

**CARACTERISATION DES PERFORMANCES D'UNE UNITE
PILOTE DE GAZEIFICATION DE BIOMASSE
ANALYSE DE FAISABILITE TECHNIQUE, ECONOMIQUE ET
ENVIRONNEMENTALE POUR UNE UTILISATION CHEZ UN
ARTISAN D'UNE FILIERE AGRO ALIMENTAIRE AU BURKINA
FASO.**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
**MASTER EN ENERGIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT**
OPTION : ENERGIE



Présenté et soutenu publiquement le 24/06/2013 par

AHMED LIMAN SAIDOU

Travaux dirigés par : Dr François PINTA Enseignant chercheur Cirad /2iE

Dr Yohan RICHARDSON Enseignant chercheur 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Madieumbé GAYE

Membres et correcteurs : Yohan RICHARDSON

François PINTA

Severin TANO

Promotion 2012/2013

DEDICACE

Je dédie ce mémoire

À

- *Toute ma famille,*
- *Mes parents sans qui je n'en serais pas là aujourd'hui,*
- *Mes frères et sœurs, cousins, cousines pour le rôle joué par chacun d'entre eux dans notre isométrie de position*
- *Mes meilleurs amis ROUKAYATOU DOUDY, ALKASSOUM ADAMA ARDO ET MOHAMADOU AMINOU KADRY et ainsi que tous les autres*

REMERCIEMENT



- ✚ Je remercie le Dr Joel Blin Responsable du laboratoire biomasse et biocarburant pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et m'a permis de réaliser mes travaux ;
- ✚ Je remercie le Dr François PINTA pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité et sa compréhension. Puisse-t-il trouver ici le témoignage de ma profonde gratitude ;
- ✚ Je remercie le Dr Yohan RICHARDSON, chercheur au laboratoire de biomasse Energie et biocarburant (LBEB-2IE), pour m'avoir apporté son aide précieuse et conseils tout au long de mon stage ;
- ✚ Je remercie particulièrement KABORE W Serge Dimitri avec qui j'ai eu à collaborer durant mon stage, et pour l'assistance qu'il m'a apporté durant mes travaux ;
- ✚ Je remercie également tout le personnel de LBEB du 2ie précisément à Mr Odilon CHANGOTADE pour l'assistance qu'il m'a apporté durant mes travaux au laboratoire ;
- ✚ Je remercie particulièrement Smée LAURA pour sa disponibilité, ses conseils, et le soutien qu'elle m'a apporté ;
- ✚ Je remercie toute ma promotion et principalement à mes co-stagiaires : BRAHIM Abdalah, DOSSA Anson, NJAKOU NOULALA Emmanuel, ONDO NANG Paul, SESHIE Yao, SONFACK Cathérine et TALL Amadou ;

Je tiens à remercier le président du jury et l'ensemble de membre du jury pour avoir accepté de juger ce travail

RESUME

L'objectif de notre étude est de caractériser les performances d'une unité pilote de gazéification à lit fixe co-courant construite localement et alimentée par de la balle de riz pour la production de chaleur directement utilisable dans les procédés agroalimentaires. Dans cette optique, le gazéifieur a été instrumenté pour mesurer les températures et les débits ainsi que la composition des gaz produits. Pour l'analyse des gaz, une ligne d'échantillonnage de gaz a été développée et mise en œuvre dans le cadre de cette étude. Tous ces paramètres ont été examinés afin d'évaluer les performances énergétiques du gazéifieur. Les campagnes d'essais ont confirmé le potentiel de la technologie dite à lit fixe co-courant pour la production du gaz combustible pour la production de la chaleur. Le syngaz obtenu a un pouvoir calorifique généralement compris entre 4.3 et 5,7MJ/Nm³. La puissance maximale du gazogène est de 140KW et le rendement énergétique moyen est compris entre 67 et 75%. Sur la base de cette première phase d'expérimentation, des modifications dans la conception du gazéifieur et sur la ligne d'échantillonnage ont été proposées en vue d'améliorer ses performances et de faciliter son fonctionnement. Une étude technico-économique synthétique traite enfin d'un cas d'application chez un artisan pratiquant l'étuvage du riz.

Mots clés :

- Gazéification ;
- Biomasse ;
- gazéifieur à lit fixe co-courant ;
- agro-industrie ;
- production de la chaleur.

ABSTRACT

The aim of our study was to characterize the performances of locally built pilot plant down draft gasifier of rice husk for the production of heat that can be directly used in food processing industries. In this respect, gasifier was instrumented to measure temperatures and flow rates the composition of the gases produced. For gas analysis, a gas sampling line was developed and used in this study. All these parameters were examined in order to evaluate the energy performance of the gasifier. The tests have confirmed the potential of the down draft fixed bed technology for the production of fuel gas for heat production. The syngas obtained a calorific generally between 4.3 and 5.7 MJ/Nm³. The maximum power is 140KW gasifier and the average efficiency is between 67 and 75%. Based on this first phase of this experiment changes in the design of the gasifier and the sampling line are proposed to improve its performance and ease of operation. A synthetic techno-economic study finally discusses a case of applying a craftsman practicing parboiling.

Keywords:

- gasification,
- biomass,
- Down gasifier
- Agro-industry
- Heat production

LISTE DES ABREVIATIONS

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement ;

EDF : Electricité de France

GEB : Groupe énergie biomasse

LBEB : Laboratoire biomasse et biocarburant

MCFC :

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PCS : Pouvoir calorifique supérieur

PH : Pouvoir d'hydrogène

SNV : Organisation Néerlandaise de développement

UCL : Université Catholique de Louvain



TABLE DES MATIERES

DEDICACE	i
REMERCIEMENT	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
I. INTRODUCTION	1
1. Contexte et Enjeux	1
2. Problématique.....	3
3. Objectifs et méthodologie	4
II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1. Etat de l'art des technologies de gazéification	5
a. Qu'est-ce que la gazéification ?	5
b. Etapes de la gazéification	5
c. Nature des gaz produits	8
d. Les différents types de gazogènes	8
i. Gazéifieurs à lit fixe co-courant	10
ii. Propriétés du gaz produit par gazéification	10
iii. Applications des gazogènes à co-courant.....	11
2. Quelques réacteurs pilotes de gazéification de biomasse co-courant existants à travers le monde.....	14
a. Le Groupe Energie Biomasse-Université Catholique de Louvain (Belgique)	15
b. Etude expérimentale de la Gazéification de la biomasse non ligneuse dans un gazéifieur à lit fixe co-courant (Chine) [13]	16
c. Gazogène MARTEZO – TOUILLET (France).....	17
d. IISc/DASAG/Xylowatt (Indian Institute of Science -Dasad Energy Engineering ltd) [5]....	19
III. MATERIELS ET METHODES	21
1. Description et fonctionnement du gazéifieur	21
a. La zone de séchage et de pyrolyse de la biomasse	22
b. La chambre de gazéification.....	23
c. Les conduites de circulation de gaz et d'air chaud.....	25
d. Les souffleurs d'air.....	25

2.	Protocole de suivi expérimental	26
a.	Caractérisation de la biomasse	27
b.	Instrumentation du gazéifieur.....	28
c.	Mesures des températures et des débits.....	29
d.	Dispositif de la ligne de prélèvement de gaz et d'analyse.....	31
-	Description du Tar Protocol	33
-	Principe du fonctionnement de la ligne d'échantillonnage de gaz	34
3.	Méthodologie d'évaluation de la performance du gazeifieur	35
IV.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	37
1.	Résultat d'analyse immédiate de la balle de riz	37
2.	Pouvoir calorifique	38
3.	Présentation générale des tests réalisés.	38
4.	Présentation détaillée de quatre principaux tests sélectionnés	41
a.	Caractéristique générale de différents tests.....	42
b.	Résultats et interprétation des courbes températures, compositions des gaz et PCI_{gaz} de quatre principaux tests.....	43
c.	Bilan énergétique de test N°4 et Test N°10.....	52
5.	Synthèse bilan matière, énergétique et évaluation de la performance du gazéifieur	53
6.	Perspectives d'amélioration de test	54
V.	ANALYSE DE LA FAISABILITE TECHNIQUE, ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE POUR UNE UTILISATION CHEZ UN ARTISAN PRATIQUANT DE L'ETUVAGE DU RIZ.....	56
1.	Contexte	56
2.	Analyse de la faisabilité technico économique de l'installation du gazogène.....	56
a.	Hypothèses des calculs.....	57
b.	Modèles technico économiques des différents scénarios	58
c.	Analyse de la rentabilité.....	60
VI.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	62
VII.	BIBLIOGRAPHIE	64
ANNEXES	a	
Annexe 1 : Mesure de ΔP (PA) et résultats des débits calculés lors de test N°4	a	
Annexe 2 : Mesure de ΔP (PA) et débits lors de test N°10.....	c	
Annexe 3: protocole de mise en œuvre du gazéifieur	d	
Annexe 4 : chronogrammes des différents tests sélectionnés	f	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales réactions chimiques mises en jeu dans le procédé de gazéification de la biomasse, adapté à partir de Gómez-Barea et Leckner	7
Tableau 2 : Composition moyenne des gaz en fonction de type de procédé. [5].....	8
Tableau 3 : Caractéristiques des différents procédés de la gazéification [10]	9
Tableau 4 : Installations pilotes de gazéification de biomasse en lit fixe co-courant recensées.	14
Tableau 5 : Résultats expérimentaux de la composition du gaz et les caractéristiques de gazéification [13].....	17
Tableau 6 : Résultats obtenus lors de tests réalisés par EDF sur des unités Martezo [15]	18
Tableau 7 : Instrumentation du gazéifieur.....	28
Tableau 9 : Résultat d'analyse de pouvoir calorifique	38
Tableau 10 : Bilan tests réalisés	40
Tableau 11 : Tableau récapitulatif des valeurs de débits mesurées lors de 2 tests.....	42
Tableau 12: Tableau récapitulatif de la composition du gaz des différents tests	43
Tableau 13 : Bilan énergétique de test N°4 et test N°10.....	52
Tableau 14 : Bilan de matière et d'énergie de gazéification	53
Tableau 15 : Données d'entrées des quatre scénarios	57
Tableau 16 : Résultat d'analyse économique du scénario 1.....	58
Tableau 17 : Résultat d'analyse économique du scénario 2.....	59
Tableau 18 : Tableau récapitulatif des quatre scénarios sur la période de cinq ans.....	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Principe de la gazéification de la biomasse [7]	5
Figure 2 : Principe de la gazéification de la biomasse. [7]	6
Figure 3 : Principe d'un gazéifieur à lit fixe co-courant [12].....	10
Figure 4 : Gazéifieur à Application thermique [14]	12
Figure 5 : Application thermique de la gazéification [14] [13]	12
Figure 6 : Application thermique de la gazéification pour la production d'électricité [14].....	13
Figure 7 : Schémas d'une centrale de gazéification à cogénération [14].....	13
Figure 8 : Représentation schématique de l'installation Tcr-GAZEL développée par GEB-UCL [16]	16
Figure 9 : Schéma du dispositif expérimental de la gazéification co-courant [13].....	17
Figure 10 : Unité pilote de la gazéification vue de la plateforme LBEB 2IE (Photo 2ie)	21
Figure 11 : Schéma du gazéifieur co-courant.....	22
Figure 12 : Schéma de la zone de séchage et de pyrolyse du gazéifieur.....	23
Figure 13 : Schéma de la chambre de la gazéification du charbon	24
Figure 14 : Conduite de circulation du gaz combustible et d'air chaud du gazéifieur.....	25
Figure 15 : Position des souffleurs sur le gazéifieur	26
Figure 16: Point de mesure de température et de débit	29
Figure 17 : Schéma de principe de la ligne d'échantillonnage de gaz	31
Figure 18 : Vue de la canne de prélèvement	35
Figure 19 : Système de condensation et module de pompage.....	35
Figure 20 : Résultat d'analyse immédiate de la balle de riz.....	37
Figure 21 : Variation de PCI entre la balle de riz et la cendre	38

I. INTRODUCTION

1. Contexte et Enjeux

Dans un contexte de développement durable, la maîtrise de la consommation énergétique mondiale fait partie des défis majeurs de notre siècle. L'augmentation de la demande énergétique mondiale est inévitable, notamment en raison de la croissance démographique et industrielle des pays en voie de développement. Ainsi, l'office des statistiques énergétiques du gouvernement américain estime que la demande énergétique mondiale devrait croître d'environ 50% entre 2005 et 2030 [1]. Par ailleurs, les ressources en énergies fossiles ne sont pas inépuisables. D'après les données estimant les réserves fossiles actuellement prouvées [2], une consommation équivalente à celle de 2009 provoquerait l'épuisement des ressources de pétrole en 42 ans, de gaz naturel en 63 ans et de charbon en 119 ans. En plus des problèmes d'épuisement des réserves, le coût du pétrole qui ne cesse d'augmenter dans le monde ouvre des opportunités aux énergies renouvelables. De plus, aucune politique économique et énergétique ne peut aujourd'hui ignorer la question du changement climatique liée en partie aux émissions de gaz à effet de serre. Même si la prise de conscience de ce phénomène peut sembler lente au regard des enjeux pour la planète, elle est néanmoins réelle et s'intègre progressivement dans le paysage énergétique mondial

Au regard de ces constats le recours à des sources d'énergie alternatives est incontournable pour continuer à satisfaire les besoins énergétiques mondiaux tout en préservant l'environnement. En raison de l'importance de son gisement, la filière biomasse est une voie prometteuse. Elle présente de plus une grande souplesse par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables, souvent tributaires des conditions géologiques ou météorologiques du milieu.

