que la composition des gaz produits. Par ailleurs, une ligne d'échantillonnage des goudrons a été développée et utilisée dans le cadre de cette étude.

Nous avons montré dans un premier temps qu'un régime stabilisé pouvait être atteint et maintenu à partir du contrôle de la hauteur du lit de biomasse dans le réacteur de gazéification. Dans un deuxième temps, les campagnes d'essais ont confirmé le potentiel des technologies dite "étagés" pour la production d'un gaz propre compatible avec une valorisation en moteur. Le gaz obtenu a un pouvoir calorifique de 5,8 MJ/Nm³ et ne contient qu'une très faible concentration de goudrons (< 10 mg/Nm³).

Mots clés : gazéification, pyrolyse, concentration en goudrons, biomasse.

Van de Steene L.;
Pinta F.;
Alphonsine M.;
Martin E.;
Valette J.

CIRAD-Persyst, TA B42/16, 73,
avenue J.-F. Breton, 34398 Montpellier,
Cedex 5, France;
Tél. : (+33) 4 67 61 65 22
Fax : (+33) 4 67 61 65 15
E-mail : steene@cirad.fr

Abstract

A 75 kWth staged gasifier has been installed at Cirad. It consists of a pyrolysis reactor coupled with a gasification reactor. It is highly instrumented to measure continuously temperatures and pressures inside the reactor and gases concentrations at the outlet. In addition a tar sampling line has been developed and applied in the framework of this study. We showed here that a stabilised regime could be reached and maintained for long tests from the control of the bed height. Moreover tests campaigns have confirmed the potential of such technology to produce a clean gas compatible with gas engine. Heating value of 5,8 MJ/Nm³ and a tar content lower than 10 mg/Nm³ has been measured.

Keywords: gasification, pyrolysis, tar content, biomass.

1. Introduction

La gazéification permet de transformer, en présence d'un gaz réactif (Air, O₂ ou H₂O) un combustible solide en un gaz combustible composé essentiellement d'hydrogène et de monoxyde de carbone, et dans une moindre mesure d'hydrocarbures légers (CH₄, C₂H₄, C₂H₆) dans des proportions variables. Ce gaz combustible, après traitement et conditionnement peut-être valorisé en électricité via un moteur ou une turbine à gaz, ou en biocarburant via un réacteur de synthèse.

La gazéification de biomasse pour la production d'électricité décentralisée présente des performances intéressantes avec des rendements supérieurs à 25 %, contre 10 à 20 % en combustion (cycle vapeur) pour des unités de petite capacité. Cependant, même si des unités de démonstration industrielle de gazéification existent depuis de nombreuses années dans plusieurs pays européens (Allemagne, Autriche, Danemark, Suède) [1], [2], les technologies de cogénération de petites et moyennes puissances n'ont toujours pas atteint l'étape commerciale à un prix compétitif.

Les principales raisons invoquées sont :

- Un manque de fiabilité en termes de fonctionnement, à cause notamment d'une qualité des gaz produits encore insatisfaisante en termes de pouvoir calorifique ? ; et la présence de goudrons ?
- Un manque de souplesse en ce qui concerne la nature de la biomasse. Les technologies les plus abouties de nos jours le sont uniquement pour des plaquettes forestières. Le passage à d'autres types de combustible n'est pas suffisamment maîtrisé en raison des difficultés de conduite des procédés (alimentation, comportement thermo-chimique et mécanique de biomasse à faibles densités massique et énergétique).

L'enjeu industriel des travaux de recherche engagés par l'UR Biomasse Energie consiste à développer et optimiser un nouveau type de procédés dit "étagés", une variante des réacteurs à lits fixes co-courants. Il s'agit en particulier de démontrer que cette technologie, pour des installations de petites et moyennes puissances, permet de garantir des :

- rendements électriques supérieurs à 25 % ;
- coûts de maintenance faibles en raison de l'obtention d'un gaz propre ;

- coûts d'investissements compétitifs par le choix de solutions technologiques simples ;
- et une ouverture de la gamme des biomasses utilisables.

Le principe du réacteur étagé [3, 4] dérive de celui du gazéifieur à co-courant, mais contrairement à ce dernier [5], les deux étapes principales de pyrolyse de la biomasse et de gazéification du char (ou charbon) sont réalisées dans deux réacteurs distincts. Le premier réacteur est un réacteur de pyrolyse dans lequel la biomasse est séchée puis pyrolysée à une température maîtrisée. Les matières volatiles produites sont entraînées vers une zone d'oxydation où un apport d'air permet leur combustion. Les gaz chauds obtenus (vapeur d'eau et dioxyde de carbone notamment) sont injectés dans le second réacteur où le char forme un lit fixe qui est gazéifié pour produire l'hydrogène et le monoxyde de carbone. Ce type de réacteur permet une conduite optimale du procédé car les deux étapes (pyrolyse et réduction) peuvent être contrôlées séparément.

L'objectif des travaux entrepris sur cette installation pilote était dans un premier temps de valider le concept du lit étagé par le fonctionnement en régime stabilisé du réacteur sur des périodes de plusieurs heures.

Dans un deuxième temps, il s'agissait d'évaluer la performance du procédé en termes de rendement énergétique et de qualité des gaz produits. Dans ce but, une instrumentation fine a été mise en place et une ligne d'échantillonnage des effluents liquide et gazeux a été développée.

2. Matériel et méthodes

2.1 Le réacteur étagé du Cirad

Le pilote de gazéification étagé du Cirad (figure 1, 2) comprend 2 réacteurs et 3 zones de réaction : pyrolyse, oxydation des matières volatiles, et gazéification du char. Dans un premier temps la biomasse (plaquettes forestières) est alimentée, par un double sas, dans le réacteur de pyrolyse.

Le débit de celles-ci peut varier entre 10 et 20 kg/h. Le bois traverse le pyrolyseur à vis, d'une longueur de 3 m, tracé par des résistances électriques. Le chauffage se fait par 3 zones régulées indépendamment de manière à obtenir une bonne homogénéité des températures au sein du réacteur. La température maximale à la paroi est de 800 °C. Le temps de séjour du solide dans la vis chauffée est ajustable entre 2 et 60 min. Le réacteur de pyrolyse déconnecté du reste de l'installation a été précisément

caractérisé au cours d'une précédente étude [6]. En sortie du pyrolyseur, dans la zone d'oxydation, les matières volatiles sont brûlées et apportent ainsi l'énergie nécessaire à l'étape de gazéification. Le charbon produit se dépose en partie basse de ce second réacteur pour former un lit où il sera réduit par la vapeur d'eau et le monoxyde de carbone afin de produire de l'Hydrogène et le Monoxyde de Carbone principalement.