L'énergie produite à partir de la biomasse représente la majeure partie de l'approvisionnement énergétique final total de l'Afrique. Il est toutefois important de noter que les données sur la biomasse en Afrique sont particulièrement problématiques. La plupart des pays ne disposent pas de bases de données fiables et actualisées sur l'énergie, tout spécialement en ce qui concerne la biomasse [3]. Les estimations disponibles indiquent que la biomasse constituait 58 % de la consommation énergétique finale en Afrique en 2002 (AIE, 2004). Selon la même source, en 2002, la biomasse représentait 49 % de la fourniture totale en énergie primaire. Bien qu'elle ait connu une baisse de sa part relative dans l'approvisionnement total en énergie primaire en l'espace de 30 ans (de 62 à 49 %), la biomasse joue encore un rôle dominant dans

le secteur énergétique africain. La forte dépendance vis-à-vis de la biomasse est particulièrement visible en Afrique subsaharienne, où elle représente 70 à 90 % de l'approvisionnement en énergie primaire dans certains pays et, selon les estimations (AIE, 2004), 80 à 86 % de la consommation énergétique. La majeure partie de l'énergie de la biomasse utilisée en Afrique subsaharienne repose sur un usage traditionnel dont l'efficacité énergétique est souvent faible et dans laquelle le bois énergie occupe une place importante sans qu'il y ait une gestion durable de la source. Dans ce contexte la production de bioénergie par des procédés de conversion modernes, efficaces et adaptés à une grande variété de déchets de biomasse tels que les résidus agricoles est à encourager. Toutefois, cette alternative de production d'énergie reste aujourd'hui conditionnée par l'émergence de solutions technologiques permettant de transformer cette biomasse en plusieurs formes d'énergies finales incluant l'électricité, la chaleur ou les carburants tout en offrant une certaine flexibilité d'échelle de production pour tenir compte de la disponibilité variable de la ressource. Les procédés de gazéification sont susceptibles de réaliser cette transformation de manière efficace.

En effet, aujourd'hui en Afrique, le procédé de gazéification des déchets de biomasse est une technologie prometteuse pour la production d'énergie thermique et d'électricité dans de nombreuses filières agro-alimentaires (riz, arachides, karité etc.). Cela permettrait à la fois de résoudre des problèmes de gestion des déchets abondants, et également de contribuer à l'approvisionnement en énergie de zones isolées (milieu rural).

La gazéification est une transformation thermo-chimique produisant un gaz combustible, ensuite converti en électricité et/ou chaleur via des moteurs à combustion interne tels que les moteurs ou les turbines à gaz. Le gaz produit par gazéification peut également être utilisé comme matières premières pour la production de biocarburant de 2^{ème} génération par le procédé Fischer-Tropsch après une étape d'épuration et de conditionnement donnant le gaz de synthèse.

De manière simplifiée, les procédés pourraient se classer en trois grands types en fonction de contraintes technologiques et économiques :

- ✓ Les réacteurs à lit fixe, pour des applications de faibles puissances de quelques kilowatts à quelques mégawatts maximum) ;
- ✓ Les réacteurs à lit fluidisés, pour les installations de moyennes puissances (au-delà de 10 mégawatt)

- ✓ Les réacteurs à lit entraîné, pour des applications de très grande échelle uniquement.

2. Problématique

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 (Belgique, Allemagne, Autriche, Danemark, Suède) [4], [5], 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 de teneur en 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 thermochimique et mécanique de biomasse à faibles densités massique et énergétique).
- ✓ l'approvisionnement en matières organiques doit être continu et homogène. C'est en pratique difficilement réalisable, même si les ressources sont censées être abondantes ;
- ✓ Pour des raisons de rentabilité économique et d'efficacité énergétique, la distance qui sépare les ressources des unités de gazéification ne doit pas dépasser 50 kilomètres ;
- ✓ La technique de gazéification ne reste encore mal connue et ne suscite pas encore un intérêt suffisant de la part des professionnels ou des acteurs privés susceptibles d'assurer le développement de ce procédé.

En Asie, les installations de gazéification se situent principalement en Inde, en Chine et au Japon. Les pays d'Asie comme la Chine constituent le marché le plus important en termes de capacité installée et de marché potentiel. L'ensemble des pays tropicaux représentent une zone de développement importante qui devrait émerger très rapidement dans les années à venir.

3. Objectifs et méthodologie

L'objectif de notre étude est dans un premier temps de caractériser les performances de l'unité pilote de gazéification de biomasse, et dans un deuxième temps d'analyser la faisabilité technique, économique et environnementale de l'implantation d'une telle unité chez un artisan d'une filière agroalimentaire locale.

Pour ses recherches le laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB) du 2iE a noué un partenariat avec un constructeur local de gazogène (lit fixe co-courant) la société ISOMET et s'est équipé d'une unité pilote installée sur sa plateforme thermochimique. Le LBEB s'est également associé à la coopération Hollandaise SNV Burkina afin de caractériser le fonctionnement de son unité pilote avec différentes biomasses (Balles de riz et coques d'arachides, coques d'anacarde, et coques de karité si possible) et différentes configurations de fonctionnement grâce au recrutement d'un ingénieur diplômé de master 2 Energie sorti de 2012 avec qui nous avons travaillé lors de toutes les expérimentations.

Pour bien mener notre étude, la méthodologie que nous avons adoptée est la suivante :

- ✓ Réaliser une étude bibliographique approfondie sur les études paramétriques existantes sur des installations de gazéification à travers le monde ;
- ✓ Rédiger le protocole opératoire d'expérimentation : Mise en œuvre des équipements de mesure d'échantillonnage ;
- ✓ Réaliser les tests de fonctionnement permettant de mesurer tous les paramètres nécessaires pour caractériser le fonctionnement avec la balle de riz et les autres biomasses testées durant le stage ;
- ✓ Etablir le bilan énergétique ;
- ✓ Analyser la faisabilité technique, économique et environnementale d'implantation d'une telle unité chez un artisan d'une filière agroalimentaire locale de transformation du riz.

II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Etat de l'art des technologies de gazéification

a. Qu'est-ce que la gazéification ?

la gazéification est une réaction qui permet de transformer un combustible solide (biomasse) en un gaz combustible essentiellement formé d'hydrogène et de monoxyde de carbone, et dans une moindre mesure des hydrocarbures légers (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6). Elle met en jeu un ensemble de transformations thermochimiques (séchage, dévolatilisation, craquage, reformage des gaz). « Le gaz produit appelé gaz de synthèse ou **syngaz** est un vecteur énergétique, il présente de multiples possibilités de valorisation intéressantes. Le choix du type de procédé et la conduite de la réaction de gazéification sont orientés différemment selon les exigences de l'installation de valorisation en aval (composition, traitement, température du gaz de synthèse...) [6]

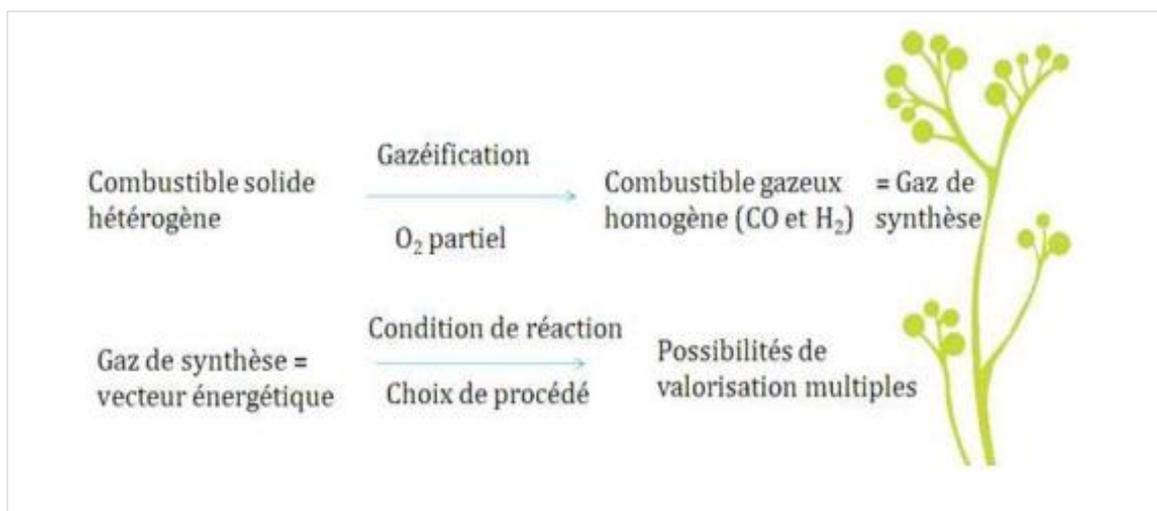


Figure 1 : Principe de la gazéification de la biomasse [7]

b. Etapes de la gazéification

Dans le processus de la gazéification, la biomasse est soumise à quatre phénomènes thermochimiques complexes qui se succèdent. Ils sont toujours présents mais leur déroulement et leur configuration spatiale et temporelle peuvent différer selon le mode d'introduction de la biomasse, l'agent gazéifiant et le type de gazogène [7]. La gazéification est ainsi représentée schématiquement par la Figure ci-dessous

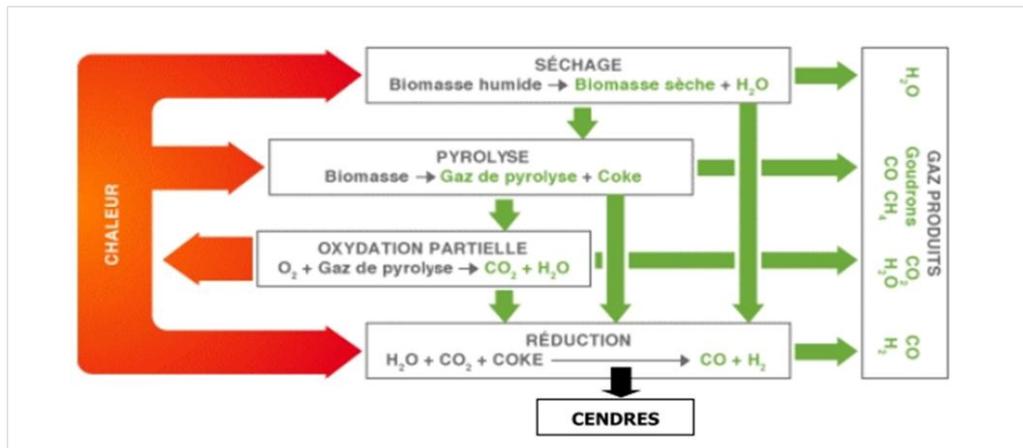


Figure 2 : Principe de la gazéification de la biomasse. [7]

1. *le séchage de la biomasse* : via la chaleur du gaz produit ou via combustion interne

Biomasse humide \Rightarrow Biomasse sèche + H₂O

2. *la pyrolyse rapide* : C'est une dégradation thermique en absence totale d'oxygène. Quand la température atteint 320 °C, la biomasse commence à se décomposer sous l'effet de la chaleur, en trois phases : hydrocarbures gazeux, liquides et résidus carbonés (charbons). La répartition entre ces trois phases dépend des conditions opératoires (température, vitesse de chauffe et temps de séjour).

Biomasse \Rightarrow Gaz de pyrolyse + résidus carbonés

3. *l'oxydation*

O₂ + Gaz de Pyrolyse + résidus carbonés \Rightarrow CO₂ + H₂O

Cette opération se fait en présence d'un oxydant. Le choix de l'oxydant est fondamental pour la conception du gazogène et dépend de l'utilisation finale du gaz. C'est essentiellement lui qui fixe le pouvoir calorifique du gaz final à la sortie du gazogène.

Quatre principaux types d'oxydant sont utilisés :

(a) air ou air/vapeur d'eau, PCI_{synbio} \cong 4 à 6 MJ.Nm⁻³, procédé auto thermique ;

(b) vapeur d'eau, PCI_{synbio} \cong 12 à 18 MJ.Nm⁻³, procédé globalement endothermique ;

(c) oxygène pur, PCI_{synbio} \cong 12 à 18 MJ.Nm⁻³, procédé auto thermique mais coût de Production de l'oxygène prohibitif pour une utilisation commerciale ;

(d) hydrogène, $PCI_{\text{synbio}} \cong 40\text{MJ.Nm}^{-3}$, procédé globalement très endothermique [8] (McKendry, 2002c).

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresseront à la gazéification à l'air.

4. la réduction des résidus de charbons (ou gazéification)



Les gaz formés lors de la combustion entrent ensuite dans la zone de réduction, où le résidu carboné ou charbon est converti en gaz combustibles à travers une série de réactions chimiques hétérogènes endothermiques en absence d'oxygène. Le charbon est par ailleurs un catalyseur du craquage des goudrons encore présents en faible concentration.

Remarque : La gazéification peut être « directe » ou « indirecte ». [9] Elle est « indirecte » quand la pyrolyse et la gazéification se déroulent dans un réacteur séparé de celui de la combustion. La chaleur nécessaire à la gazéification et à la pyrolyse est générée par le réacteur à combustion et est véhiculée par un matériau inerte (ex : sable) qui joue le rôle de caloporteur.