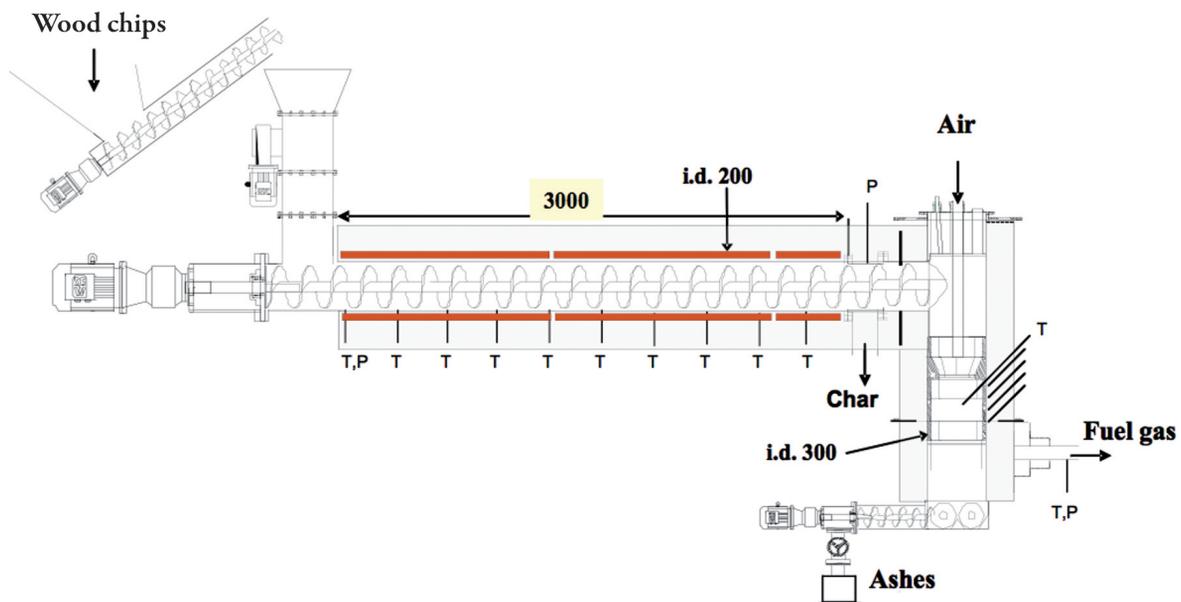


Figure 1 : Schéma de principe du Pilote de gazéification étagée



Figure 2 : Photo du Pilote de gazéification étagée

2.2 Instrumentation et mesures

Le réacteur a été largement instrumenté pour permettre d'accéder aux températures et pressions dans le réacteur.

Au niveau des températures, le réacteur de pyrolyse est équipé de thermocouples permettant de suivre la montée en température du bois pendant l'étape de séchage et pyrolyse. Le réacteur de gazéification dispose de 5 thermocouples à l'extérieur de la paroi interne, afin de contrôler une éventuelle surchauffe des matériaux réfractaires durant les tests. Par ailleurs, 2 thermocouples sont plongés à l'intérieur du lit, distants de 10 cm et servent de contrôle de la hauteur du lit de charbon. Et enfin des mesures

de température sont effectuées en continu au niveau des gaz de sortie (échantillonnage des gaz).

Des mesures de pression sont également effectuées en amont et en aval du lit de charbon afin de contrôler en continu l'évolution de la perte de charge des gaz au passage du lit de charbon.

Le prélèvement des gaz se fait à l'aide d'une ligne d'échantillonnage (3) conçue sur la base de protocoles internationaux d'échantillonnages normalisés ("tar Protocol"). Cette ligne est constituée d'une canne d'échantillonnage (1), d'un filtre à particule (2), d'un condenseur (3) et d'un dispositif de contrôle des conditions de prélèvement et de mesure de débit (4).

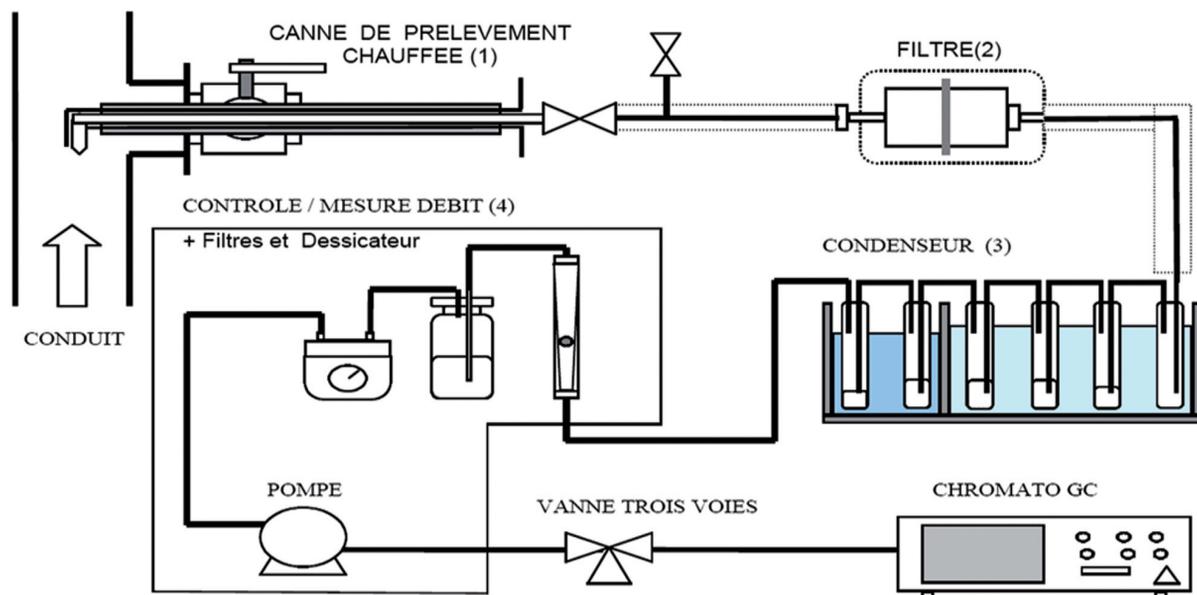


Figure 3 : Schéma de principe de la ligne d'échantillonnage des gaz

Le condenseur permet la séparation des gaz condensables (H_2O + goudrons) des incondensables (CO , H_2 , CO_2 , CH_4 , C_xH_y légers). Il est constitué de bulleurs immergés dans un bac contenant du liquide de refroidissement, l'ensemble étant maintenu à une température négative ($<0^\circ C$) à l'aide d'un cryostat. La température du bain est contrôlée en permanence à l'aide d'un thermocouple de type N. Les bulleurs contiennent un solvant (Isopropanol) qui piège l'eau et les autres condensats.

En sortie du condenseur, le volume prélevé est mesuré par un compteur volumétrique. Les gaz incondensables sont analysés à l'aide de la "micro-GC" (micro-Chromatographe en phase Gazeuse). Cet appareil échantillonne les gaz toutes les 100 secondes et les répartit sur deux colonnes : l'une est une Poraplot Q et l'autre est constituée d'un tamis moléculaire. Les espèces gazeuses sont séparées selon leur affinité propre avec ces phases stationnaires.

Chaque colonne est reliée à un catharomètre (Thermal Conduction Detector) qui détecte la différence de conductivité thermique entre les espèces ainsi séparés et le gaz vecteur.

Les condensats sont analysés en laboratoire par dosage Karl-Fischer pour déterminer la teneur en eau et par chromatographie couplé à un spectromètre de masse (GC-MS) afin de déterminer et de quantifier les goudrons.

2.3 Matière première

12 m³ de plaquettes forestières de pin maritime ont été approvisionnées pour l'ensemble des campagnes d'essai. Les analyses immédiates et élémentaires, réalisées selon les normes NF-M03-003 et NF-B55-101, sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Analyses immédiates et élémentaires des plaquettes forestières

<i>Analyse immédiate (sur sec)</i>	(wt%)
Cendres	0,2
Matières volatiles	82,45
Carbone fixe	17,17
Humidité	23
<i>Analyse élémentaire (sur sec)</i>	
C	45,0
H	5,7
O	42,08
N	<0,3
S	<0,3

3. Résultats et discussions

L'objectif des expérimentations visait dans un premier temps à atteindre un régime stabilisé et à produire un gaz de synthèse en continu pendant plusieurs heures. Dans un deuxième temps, il s'agissait d'évaluer l'efficacité de l'installation et la qualité du gaz produit.

Un préchauffage de l'installation est nécessaire avant chaque expérimentation. Le réacteur de gazéification est garni de béton réfractaire, qui impose plusieurs heures de montée en température. Ainsi, la journée précédant chaque expérimentation était dédiée à la mise en chauffe du système à partir d'un brûleur au gaz naturel. Les conditions opératoires des tests de référence sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Conditions opératoires du test de référence

Paramètres	Conditions de référence
Débit de bois	15 kg/h
Débit d'air	23 kg/h
Température de pyrolyse	550 °C
Période de décendrage	10 minutes
Temps de séjour dans le pyrolyseur	1 h

Au redémarrage de l'installation le matin, 4 heures de fonctionnement sont nécessaires pour atteindre un régime stabilisé.