Tableau 1 : Principales réactions chimiques mises en jeu dans le procédé de gazéification de la biomasse, adapté à partir de Gómez-Barea et Leckner

Réactions	Enthalpie de réaction ΔH^0 (kJ.mol ⁻¹)	Nom
Biomasse → charbon + goudrons + H ₂ O + gaz légers (CO + CO ₂ + H ₂ + CH ₄ + C _x H _y O _z + N ₂ + ...)	> 0	Pyrolyse ou dévolatilization
Combustion du charbon		
C + 1/2O ₂ → CO	-111	Combustion partielle
C + O ₂ → CO ₂	-394	Combustion complète
Gazéification du charbon		
C + CO ₂ ⇌ 2CO	+173	Réaction de Boudouard
C + H ₂ O → CO + H ₂	+131	Vapogazéification
C + 2H ₂ ⇌ CH ₄	-75	Hydrogazéification
Réactions homogènes		
CO + 1/2O ₂ → CO ₂	-283	Oxydation du CO
H ₂ + 1/2O ₂ → H ₂ O	-242	Oxydation de H ₂
CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O	-283	Oxydation du CH ₄
CO + H ₂ O ⇌ CO ₂ + H ₂	-41	Réaction du gaz à l'eau ou <i>Water gas shift</i> (WGS)
CO + 3H ₂ ⇌ CH ₄ + H ₂ O	-206	Méthanation
Réactions de conversion des goudrons		
C _n H _m + (n/2)O ₂ → nCO + (m/2)H ₂		Oxydation partielle
C _n H _m + nH ₂ O → (m/2 + n)H ₂ + nCO ₂	Très endothermique	Vaporeformage
C _n H _m + nCO ₂ → 2nCO ₂ + (m/2)H ₂		Reformage au CO ₂
C _n H _m → (m/4)CH ₄ + (n - m/4)C		Craquage thermique

c. Nature des gaz produits

Lors de la gazéification, la partie organique du combustible est transformée principalement en monoxyde de carbone CO et en hydrogène H₂ et dans des proportions plus faibles en méthane CH₄ et C_nH_m à 1 ou 2 carbones. Selon le type de réacteur mais surtout d'agent gazéifiant, la quantité de gaz de synthèse H₂ + CO varie dans de fortes proportions et peut représenter jusqu'à 80% dans le cas de gaz de synthèse obtenus par gazéification à la vapeur.

Le syngaz contient aussi divers gaz inertes : vapeur d'eau H₂O, azote N₂ et dioxyde de carbone CO₂, en proportion variable en fonction des procédés et de la matière première ; ainsi que divers composés à l'état de traces, dont les proportions sont directement liées à la nature du combustible le chlorure d'hydrogène (HCl), le fluorure d'hydrogène (HF), l'ammoniac NH₃, l'acide cyanhydrique (HCN), des inorganiques volatils à basses températures, etc.... Enfin, une part plus ou moins importante de composés hydrocarbonés, les goudrons formés lors de la pyrolyse, peuvent être présents dans les gaz, en fonction du type de réacteurs utilisés et, une fois encore, de la qualité de la matière première.

Le pouvoir calorifique du gaz et sa composition est fonction de la nature du combustible et du type de réacteur comme l'illustre le tableau ci-contre.

Tableau 2 : Composition moyenne des gaz en fonction de type de procédé. [5]

Gazéification à l'air		Lit fixe co-courant	Lit fixe contre-courant	Lit fluidisé circulant
Humidité biomasse	%mh ¹	6-20	n.d.	13 – 20
Particules	mg/Nm ³	100 – 8 000	100 - 3 000	8 000 - 100 000
Goudrons	mg/Nm ³	10 - 6 000	10 000 - 150 000	2 000 - 30 000
PCI du gaz	MJ/Nm ³	4.0 - 5.6	3.7 - 5.1	3.6 - 5.9
H ₂	% vol.	15 – 21	10 – 14	15 – 22
CO	% vol.	10 – 22	15 – 20	13 – 15
CO ₂	% vol.	11 – 13	8 – 10	13 – 15
CH ₄	% vol.	1 – 5	2 – 3	2 – 4
C _n H _m	% vol.	0.5 – 2	n.d.	0.1 - 1.2
N ₂	% vol.	différence	Différence	différence

d. Les différents types de gazogènes

Les types de gazogènes sont nombreux, mais le principe de fonctionnement reste similaire dans la mesure où toutes les étapes citées précédemment sont présentes. Ces gazogènes se

distinguent par le mode d'introduction de la biomasse, la nature, l'agent oxydant, le type de réacteur ou encore le mode d'évacuation des cendres.

Le choix du gazogène dépend aussi de certains critères : la nature de la biomasse à valoriser, son taux d'humidité, l'utilisation désirée du gaz produit, le coût d'investissement et la taille de l'installation.

Les gazogènes utilisant la biomasse ou le charbon se classent en deux catégories principales : lit fixe (co-courant, contre-courant, étagé) et lit fluidisé, chacune possédant plusieurs branches. Récemment, les gazogènes à lit entraîné, variante du lit fluidisé pour les grandes puissances, se développent pour la production d'électricité à haut rendement à partir du charbon.

Le principe des gazéificateurs étagés est assez proche du celui des gazéificateurs à co-courant, contrairement à ce dernier, les deux étapes de pyrolyse et de gazéification sont réalisés dans des réacteurs différents. Le premier réacteur est destiné à la pyrolyse de la biomasse fraîchement introduite. Le combustible y est séché puis pyrolysé à température contrôlée. Le charbon et les gaz de pyrolyse alimentent un second réacteur. Dans ce second réacteur, les gaz de pyrolyse subissent une oxydation où un apport en oxygène permet leur combustion. Les gaz chauds obtenus réagissent avec le lit de charbon pour produire les gaz combustibles.

Ce type de réacteur a l'avantage de permettre une conduite indépendante des phases de pyrolyse et de gazéification. Ce procédé permet de réduire considérablement le taux de goudrons dans le gaz produit à la fin du procédé. En effet, les gaz issus de la pyrolyse dans le premier étage sont thermiquement craqués et oxydés dans le second étage. [19]

Le gazogène pilote que nous étudions au cours de ce stage est un modèle à lit fixe co-courant, nous ne développerons pas ici la bibliographie sur le modèle à lit étagé.

Le Tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques des différents gazogènes.

Tableau 3 : Caractéristiques des différents procédés de la gazéification [10]

Types de gazogène	Lit fixe		Lit entraîné	Lit fluidisé	
	Co-courant	Contre-courant		Dense (BFB)	Circulant (CFB)
Température maximale (°C)	700-1200	700-900	1500	700-900	< 900
Production Goudrons	Faible	Très élevé	Très faible	Intermédiaire	Intermédiaire
Contrôle	Facile	Très facile	Complexe	Intermédiaire	Intermédiaire
Puissance	< 5 MW	< 20 MW	> 20 MW	10 < MW < 100	> 20 MW
Nature du combustible	Très critique	Critique	Critique	Peu critique	Peu critique

i. Gazéifieurs à lit fixe co-courant

Les gazéifieurs à lit fixe co-courant ou "downdraft" ont une configuration où l'air et les gaz produits circulent dans le même sens que la charge de combustible. Le principe de ce réacteur est schématisé à la figure 2. L'air entre en contact avec les produits gazeux de pyrolyse et les brûle en formant une zone de flamme dont la haute température entretient la pyrolyse de la biomasse fraîche qui descend au fur et à mesure qu'est consommé le charbon présent dans la zone de réduction. La chaleur issue de la zone de combustion entretient aussi les réactions endothermiques ultérieures de la zone de réduction. En dessous de la zone de pyrolyse, les gaz de combustion entre en contact avec le charbon issu de la pyrolyse de la biomasse qui les réduit en gaz combustibles. Les réactions d'oxydoréduction consomment le charbon qui se transforme au fur et à mesure en cendres qui sont évacuées à travers une grille ou un sas. Cela assure la descente du combustible dans le réacteur.

Les gaz produits par ce type de réacteur ne contiennent en principe que peu de goudrons, car l'oxydation des gaz de pyrolyse y est prédominante. Par contre à la sortie du réacteur, le gaz est assez chargé de particules fines de charbon non converti et de cendres [11].

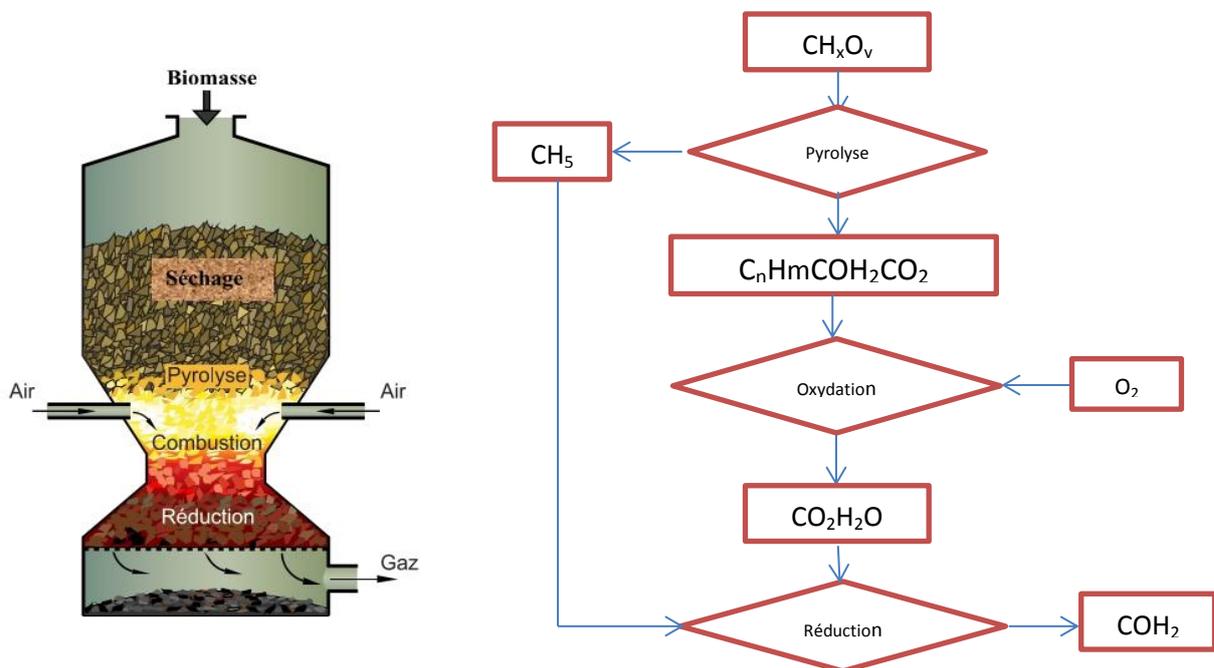


Figure 3 : Principe d'un gazéifieur à lit fixe co-courant [12].

ii. Propriétés du gaz produit par gazéification

Le gaz issu de la gazéification de la biomasse utilisant l'air comme agent gazéifiant, contient essentiellement les composés chimiques suivant : le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO_2), le dihydrogène (H_2), la vapeur d'eau (H_2O), le méthane (CH_4), l'azote (N_2),

les composants gazeux carbonés (C_nH_m) et des goudrons. Les proportions de chacun de ces composés chimiques dans le gaz varient en fonction de plusieurs paramètres. Ces paramètres sont essentiellement : La composition chimique de la biomasse, la nature et le débit de l'agent gazéifiant, la température et la technologie de gazéification. Le pouvoir calorifique du gaz varie aussi en fonction des paramètres précédemment cités. Il peut être mesuré à l'aide d'un calorimètre ou estimé avec la formule suivante :

$$PCI_g(\text{MJ}/\text{Nm}^3) = 0.126 \times CO(\%) + 0.108 \times H_2(\%) + 0.358 \times CH_4(\%) + 0.655 \times C_nH_m \quad [13].$$

Où $CO(\%)$, $H_2(\%)$, $CH_4(\%)$, C_nH_m ($C_nH_m = C_2H_2 + C_2H_4 + C_2H_6$) Représentent les proportions volumiques des composants du gaz de synthèse. L'agent gazéifiant influe sur la valeur du PCI du gaz produit. L'utilisation de l'air comme agent gazéifiant tend à faire baisser le PCI du gaz, du fait de la forte proportion d'azote dans le gaz. Le PCI du gaz obtenue varie de 3 à $6\text{MJ}/\text{Nm}^3$. [14]

iii. Applications des gazogènes à co-courant

La gazéification présente un potentiel considérable pour la valorisation thermochimique de la biomasse. Grâce au développement des énergies renouvelables, la gazéification a bénéficié d'une importante évolution technologique due aux travaux de recherche des meilleures institutions mondiales œuvrant dans le domaine des énergies renouvelables. Cette avancée technologique a ouvert la voie à plusieurs applications pertinentes de la gazéification dans la production d'énergie. Les usages les plus courants de la gazéification à co-courant sont la production directe de chaleur et la production d'électricité ou la cogénération.

❖ La production directe de la chaleur

La gazéification est le plus souvent utilisée pour la production de chaleur grâce à la combustion directe du gaz produit dans un foyer ou une chaudière. La chaleur produite par le gazéifieur sert pour les chauffages domestiques ou collectifs, la transformation agroalimentaire (séchage, cuisson), les procédés industriels qui requièrent de la chaleur. Les figures 3 et 4 illustrent bien le principe de l'application thermique de la biomasse.