Ce régime est confirmé par la non évolution des températures en fonction du temps (Figure 4).

Les légères fluctuations des températures T1 et T2 témoignent des fluctuations de la hauteur du lit. En effet, le contrôle de la hauteur de lit est nécessaire au fonctionnement continu de l'installation.

Pour cela, les thermocouples plongés à l'intérieur du lit sont des indicateurs de la hauteur de ce dernier. En effet, la chute de la température du thermocouple le plus haut (T1) témoigne de son recouvrement par le charbon issu du réacteur de pyrolyse dont la température est de 550°C.

Par conséquent le système de décendrage est activé pour repositionner le lit en dessous de ce thermocouple.

L'atteinte d'un régime stabilisé est également confirmée par l'évolution du gaz de synthèse produit et mesuré en sortie de réacteur (Figure 5).

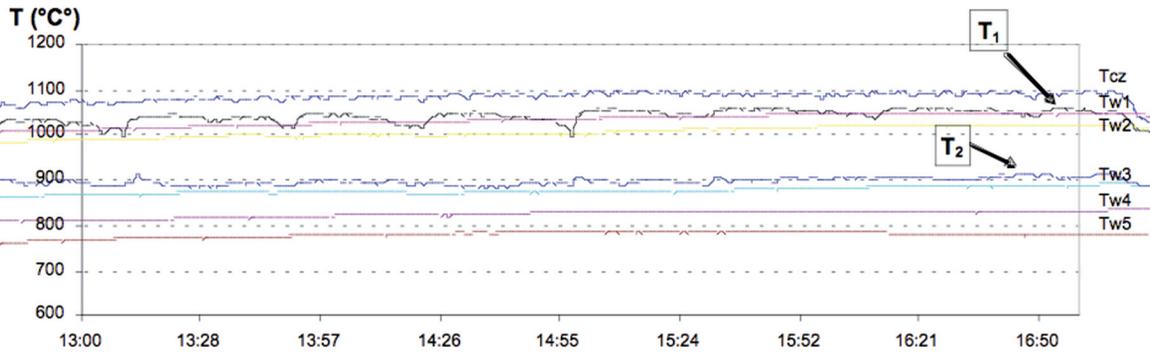


Figure 4 : Evolution des températures dans le réacteur

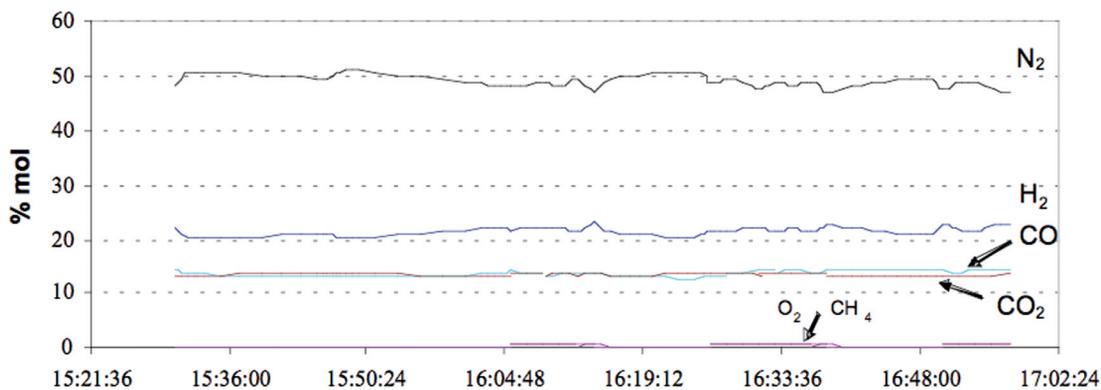


Figure 5 : Evolution des concentrations des gaz produits en sortie de réacteur

Pendant plus de trois heures les concentrations de gaz fluctuent de moins de 10 %. Les valeurs moyennes sont synthétisées dans le tableau 3. Le pouvoir calorifique du gaz est de 5,8 MJ/Nm³

(sur sec). Par ailleurs, les condensats ont été analysés et ont révélé une teneur en goudrons très faible, de l'ordre de 5 mg/Nm³, qui confirme le potentiel de cette technologie pour produire un gaz propre.