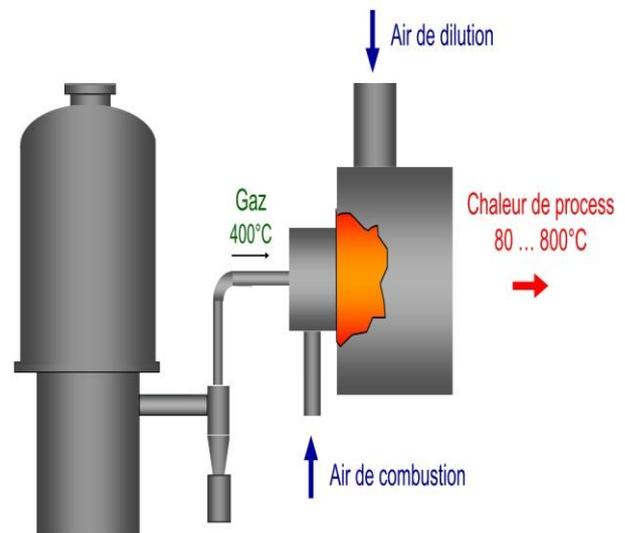
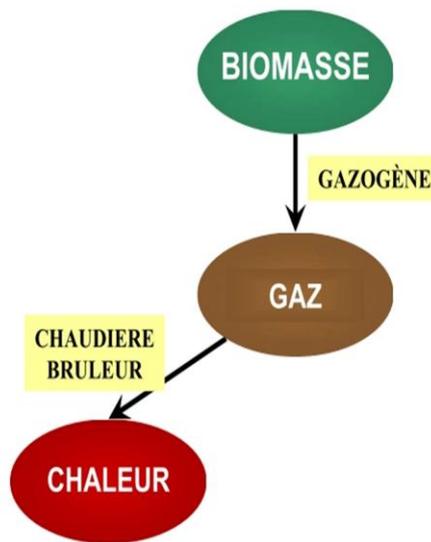


Figure 4 : Gazéifieur à Application thermique [14] *Figure 5* : Application thermique de la gazéification [14]

Les rendements obtenus par la production directe de chaleur sont les meilleurs obtenus dans ce procédé et varient souvent entre 70% et 95%. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il n'est pas nécessaire de refroidir le gaz ou de condenser les goudrons avant l'utilisation. Les technologies dans le domaine de la production de chaleur sont conceptuellement simples, facile à optimiser, conviennent à la plupart des biomasses et sont parfaitement maîtrisées. En plus, l'investissement pour la réalisation d'installation de gazéification pour la production directe de chaleur est relativement abordable. On trouve également ces gazéifieurs à différents échelles selon les besoins de l'application. La puissance thermique de ces gazéifieurs varie souvent entre 0.5 à 5 mégawatts.

Les applications directes de la production de cette chaleur sont : séchage des denrées alimentaires, séchage de bois d'œuvre, calcination, activation de produit...

❖ **La production d'électricité et la cogénération.**

L'utilisation de la gazéification dans la production d'électricité est plus récente que la production directe de chaleur. Cette technologie est toujours en pleine évolution, même si elle est assez bien maîtrisée (voir figure 5).

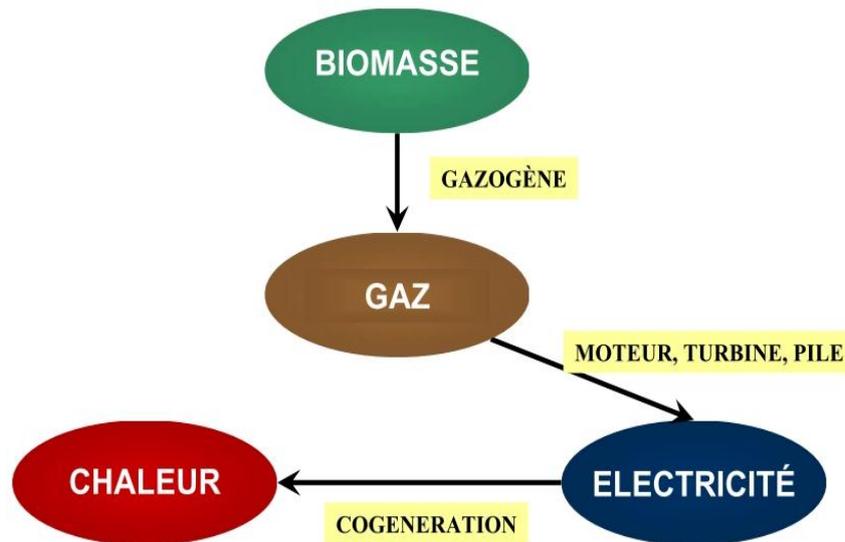


Figure 6 : Application thermique de la gazéification pour la production d'électricité [14]

Le principe de la production d'électricité à l'aide d'un gazéifieur consiste à convertir de la biomasse en gaz dans un réacteur approprié puis introduire ce gaz dans un moteur ou une turbine à gaz à combustion couplé à un alternateur. Une pile à combustible haute température (de type SOFC ou MCFC par exemple) peut également être utilisée à la place d'un moteur à combustion interne, mais cette option technologique est encore au stade de recherche/développement.

De plus en plus, les constructeurs de gazéifieurs produisant de l'électricité ont intégré le concept de la cogénération électricité/chaleur dans leurs modèles les plus récents. Le concept de cogénération à partir de la gazéification de la biomasse est représenté sur la figure ci-contre

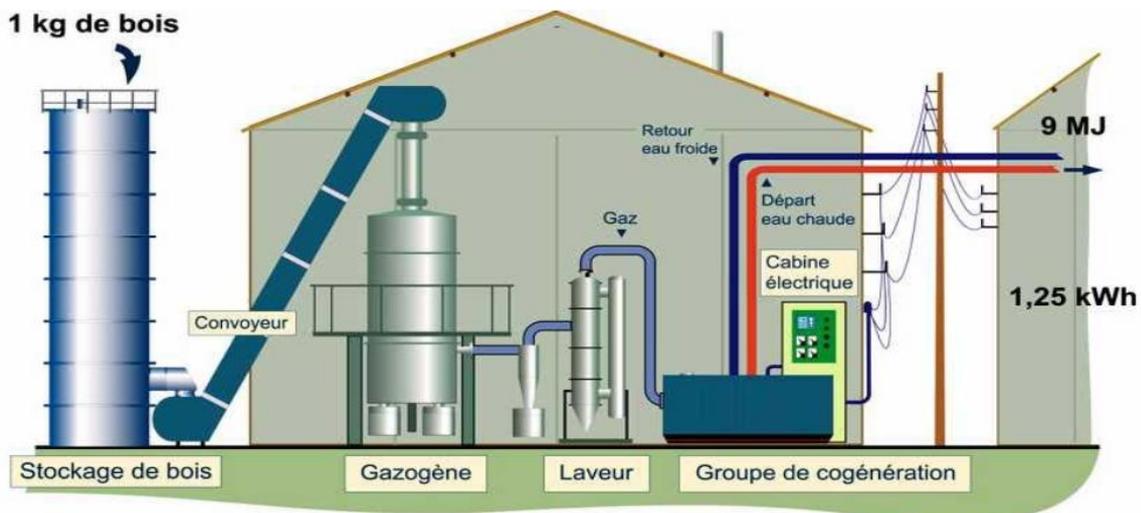


Figure 7 : Schémas d'une centrale de gazéification à cogénération [14]

Grâce à ce concept, le rendement énergétique des gazéificateurs a été amélioré. La chaleur est récupérée durant les opérations de traitement de gaz et au niveau des moteurs thermiques grâce à des échangeurs de chaleur. Cette chaleur est généralement transmise à l'eau et est utilisée pour le chauffage.

2. Quelques réacteurs pilotes de gazéification de biomasse co-courant existants à travers le monde.

Ces dernières années, différents réacteurs expérimentaux ont été développés par l'étude de la gazéification de biomasse en lit fixe co-courant. Ils sont recensés dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Installations pilotes de gazéification de biomasse en lit fixe co-courant recensées.

Auteur / Constructeur	Année	Puissance entrée	Combustible	Agent gazéifiant	PCI gaz (MJ/Nm ³)
Etat actuel : pilote de recherche					
<i>THOMAS KOCH ENERGI [5]</i>	2000	250 KW th	plaquettes forestières	Air	NP
<i>MARTEZO-TOUILLET [5]</i>		58,3-67,4 KW th	plaquettes des bois		4,69-4,99
<i>GEB-UCL / F. Bourgois [5]</i>	1998	500 KW th	plaquettes forestières	Air	5,3
<i>Chao Gai, Yuping Dong [13]</i>	2012		Paille de Maïs	Air	5.39
<i>Barrio [15]</i>	2000	30 KW th	Granulés		4,9
<i>Jayah [16]</i>	2003	80 KW th	Plaquettes forestières		NP
<i>Zainal [17]</i>	2002	65 KW th	plaque forestières		5,3
Etat actuel : Commercial					
<i>G.M Satyanarayana / AEW [5]</i>	1990	5-500 KWth	Plaquette de bois		NP
<i>Xylowatt, DASAG [5]</i> <i>IISc,</i>	1996	330 KW th	Plaquette de bois	oxygène de l'air	4-5
Etat actuel : en fonctionnement					
<i>MARTEZO [5]</i>	1985	100 KW	déchets de l'entreprise		NP
<i>EVN/ U. Rehling [5]</i>	1998	400KW th + 200 Kwe	Plaquettes de bois		3,85-5,62

NP : non précisé

- ❖ Etudes paramétriques existantes sur quelques installations de gazéifications à travers le monde.

a. Le Groupe Energie Biomasse-Université Catholique de Louvain (Belgique)

Les procédés développés par GEB-UCL sont basés sur le concept de la cogénération par gazéification en procédé à lit fixe co-courant. Ils sont équipés d'une alimentation continue par sas, d'un allumage automatique et d'un préchauffage de l'air de gazéification. Les cendres sont récupérées dans un container situé sous le foyer de gazéification.

❖ *Matière première utilisée*

GEB -UCL utilise diverses matières premières pour alimenter les gazogènes : taillis à courte rotation, écorce, charbon de bois, plaquettes de bois, sciure. Cependant, les plaquettes de taillis à courte rotation sont la source de biomasse la plus utilisée. Dans tous les cas la matière première doit être séchée et conditionnée pour respecter les critères suivants :

- humidité inférieure à 20 % ;
- taille de 2-10cm ;
- cendre inférieure à 10% du poids sec ;
- densité 250 Kg/m³.

❖ *Production chaleur et/ou électricité*

Le gaz produit est valorisé dans un groupe de cogénération produisant de l'électricité et de la chaleur. L'électricité peut être consommée localement ou envoyée sur le réseau. La chaleur produite peut être utilisée dans un processus industriel, pour le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude sanitaire. GEB-UCL a développé deux types d'installations de cogénération avec des gazogènes couplés à des moteurs à gaz ou dual diesel-gaz.

- La version Ttcr-GAZEL d'une puissance de 150 kWe + chaleur.
- Une nouvelle version appelée REGAL d'une puissance de 300 kWe et 550 kWth est en préparation.

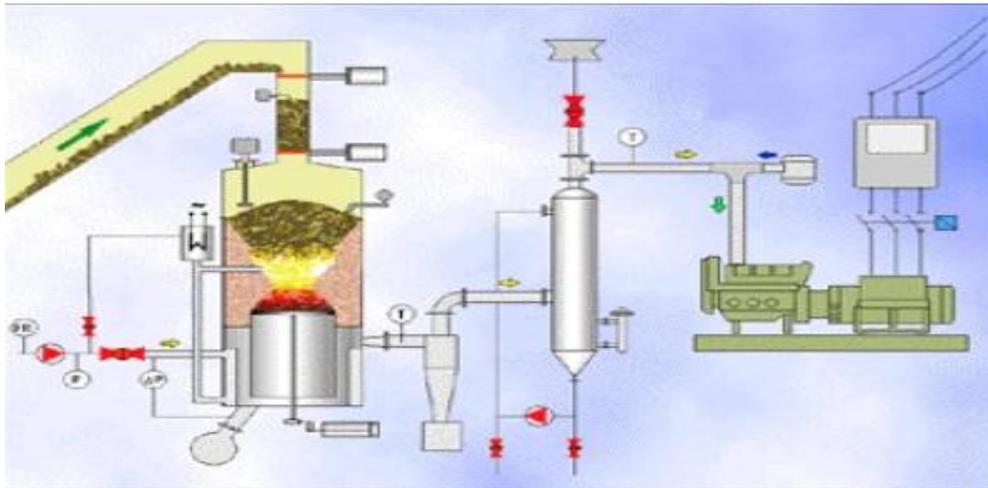


Figure 8 : Représentation schématique de l'installation Tcr-GAZEL développée par GEB-UCL [16]

❖ *Bilan matière – Energie*

Le rendement du gazogène Tcr-GAZEL est de l'ordre de 75 % et le rendement du groupe moteur est de 37% soit un rendement électrique PCI maximum de 27%.

Le rendement global attendu de la version REGAL est de 75 % (25 % électrique, 50% chaleur).

❖ *Qualité des gaz*

Les caractéristiques des gaz produits sont données dans le tableau suivant:

CO	CH4	CO2	H2	N2	PCI gaz sec
25%	2,50%	10%	14%	50,50%	5,3 MJ/Nm3

b. Etude expérimentale de la Gazéification de la biomasse non ligneuse dans un gazéifieur à lit fixe co-courant (Chine) [13]

Une étude chinoise sur la gazéification de la biomasse non ligneuse plus précisément de la paille de maïs dans un gazéifieur à lit fixe co-courant sous la pression atmosphérique utilisant l'air comme agent oxydant a attiré notre attention. Elle rapporte l'influence des conditions de fonctionnement sur le rendement de gazéification en fonction des profils de température du réacteur de gazéification, la distribution de la composition du gaz produit et la libération de composés soufrés. En outre, les caractéristiques de gazéification ont été évaluées en termes de pouvoir calorifique inférieur (PCI), de rendement du gaz, de concentration en goudrons dans le gaz brut.