Tableau 3 : Gaz produits par le réacteur de gazéification étagée

Espèces	H ₂	CO	CO ₂	O ₂	CH ₄	N ₂
% molaire	22,0	14,1	13,7	0,5	0,7	49,0

Les cendres de gazéification échantillonnées montrent une quantité de carbone non convertie relativement importante de l'ordre de 12 %. Ce taux de conversion pourrait être amélioré par des modifications importantes du réacteur et l'ajout

d'une grille d'extraction. Mais ces modifications augmenteraient significativement la complexité de ce réacteur et induirait des surcoûts significatifs au niveau de l'investissement et de la maintenance.

Finalement, selon le contexte, un compromis doit être trouvé entre la simplicité de réalisation (coûts de l'installation) et l'efficacité de la conversion (rendement de l'installation).

4. Conclusion

Le Cirad dispose d'un pilote de gazéification étagé de biomasse de 75 kWth. Des campagnes d'essais ont montré qu'un régime stationnaire stabilisé pouvait être atteint et maintenu pendant plusieurs heures. Pour cela une méthode de contrôle de la hauteur du lit de charbon a été validée. L'instrumentation mise en place permet de suivre en continu la température du réacteur à différentes hauteurs du lit, la pression en amont du lit, ainsi que la concentration des gaz produits en sortie de

réacteur. Les essais menés ont montré qu'un gaz de très bonne qualité était obtenu, avec un pouvoir calorifique du gaz sec de 5,8 MJ/Nm³ et une teneur en goudrons inférieure à 5 mg/Nm³. Le couplage avec un moteur est par conséquent complètement envisageable sans nécessiter une épuration complexe du gaz. La quantité importante de carbone non converti, de l'ordre de 12 %, est due à la conception même de la zone de décarbonage, pour laquelle la notion de simplicité a été privilégiée par le constructeur. Les essais en cours visent actuellement à étudier la sensibilité du système aux paramètres opératoires tels que le débit de bois combustible à l'entrée, le ratio air/bois et l'humidité du bois afin d'optimiser l'installation en terme de rendement énergétique ■

Bibliographie

[1] Harrie Knoef (2005): *Handbook Biomass Gasification*, BTG biomass technology group BV, The Netherland5.

[2] *Rapport CIRAD-Forêt, Observatoire des énergies renouvelables, Pyrolyse et gazéification de la biomasse pour la production d'électricité, rapport ADEME, 2001.*

[3] Gobel, B., J.D. Bentzen, C. Hindsgaul, U. Henriksen, J. Abrenfeldt, N. Houbak and B. Qvale. (2002): "High performance gasification with the two-stage gasifier". in *Proceedings of the 12th European conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection Amsterdam* p. 389-395.

[4] JP Tagutchou (2008) : *Thèse de doctorat, "Gazéification de charbon de plaquettes forestières : particule isolée et lit fixe continu", Cirad.*

[5] F. Pinta. L.F. Vergnet (1994) : *Tests d'une unité industrielle pilote de gazéification de biomasse pour la production de chaleur pour le séchage du bois d'œuvre, Poster présenté à la 8^{ème} Conférence européenne sur la biomasse - Vienne (Autriche).*

[6] W.F. Fassinou, L. Van de steene, S.Toure, G. Volle, P. Girard, (2009): *Pyrolysis of Pinus pinaster in a two-stage gasifier: Influence of processing parameters and thermal cracking of tar. essing Technology, 90. (1): 75-90.*