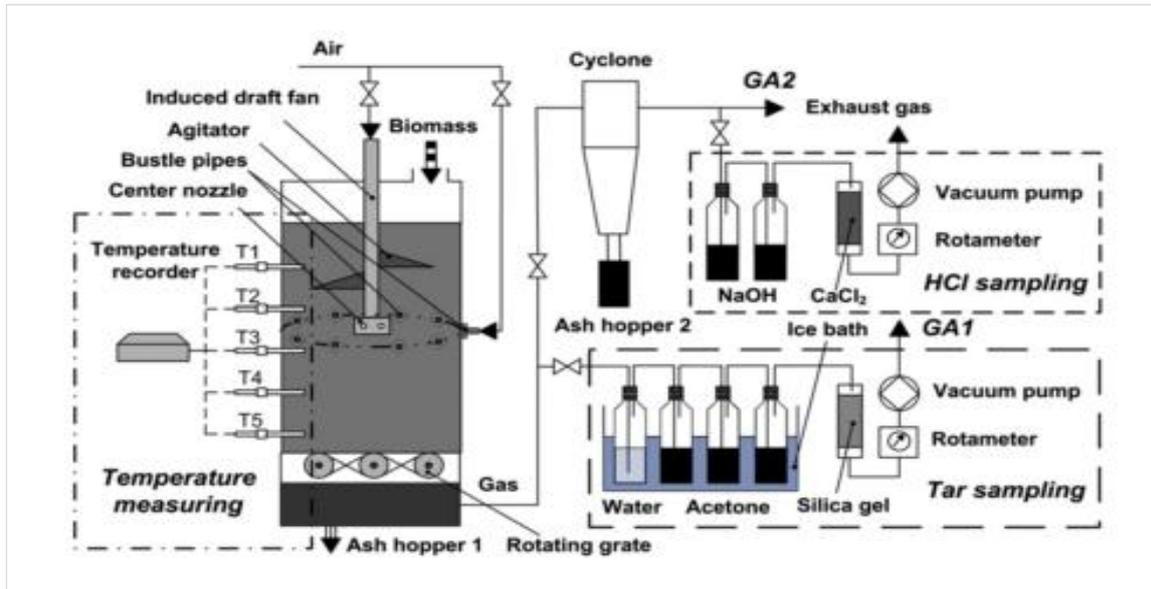


Figure 9 : Schéma du dispositif expérimental de la gazéification co-courant [13]

❖ Bilan matière et composition du gaz

Le rendement du gazogène est de l'ordre de 73.61% et un pouvoir calorifique optimal de 5.39MJ/Nm³, le rendement en gaz de 2.86 Nm³/kg et la concentration en goudron de 4617 mg/Nm³. Le tableau ci-après présente les résultats obtenus lors des différents tests réalisés.

Tableau 5 : Résultats expérimentaux de la composition du gaz et les caractéristiques de gazéification [13]

Run no.	Fuel feed kg/h	Air flow Nm ³ /h	Air/Fuel Nm ³ /kg	ER	Syngas composition vol., dry basis, %							Tar mg/Nm ³	LHV MJ/m ³	G _p Nm ³ /kg	η %
					H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C _n H _m ^a	O ₂	N ₂				
1	8.3	10.7	1.29	0.18	6.91	11.35	23.93	1.27	0.98	1.64	48.58	7215	2.69	1.35	21.17
2	8.8	12.9	1.47	0.21	8.23	13.55	20.37	1.84	1.12	1.94	51.15	6852	3.32	1.47	28.46
3	9.4	15.7	1.67	0.24	10.92	16.72	16.48	2.98	1.27	1.63	52.73	6321	4.43	1.62	41.85
4	9.1	17.8	1.96	0.28	12.78	18.99	13.11	3.96	1.75	1.38	53.49	5686	5.30	1.81	55.94
5	9.5	21.4	2.25	0.32	13.51	19.81	11.58	3.72	1.62	0.81	55.67	5125	5.39	2.14	67.26
6	9.6	24.3	2.53	0.36	12.26	17.97	13.82	3.65	1.54	1.22	56.88	4873	4.99	2.53	73.61
7	9.9	28.5	2.88	0.41	10.58	15.16	18.41	1.57	1.31	1.64	59.71	4617	3.69	2.86	61.54

^a C_nH_m = C₂H₂ + C₂H₄ + C₂H₆.

Les Etablissement Touillet, concessionnaire Mercedes à Poitiers, développent depuis une quarantaine d'années un gazéifieur, sous la dénomination de Martezo. Il s'agit d'un gazogène en lit fixe à co-courant avec rétreint au niveau de la zone de gazéification. Plusieurs modèls

sont proposés de 70 à 450 kW mais les essais menés sur ce dernier type n'ont jamais été validés.

❖ *Matière première utilisée*

Diverses matières premières pour alimenter les gazéificateurs ont été testées. Cependant, les plaquettes de bois constituent l'approvisionnement recommandé et le plus utilisé. Dans tous les cas la matière première doit être séchée et conditionnée pour respecter les critères suivants :

- humidité inférieure à 20 %
- taille de 4-10cm
- teneur en cendres inférieure à 10% du poids sec

❖ *Production chaleur et/ou électricité*

Le gaz produit est valorisé dans un groupe moteur soit en dual-fuel soit en allumage commandé. Les moteurs équipant les ensembles Martezo sont de marque Mercedes ou Caterpillar. Sur certaines installations la chaleur produite par le groupe (échappement et refroidissement) est récupérée pour être utilisée dans un processus industriel, pour le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude sanitaire.

❖ *Bilan matière – Energie*

Le rendement du gazogène est de l'ordre de 70 % et le rendement du groupe moteur est de 30 % soit un rendement électrique PCI maximum de 21%. Ces chiffres varient en fonction de la matière première et des conditions de fonctionnement. Le tableau ci-après présente les résultats obtenus lors de tests réalisés par EDF en Août 1984 sur des unités Martezo

Tableau 6 : Résultats obtenus lors de tests réalisés par EDF sur des unités Martezo [15]

<i>Gazéifieur</i>	<i>Martezo 1200</i>	<i>Martezo 100</i>
Moteur	Mercedes 118 KW	Mercedes 118 KW
Combustible	épicéa	Bois densifié
Débit combustible (Kg/h)	65	75
Humidité combustible(%)	7,6	13,3
PCI combustible (MJ/Kg)	17,17	15,33
débit gaz moteur Nm ³ /h	190	174
PCI gaz sec (MJ/Nm ³)	4,69	4,99
Durée du test(h)	3	2
Air gazéification/air stœchiométrique	0,4	0,35
Puissance moteur(KW)	67,4	58,3
Rendement gazéification (gaz sec/bois humide) (%)	74,1	66,4
Rendement moteur(%)	29,3	27,4
Rendement total (bois humide) (%)	21,7	18,2
Consommation spécifique (Kg bois/KWe)	0,96	1,29

❖ *Qualité des gaz*

Les caractéristiques des gaz produits lors de ces tests sont données dans le tableau suivant:

% gaz sec	CO	CH4	CO2	H2	N2
Martzo 1200	17,20	0,90	12,20	17,50	46,90
Martzo 100	17,3	2,5	13,4	13,4	45,2

d. IISc/DASAG/Xylowatt (Indian Institute of Science -Dasad Energy Engineering ltd) [5]

Les gazogènes développés par IISc-DASAG sont tous du type lit fixe à co-courant. IISc-DASAG est un travail de coopération dans le domaine de la gazéification entre deux Instituts de recherches Suisse et Indien. Ces gazogènes ne présentent pas de particularité si ce n'est le mode de décendrage qui est une adaptation de système de gazéification de charbon de bois. En effet, les cendres produites sont évacuées par le bas du réacteur dans un container contenant de l'eau. L'agent oxydant est l'oxygène de l'air. L'alimentation en air puis la circulation du gaz généré est assurée par un ventilateur extracteur ou par le moteur.

❖ *Matière première utilisée*

La matière première utilisée est exclusivement du bois sous forme de plaquettes de 2-5 cm, avec un taux d'humidité inférieur à 20%, un taux de cendre proche de 2% et une densité supérieur à 250 kg/m³.

❖ *Production chaleur et/ou électricité*

Les gazogènes sont utilisés pour produire de l'électricité, avec des moteurs duals en Inde et des moteurs fonctionnant seulement au gaz en Suisse.

❖ *Bilan matière – Energie*

Il est très difficile d'obtenir des indications très précises sur IISc-DASAG. En effet les sources de renseignement sont nombreuses entre les différents instituts et sociétés basées en Suisse et en Inde et les informations techniques ne sont pas toujours très cohérentes.

Les informations recueillies présentent les résultats suivants : avec des gazogènes d'une puissance de 330 KWth PCI en entrée, les installations fonctionneraient avec un rendement thermique de 75% et un rendement électrique supérieur à 25 %. En effet l'installation en Suisse fournirait 60 KWe soit un rendement de près de 19 % alors que celle en Inde fournirait avec le même gazéifieur entre 60 et 100 KWhe soit un rendement entre 19 et 30%

❖ *Qualité des gaz*

Les données sur la qualité des gaz en sortie de gazogène sont regroupées dans le tableau suivant :

CO	CH4	CO2	H2	N2	Goudrons mg/Nm³	Poussière mg/Nm³	PCI gaz sec
18%	2%	15%	18%	34%	300	50	4-5 MJ/Nm3

III. MATERIELS ET METHODES

La détermination des performances du prototype de gazéifieur est une étape importante de notre étude. Elle permet d'obtenir des données sur le fonctionnement du gazéifieur puis d'établir le bilan énergétique et le bilan des émissions sur la combustion théorique des gaz produits de l'installation énergétique à partir des différentes biomasses. A partir de l'analyse de ces données, il sera alors possible de tirer une conclusion quant à la performance du gazéifieur.

1. Description et fonctionnement du gazéifieur

Le gazogène sur lequel porte notre étude est un gazéifieur qui a été conçu lors d'un partenariat entre le laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB) du 2IE et le constructeur local de gazogène ISOMET. Le modèle de ce gazogène représenté sur la figure 10 est un gazéifieur à lit fixe à fonctionnement co-courant (downdraft).



Figure 10 : Unité pilote de la gazéification vue de la plateforme LBEB 2IE (Photo 2ie)

Le combustible solide (Biomasse) est introduit dans la partie supérieure du réacteur descend par gravité pour ensuite être gazéifiée au bas du réacteur. L'air nécessaire au processus de conversion est également introduit dans la partie supérieure du réacteur, d'où il traverse tout le lit de biomasse en phase de séchage ou de pyrolyse jusqu'à la zone de combustion. Au fur et à mesure de la gazéification, les cendres sont évacuées par le bas du réacteur. Le gaz

produit à l'intérieur de la chambre de combustion est canalisé vers le brûleur après avoir traversé par un séparateur de particules. Le gazéifieur possède deux souffleurs d'air dont l'un assure l'alimentation de la réaction en air et l'autre alimente le brûleur en air afin d'améliorer la combustion du gaz produit.

Le gazéifieur, sur lequel est basé notre étude est représenté sur la figure 11. Il est subdivisé en trois grandes parties :

- 1- La zone de séchage et de pyrolyse de la biomasse ;
- 2- La chambre de gazéification du charbon ;
- 3- les conduites de circulation de gaz et d'air chaud.

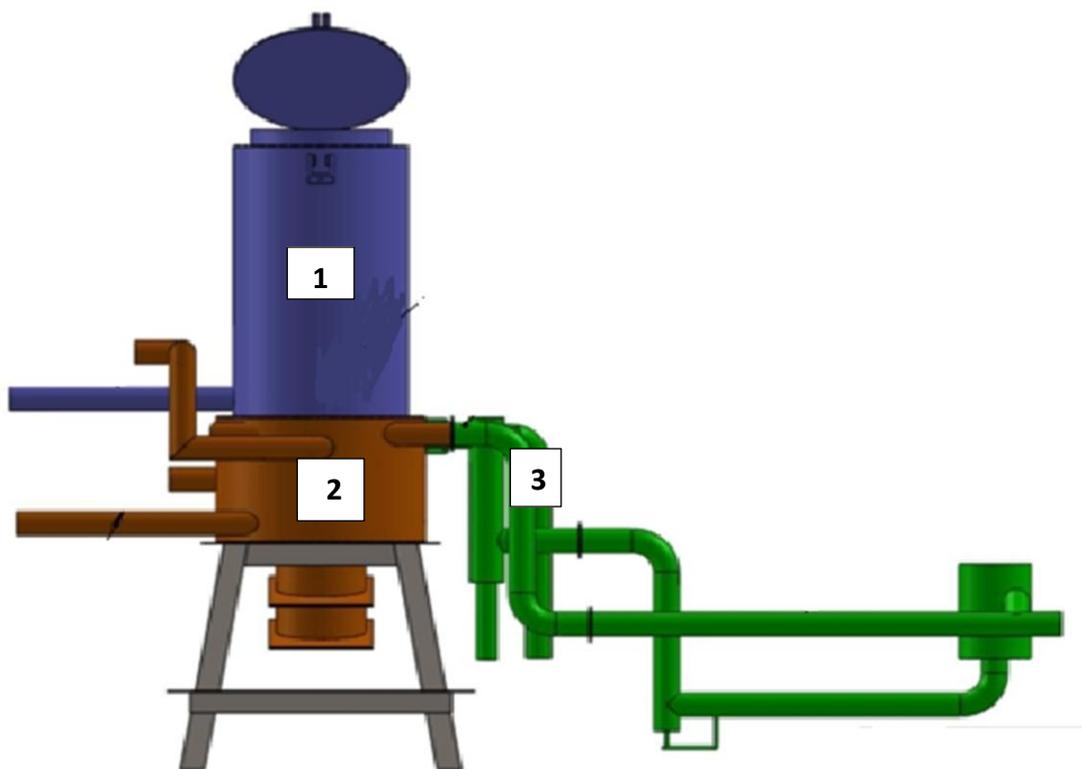


Figure 11 : Schéma du gazéifieur co-courant

a. La zone de séchage et de pyrolyse de la biomasse

La zone de séchage et de pyrolyse du gazéifieur représentée sur la figure 3 est située au niveau de la partie supérieure du réacteur. Elle est constituée d'un

- ✓ couvercle qui permet l'ouverture et la fermeture du gazogène. C'est par là que la biomasse est introduite où elle tombe par gravité dans la chambre de réaction. Le

couvrete est fermé durant le fonctionnement du gazéifieur et est ouvert pour l'alimentation de la biomasse ou pour des travaux de maintenances du gazéifieur.

- ✓ La zone de séchage et de pyrolyse est construite à l'aide de deux cylindres coaxiaux de diamètres différents. Le cylindre intérieur a un diamètre de 40 cm et une hauteur 120 cm. Le cylindre extérieur a lui un diamètre de 50 cm pour une hauteur de 100 cm. Le séchage, la pyrolyse et probablement la combustion ont lieu à l'intérieur du cylindre intérieur. L'espace de 5 cm entre les deux cylindres joue le rôle d'isolant et de passage pour l'air introduite dans le réacteur pour la gazéification. Lors du fonctionnement l'air circulant dans cette espace se préchauffe au contact avec la paroi du cylindre intérieur dans lequel est située la zone de combustion. Cet air préchauffé contribue au séchage de la biomasse. Le diamètre du cylindre intérieur a une influence directe sur la puissance du gazéifieur ; celle-ci augmente avec le diamètre.

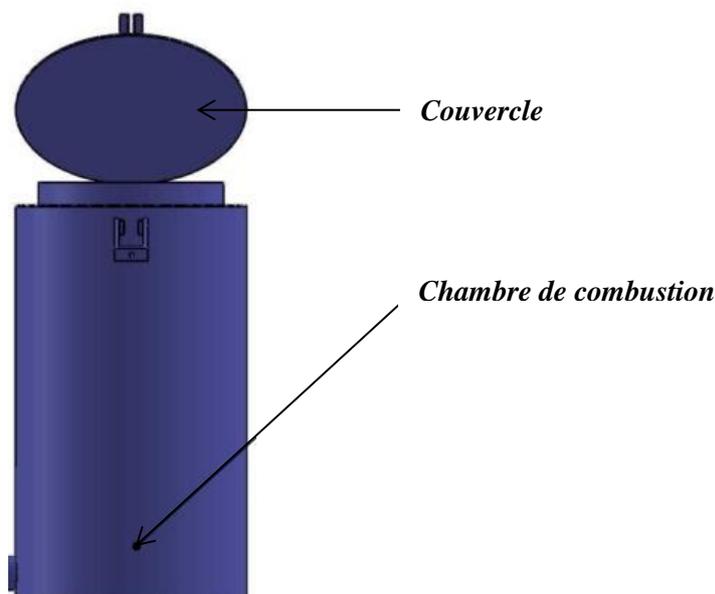


Figure 12 : Schéma de la zone de séchage et de pyrolyse du gazéifieur

b. La chambre de gazéification

La chambre de gazéification est la partie où les réactions de réduction des gaz de combustion ou de gazéification du charbon s'opèrent. Elle contient le charbon résiduel issu de la combustion de la biomasse dans la chambre de combustion. Les gaz de combustion traversent le lit de charbon où ils sont réduits en monoxyde carbone CO et en hydrogène H₂, composants

essentiels du gaz de synthèse. Elle est composée de plusieurs parties (voir figure 4) jouant chacune un rôle bien précis.

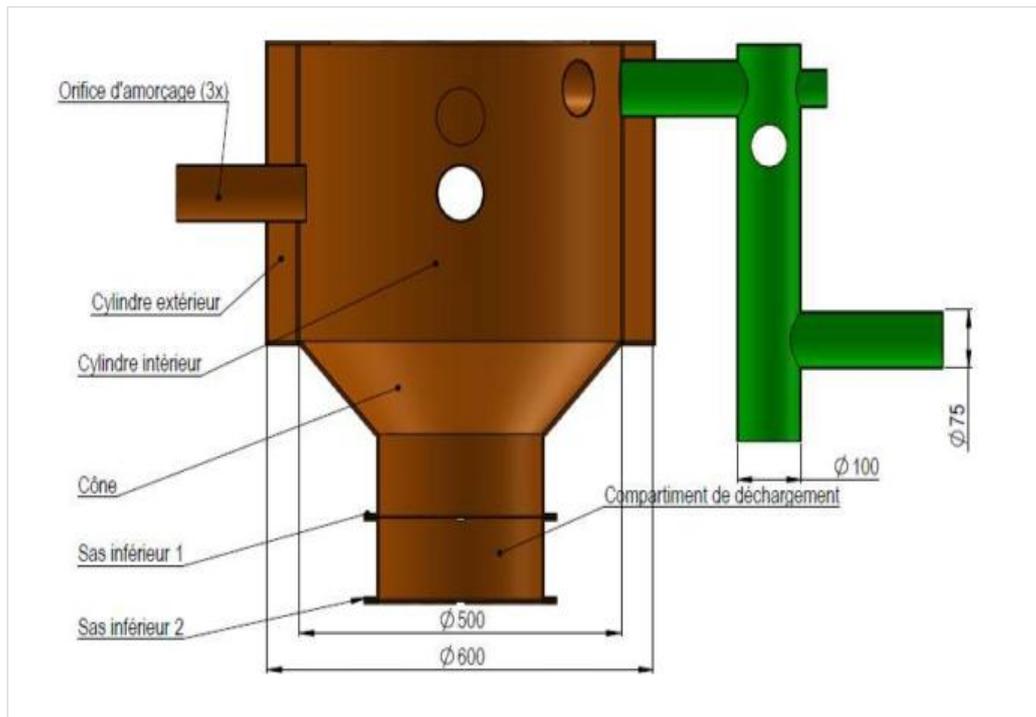


Figure 13 : Schéma de la chambre de la gazéification du charbon

La partie conique se termine par un *double sas* destiné à décharger les cendres et le charbon non converti à la fin du processus. Le *cylindre intérieur* du réacteur communique directement avec la chambre de gazéification. Il contient le lit de charbon d'où se dégage le gaz combustible qui remonte à travers l'espace entre les cylindres intérieurs et extérieurs de la chambre de gazéification pour rejoindre les conduites de gaz. De l'air est également soufflé dans cette paroi où il se préchauffe avant de rejoindre le brûleur où il s'additionne avec le gaz combustible afin d'en améliorer la combustion. La chambre de gazéification possède trois orifices destinés à l'amorçage de la combustion lors du démarrage de la gazéification. Le *cône* de la chambre de gazéification contient un lit de cendre ou de charbon jouant le rôle de zone morte c'est-à-dire qu'elle ne participe pas à la réaction. Cette zone est progressivement remplacée par les cendres et les charbons résiduels issus du lit de réduction. La partie conique de la chambre de réaction se termine par deux sas de décharge des résidus de gazéification. Ce système de double sas permet de décharger les résidus de gazéification en cours de processus tout en évitant les fuites de gaz durant l'opération.

c. Les conduites de circulation de gaz et d'air chaud

La figure ci-dessous représente l'ensemble des conduites formants les circuits de circulation du gaz combustible et de l'air chaud.

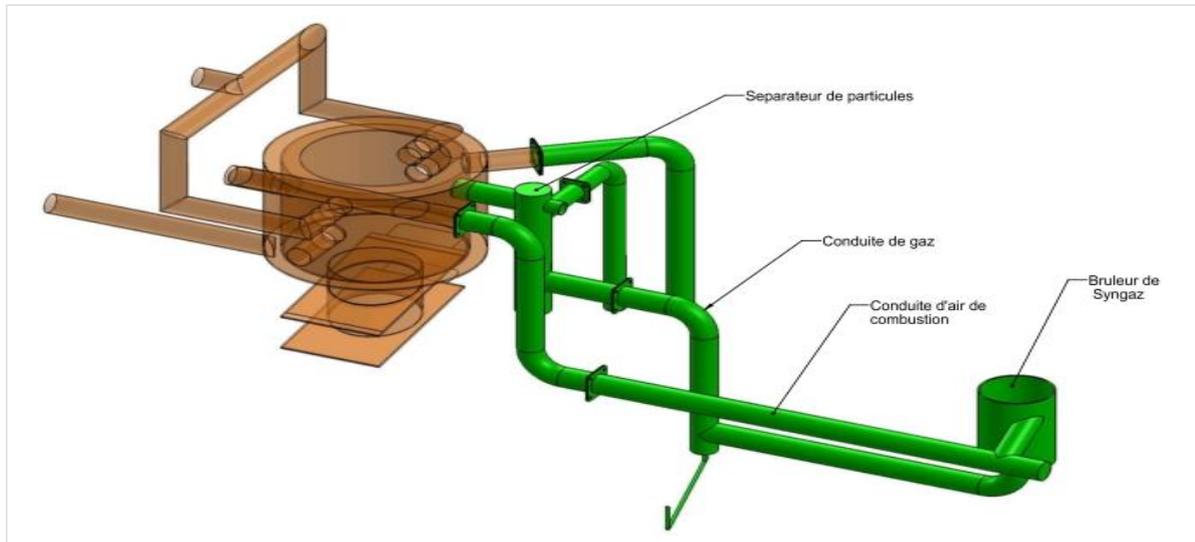


Figure 14 : Conduite de circulation du gaz combustible et d'air chaud du gazéifieur

Le gaz combustible produit dans la chambre de gazéification chemine à l'intérieur des conduites jusqu'au brûleur. Un séparateur de particules a été installé à la sortie de la chambre de gazéification afin de réduire la quantité de particules fines de charbon, de cendre et d'aérosols contenues dans le gaz.

d. Les souffleurs d'air

Pour assurer l'alimentation du gazéifieur en air, 2 souffleurs d'air centrifuges ont été installés (voir figure ci-dessous). Chacun des souffleurs joue un rôle bien spécifique dans le gazéifieur.

Le premier souffleur est le souffleur d'air qui alimente le gazéifieur. L'air est soufflé à l'intérieur de la double paroi du réacteur où il se préchauffe avant d'être injecté dans le cylindre intérieur du réacteur contenant la biomasse.

Le second souffleur est le souffleur d'air brûleur identique au précédent et qui, est installé dans le but de souffler de l'air à l'intérieur de la double paroi de la chambre de gazéification. Cet air transite ensuite à l'intérieur de la conduite d'air chaud jusqu'au brûleur.

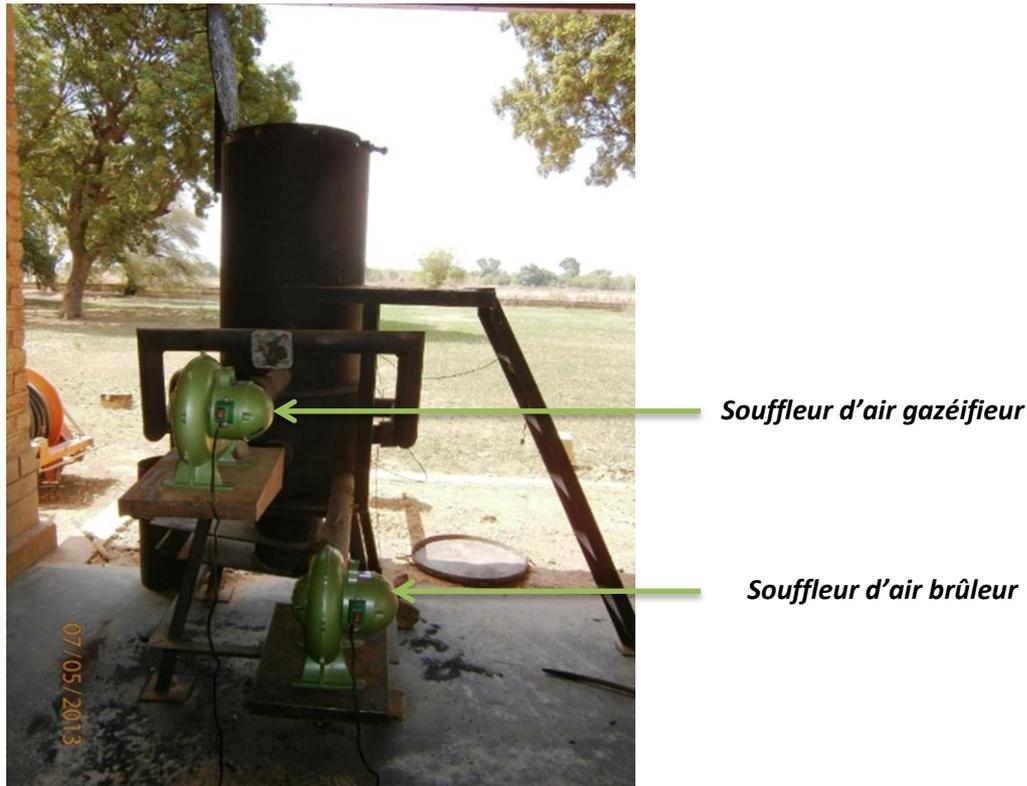


Figure 15 : Position des souffleurs sur le gazéifieur

2. Protocole de suivi expérimental

A travers nos études bibliographiques et l'expérience acquise dans l'utilisation du gazéifieur, nous avons élaboré un protocole expérimental de conduite de nos tests de caractérisation du gazéifieur. L'objectif visé par ce protocole est la réalisation des tests dans des conditions garantissant la fiabilité des données recueillis et la sécurité des personnes Ainsi que celle des équipements.

La caractérisation d'un gazéifieur consiste à l'étude du comportement de celui-ci face à la variation des paramètres de fonctionnement. Dans le cadre d'une telle étude, l'impact des paramètres de fonctionnement sur les performances du gazéifieur est analysé afin d'établir les corrélations pouvant exister entre ces paramètres et le fonctionnement du gazéifieur.

Les paramètres de variation pris en compte dans le cadre de notre étude sont les suivants :

- ✓ La nature et les caractéristiques de la biomasse utilisée dans le gazéifieur
- ✓ La composition chimique, les taux d'humidité, de goudrons et de particules. du gaz produit par le gazéifieur
- ✓ Les profils des températures du gazéifieur et du gaz durant le fonctionnement
- ✓ Les débits de l'air de gazéification et du gaz produit

Ces paramètres nous permettront de déterminer le pouvoir calorifique du gaz, la puissance et le rendement du gazéifieur ainsi que les corrélations existants entre les variations des paramètres et les performances du gazéifieur.

Les résultats issus de la caractérisation du gazéifieur peuvent être exploités de diverses manières dans notre étude, il s'agira de proposer des optimisations et améliorations du gazéifieur et réaliser un référentiel d'utilisation optimale à destinations de futurs utilisateurs du gazéifieur

a. Caractérisation de la biomasse

La balle de riz utilisée comme biomasse dans notre étude est une biomasse non ligneuse est issue du décorticage du riz utilisée dans l'alimentation humaine. L'enveloppe du riz ne subit aucun traitement ni de transformation chimique, ces propriétés chimiques sont les suivantes:

- ❖ poids : 120 kilos par m³
- ❖ taux de matière sèche 86 %
- ❖ pH : 8



La caractérisation de la biomasse à gazéifier a une grande importance pour notre étude, car Les propriétés de la biomasse influent grandement sur son comportement thermochimique et les performances de la gazéification. Nous allons procéder à l'analyse immédiate (Il s'agira de déterminer le taux d'humidité, le taux de matières volatiles le taux de cendres et le taux de carbone fixe) et à la détermination du pouvoir calorifique de la balle de riz. La caractérisation de la biomasse commence par un bon échantillonnage afin d'assurer une assez bonne homogénéité des mesures. Le tableau ci-dessous résume la méthodologie utilisée.

Type d'analyse	Echantillon	Référence(Norme)	Lieu d'analyse
Analyse immédiate	Balle de riz	AFNOR XP CENT/TS 14774-3	LBEB
Pouvoir calorifique		PA-TH-LBEB NF M 03-005	

b. Instrumentation du gazéifieur

Dans l'optique de notre étude, le gazéifieur a été instrumenté afin de recueillir les données nécessaires pour sa caractérisation. Les instruments installés sont destinés à mesurer les températures et les débits à divers points sur le gazéifieur et prélever le gaz pour l'analyse à l'aide de la chromatographie. Le tableau ci-dessous résume en détail les équipements utilisés pour les diverses mesures effectuées.

Tableau 7 : Instrumentation du gazéifieur

Equipements	Point de mesure
Thermocouples	<ul style="list-style-type: none"> ✓ zone de réaction de gazéification ✓ Sortie du gaz ✓ Point de prélèvement du gaz ✓ Sortie d'air de combustion
Point de mesure de gaz au tube de Pitot	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Entré d'air de gazéification ✓ Entrée d'air de combustion ✓ Point de prélèvement du gaz
Canne de prélèvement	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tuyau de sortie du gaz
Micro-GC	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Canne de prélèvement

L'instrumentation du gazéifieur a suivi les opérations suivantes :

- ✓ Percer et faire le taraudage des orifices destinés à recevoir les presse-étoupes pour sonde thermocouple
- ✓ Le perçage d'orifices pour les mesures de débits à l'aide du tube de Pitot, le prélèvement du gaz, et la confection de bouchons pour ces orifices.
- ✓ La confection de la canne de prélèvement et sa mise en place sur le gazéifieur conformément aux prescriptions du Tar Protocol
- ✓ Les rectifications des entrées des tuyaux recevant les souffleurs d'air (ventilateur) et la mise en place de leurs supports.

c. Mesures des températures et des débits

Pour les températures, l'unité pilote de gazéification a été équipée de quatre (4) thermocouples de type K placés sur 4 points distincts à fin de prendre des mesures de température (voir figure16). Il s'agit de la température ambiante, la température du gaz à la sortie du réacteur celle au point de prélèvement du gaz et la température d'air de combustion à la sortie du double enveloppe.

- ✓ La température ambiante donne la température du milieu dans lequel on se trouve ;
- ✓ La température du gaz à la sortie du gazéifieur permet de connaître la température à laquelle le gaz sort du gazogène (zone de réduction) ;
- ✓ La température d'air de combustion à la sortie de la double enveloppe ;
- ✓ La température des gaz de sortie (point de prélèvement d'échantillonnage du gaz), elle nous renseigne par rapport à la baisse de température dans la conduite de gaz et intervient dans le calcul du débit.

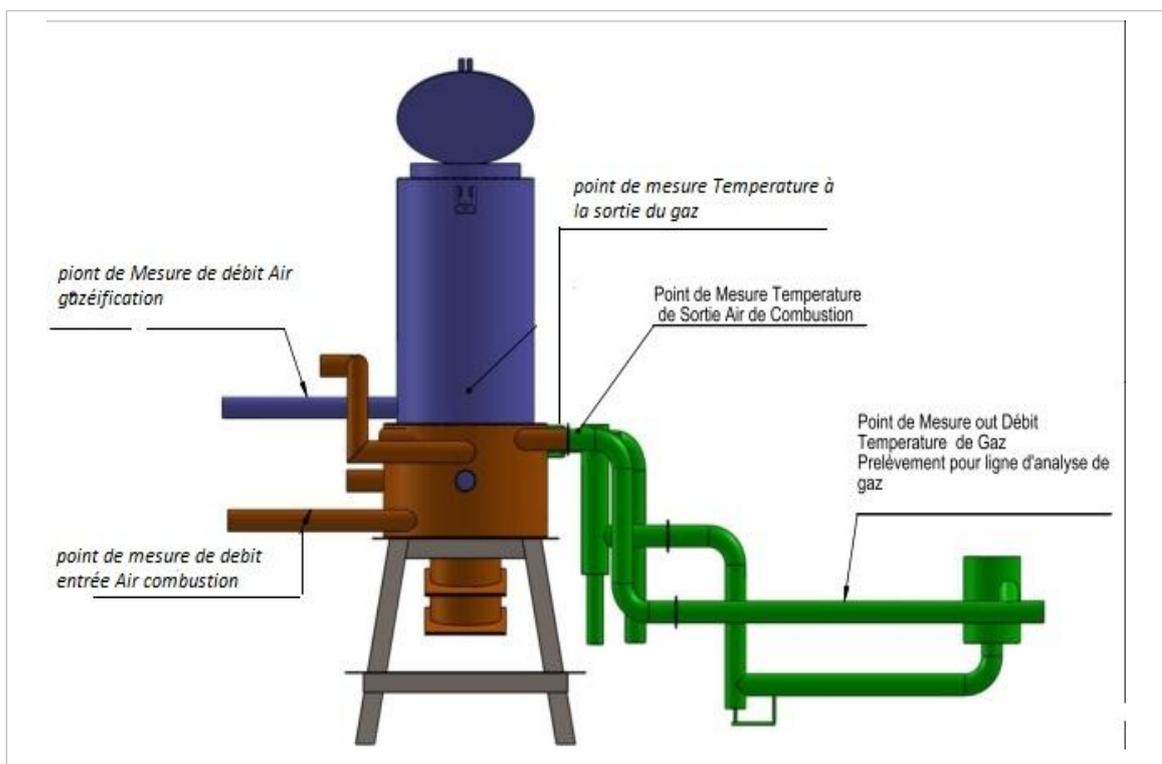


Figure 16: Point de mesure de température et de débit

Ces mesures de températures permettront de calculer avec précision les débits d'air et de gaz. Les températures sont actuellement enregistrées par l'opérateur à l'intervalle de 5 min.

A l'instar de la température, les débits sont également mesurés sur le gazéifieur à trois endroits différents (voir figure 16). Les débits mesurés sont : le débit d'air de gazéification, le débit de gaz au point de prélèvement, et le débit d'air de combustion.

Tout comme les températures, les débits sont mesurés manuellement à l'aide du tube de Pitot. La grandeur mesurée à l'aide du tube de Pitot est la pression différentielle générée par l'écoulement d'un fluide. Cette pression différentielle est ensuite utilisée avec les données de températures ou la composition du gaz pour calculer les débits.

❖ *Méthode de calcul de débit à partir de la pression partielle relevée*

La pression partielle (ΔP) est obtenue par mesure durant le test à l'aide du tube de Pitot et de l'appareil de mesure manométrique ISOSTACK G4. Une moyenne des valeurs de ΔP est calculée pour chaque point de mesure au centre du conduit (zone de vitesse maximale). Selon les valeurs de température relevées à chaque point de mesure de débit la vitesse maximale correspondante est calculée.

NB: Dans une conduite circulaire, la plus grande vitesse d'écoulement est mesurée au centre de la section

$$V(O) = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P \times (273 + T)}{273 \times \sum(\rho_i \times G_i)}} \quad [18]$$

$V(O)$: Vitesse maximale m/s

ΔP : la pression partielle en Pa

T : Température en °C

$\rho \times G_i$: Masse volumique en Kg/m³

La vitesse calculée doit être corrigée pour obtenir une vitesse moyenne dans la section en considérant que le régime d'écoulement est laminaire.

D'après la loi de PRANDTL dans le cas d'une conduite circulaire le coefficient de correction ramenant la vitesse max à la vitesse moyenne est de 0,811

$$V = 0,811 * V(O) \quad [18]$$

V : Vitesse moyenne en m/s

Le débit est donc calculé à partir de la formule suivante :

$$Q \text{ (Nm}^3\text{/min)} = 60 \cdot V \cdot (D/2)^2 \quad [18]$$

D : diamètre de la conduite en m

d. Dispositif de la ligne de prélèvement de gaz et d'analyse

La caractérisation du gaz de gazéification nécessite la mise en place d'une ligne de prélèvement et d'analyse du gaz. Le prélèvement des gaz se fait à l'aide d'une ligne d'échantillonnage (figure 16) conçue sur la base de protocoles internationaux d'échantillonnages normalisés ("tar Protocol"). Cette ligne est constituée d'une canne d'échantillonnage, d'un filtre à particules, d'un condenseur et d'un dispositif de contrôle des conditions de prélèvement et de mesure de débit.

Les équipements de la ligne de prélèvement et d'analyse sont énumérés dans le tableau ci-après.

Equipements	Désignations	Quantités	Caractéristiques techniques
<i>Prélèvement et Nettoyage du gaz</i>	Pompe à gaz ISOSTACK G4	1	Débit : 0 à 6m ³ /h
	Bac de condensation igloo	1	Plage de température : +40 à -10°C Volume de flacon : 500ml
	Flacons laveurs	4	Volume : 500 ml
	Canne de prélèvement	1	Diamètre 10 mm, longueur 25 cm
	Mini Chiller	1	Température max de prélèvement : 20°C
	Dessiccateur à silice gel	1	Volume : 1000 ml
<i>Analyse du gaz</i>	Micro GC + ordinateur d'acquisition	1	Marque VARIAN 2 colonnes d'analyse (H ₂ , CO ₂ , N ₂ , CH ₄ , CO, C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , O ₂)

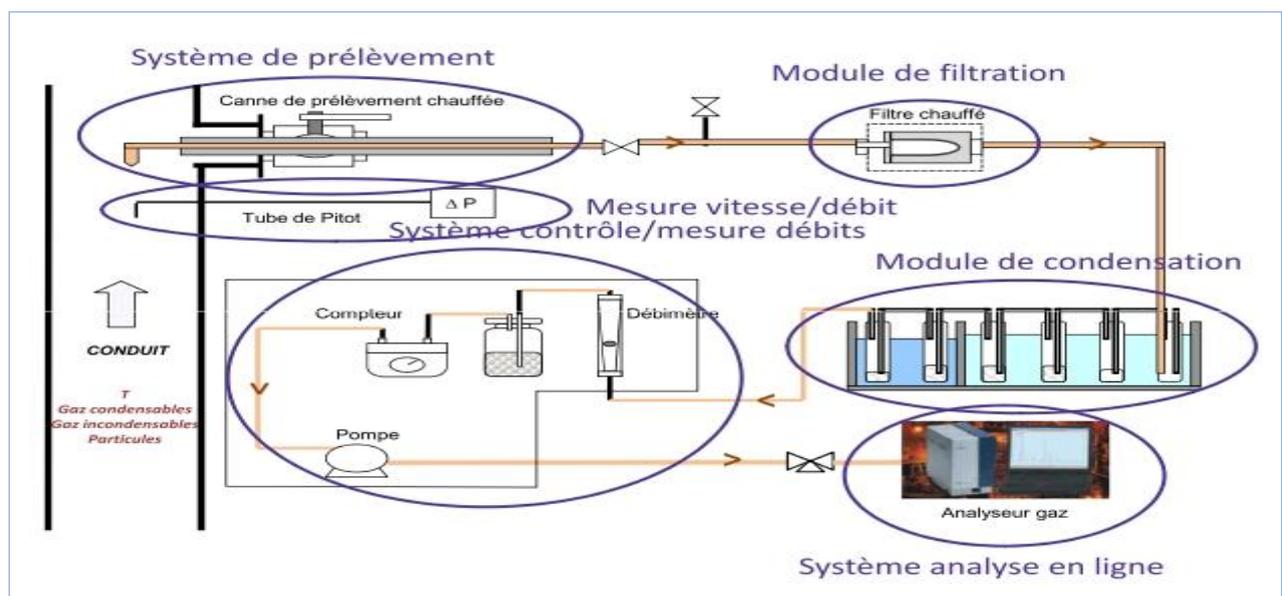


Figure 17 : Schéma de principe de la ligne d'échantillonnage de gaz

✓ La canne de prélèvement (1)

Le diamètre intérieur de la canne est de 8mm. Elle est tracée à l'aide de résistances électriques afin de pouvoir maintenir les parois à une température de 300°C. Le chauffage de la canne permet ainsi de maintenir les fumées à une température supérieure à la température de condensation de l'eau et des gaz condensables.

✓ Le filtre à particule

Chauffé à une température de 300°C, il permet de collecter les particules et de s'affranchir des problèmes liés à la condensation (colmatage). La masse de particules est déterminée par pesée des filtres avant et après prélèvements après séchage à l'étuve à 160°C pendant 12 heures.

✓ Le système de condensation

Il est constitué de trois barboteurs plongés dans un bain maintenu à une température située entre 0°C et -10°C au moyen d'un cryostat. Ce module permet de collecter toute la partie condensable des gaz échantillonnés avant leur analyse en laboratoire (eau et composés organiques condensables).

✓ L'ensemble contrôle/mesure des débits (4)

Cet ensemble est constitué de :

- **Une pompe à membrane**, de capacité maximale 55 l/min, qui va permettre l'aspiration à travers toute la ligne.
- **Un débitmètre à flotteur** permettant de contrôler, à chaque instant, le débit volumique prélevé. Ce débit est ajusté de manière à rester constamment en condition d'isocinétisme.
- **Un compteur volumétrique** qui permet de connaître le volume de fumée prélevé pendant toute la durée de l'échantillonnage.

En sortie du dernier module de la ligne d'échantillonnage, les gaz sont orientés vers un analyseur de gaz en continu par chromatographie en phase gazeuse(Micro-GC)

✓ Micro -GC

L'analyse des gaz incondensables est réalisée en continue par chromatographie en phase gazeuse. L'appareillage utilisé permet l'analyse en ligne des gaz suivants : azote, hydrogène, oxygène monoxyde de carbone, méthane, dioxyde de carbone, éthane, éthylène.

- *Description du Tar Protocol*

L'analyse du gaz de gazéification a pour but de déterminer sa composition chimique et ainsi calculer son pouvoir calorifique. L'analyse du gaz est faite suivant un protocole établi connue sous le nom de «tar protocole».

L'application du tar protocole dans notre étude permettra d'analyser en temps réelle la composition du gaz de gazéification et de mettre en évidence les variations de la qualité du gaz suivant les paramètres défini dans les objectifs.

Le tar protocole nécessite l'utilisation d'une ligne de prélèvement et d'analyse similaire à celle mise en œuvre pour notre étude. Cette ligne est destinée au traitement du gaz afin de séparer les particules et les goudrons condensables du gaz avant son analyse par un chromatographe. Ces particules et goudrons feront l'objet d'une analyse séparée visant dans notre cas, à les quantifier de manière globale.

Le prélèvement du gaz doit se faire dans les conditions décrites ci-après :

- ✓ La sonde de prélèvement du gaz doit être placée dans une zone où le gaz s'écoule sans turbulence, le phénomène pouvant provoquer un prélèvement sélectif des particules.
- ✓ Elle est placée de telle sorte que le prélèvement se fasse au centre de la conduite et en à un point situé sur une section droite de la conduite représentant plus que cinq fois le diamètre de la conduite.
- ✓ Le gaz doit être aspiré à une vitesse proche de la vitesse d'écoulement dans la conduite afin d'assuré l'iso cinétisme et l'homogénéité du gaz aspiré.

Le gaz brut une fois prélevé doit être nettoyé par un passage à travers un filtre de type Whatman afin d'éliminer les particules.

Les goudrons et une partie de l'humidité contenue dans le gaz sont piégés par condensation. Le gaz doit transiter par quatre ou six flacons barboteurs contenant du solvant organique (acétone, isopropanol). Les flacons barboteurs (laveurs) sont montés en série et trempés dans un bain thermostat d'eau + éthanol (ou eau + éthylène glycol) refroidit à très basse température (inférieur à 0°C) afin de condenser la totalité des goudrons.

Après la condensation, le gaz est envoyé dans un dessiccateur afin de piéger l'humidité résiduelle dans le gaz. Le volume de gaz prélevé est mesuré dans un compteur à gaz avant d'être analysé dans un chromatographe à phase gazeuse.

Dans le chromatographe, le gaz traverse des colonnes d'analyse qui détermineront la proportion volumique principales molécules contenues dans le gaz. Le chromatographe utilisé pour notre étude possède deux colonnes pouvant analyser les composés suivants : H₂, CH₄, CO, CO₂, N₂, C₂H₄, C₂H₆, O₂. Le chromatographe est programmé pour analyser le gaz chaque deux minutes.

Les flacons laveurs sont pesés avant et après chaque test afin de quantifier les particules, les goudrons et la vapeur d'eau condensés dans le solvant liquide. Cette phase liquide ensuite analysée par dosage de Karl-Fischer afin de déterminer la quantité d'eau piégée durant le test. avant et après la gazéification afin de quantifier l'eau piégée durant le test. . Le test de Karl-Fischer nous donne la teneur en eau du solvant liquide avant et après le test de gazéification.

La Teneur en eau du gaz est calculée par la formule suivante:

$$T_{eau} \left(\frac{g}{Nm^3} \right) = 4 * V_{flacon}(L) * T_{eau}(g/l) * \frac{1000}{V_{gaz\ pompé}(L)}$$

- **Principe du fonctionnement de la ligne d'échantillonnage de gaz**

Avant d'être analysé, le gaz doit être purifié afin de protéger le chromatographe. La purification du gaz se fait à l'aide des étapes suivantes:

- ✓ Le gaz est aspiré par une pompe à travers une canne de prélèvement placé sur la conduite de sortie de gaz (voir figure 18) ;
- ✓ Le gaz prélevé du gazéifieur passe dans une série de 4 flacons contenant de l'acétone. Ces flacons laveurs sont trempés dans un bain refroidi à environ 0°C. Le passage du gaz dans ces flacons entraîne la condensation des goudrons, de la vapeur d'eau et le piégeage des particules qu'il contient. (voir figure 17) ;
- ✓ Après le passage du gaz dans les flacons laveurs, il traverse un dessiccateur contenant du silica-gel et muni d'un filtre. Cette étape a pour but de retenir l'humidité résiduelle contenue dans le gaz et de piéger les particules n'ayant pas été piégées dans les flacons ;
- ✓ Le gaz purifié est quantifié grâce à un compteur de gaz avant d'être envoyé dans le chromatographe pour y être analysé.



Figure 18 : Vue de la canne de prélèvement



Figure 19 : Système de condensation et module de pompage

3. Méthodologie d'évaluation de la performance du gazeifieur

La méthodologie adoptée pour évaluer la performance du gazéifieur se résume sur un certain nombre des paramètres qui ont été observés et étudiés lors du fonctionnement du gazogène [19], il s'agit de :

- ✓ **La durée de démarrage de la gazéification**, c'est le temps écoulé entre l'amorçage du gazéifieur et le moment où le gaz produit s'enflamme spontanément.
- ✓ **La durée de la gazéification**, c'est le temps écoulé entre l'amorçage de la gazéification et le moment où le gaz produit n'est plus inflammable.
- ✓ **Le débit de biomasse**, c'est la masse de biomasse consommée par unité de temps.

Elle est égale à :

$$\dot{Q}(kg/min) = \frac{M_{biomasse}}{Durée} \quad (1)$$

- ✓ **L'énergie de la biomasse**, c'est l'énergie contenue dans la biomasse introduite dans le gazogène. Elle est donnée par :

$$E_{int}(KJ) = M_{biomasse}(KJ) * PCI_{biomasse}(KJ/Kg) \quad (2)$$

- ✓ **L'énergie du charbon (résidu cendreux)**, c'est la quantité d'énergie contenue dans le résidu cendreux retiré du gazéifieur à la fin de la gazéification. Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_{sortie}(KJ) = M_{cendre}(KJ) * PCI_{cendre}(KJ/Kg) \quad (3)$$

- ✓ **L'énergie nette de la gazéification**, c'est quantité d'énergie produite lors de la gazéification. Elle est obtenue en faisant la différence entre l'énergie de la biomasse et l'énergie du charbon (cendre).

$$E_{nette}(KJ) = E_{int}(KJ) - E_{sort}(KJ) \quad (4)$$

- ✓ **La puissance nette de la gazéification**, c'est la puissance produite par le gazéifieur pendant une durée donnée. Elle est obtenue en faisant le rapport entre l'énergie nette de gazéification par la durée de gazéification.

$$P_n \text{ (KW)} = \frac{E_{\text{net}} \text{ (KJ)}}{\text{Durée (s)}} \quad (5)$$

- ✓ **Le rendement massique**, il représente la fraction massique du charbon obtenue à la fin de la gazéification. La fraction massique est obtenue en divisant la masse de charbon par la masse anhydre de biomasse introduite dans le gazéifieur.

$$R = \frac{M_{\text{char}}}{M_{\text{biomasse}}(1 - \frac{Th}{100})} * 100 \quad (6)$$

R : rendement massique(%) et Th le taux d'humidité de la biomasse (%)

M_{char} et M_{biomasse} : respectivement la masse de cendre et de la biomasse (Kg)

- ✓ **Taux de conversion de la biomasse**, c'est la fraction massique de la biomasse consommée à la fin de la gazéification. Elle est égale à :

$$\xi(\%) = (1 - R/100)$$

Avec R le rendement massique

- ✓ **Le rendement gazéification**, c'est l'un des paramètres le plus important pour caractériser la performance du gazéifieur, il est obtenu en faisant le rapport entre la puissance à la sortie du gazéifieur par la puissance à l'entrée (puissance nette).

$$\eta(\%) = \frac{P_s}{P_e} * 100 \quad (7)$$

P_s est calculée à partir du produit entre PCI_{gaz} (MJ/Nm³) et le débit du gaz au point de prélèvement.

P_e est la puissance calculée à partir de l'énergie nette (entrante) de la gazéification.

- ✓ **La consommation spécifique en biomasse du gazéifieur**, c'est la quantité de biomasse consommée pour produire un kilowattheure d'énergie. Elle est égale à :

$$C_s \left(\frac{\text{Kg}}{\text{Kwh}} \right) = \frac{C \left(\frac{\text{Kg}}{\text{min}} \right) * 60}{P_s \text{ (KW)}} \quad (8)$$

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie, l'ensemble des résultats obtenus tout au long de notre étude sur le gazéifieur sont présentés ainsi que les analyses et interprétations des résultats.

1. Résultat d'analyse immédiate de la balle de riz

L'analyse immédiate de la biomasse (balles de riz) est importante dans l'étude des performances du gazéifieur, elle permet non seulement de comprendre les mécanismes ayant lieu lors de la gazéification, et également de déterminer le potentiel énergétique de la biomasse en question. Cette analyse a été effectuée au Laboratoire Biomasse et Biocarburant (LBEB) du 2IE. Les résultats obtenus sont regroupés dans la figure 20.

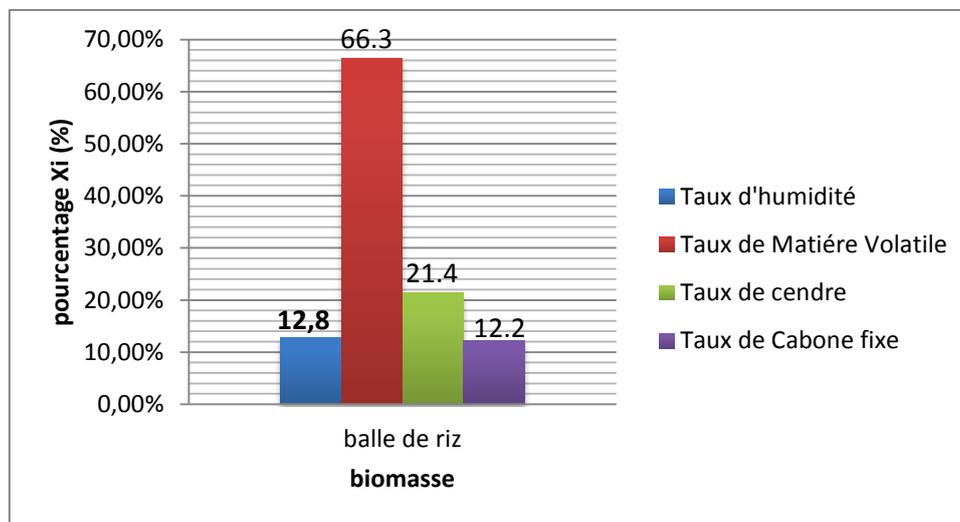


Figure 20 : Résultat d'analyse immédiate de la balle de riz

D'après l'analyse immédiate faite, nous constatons que la balle de riz a une forte teneur en matière volatile qui avoisine 70 % de la masse de la biomasse ce qui est favorable au procédé de la gazéification à lit fixe co-courant car la combustion des matières volatiles dégagées lors de la pyrolyse apporte l'énergie nécessaire à la phase de réduction. Elle présente un taux d'humidité, acceptable pour un procédé de gazéification. En revanche la balle de riz a un taux de cendres élevé (en comparaison avec une biomasse de type bois) composée essentiellement silice, ce qui explique sa densité énergétique plus faible par rapport à un résidu de type bois. Le taux de carbone fixe est élevé par rapport au bois de l'ordre de 15 % de la masse de la biomasse ce qui signifie partiellement que la biomasse a un fort potentiel énergétique.

2. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est l'un des paramètres important dans la détermination de potentiel énergétique d'un combustible. Le test réalisé au LBEB donne le résultat suivant :

Tableau 8 : Résultat d'analyse de pouvoir calorifique

<i>Biomasse</i>	<i>PCS_{brute}</i> (MJ/Kg)	<i>PCS_{anhydre}</i> (MJ/kg)	<i>PCI_{brute}</i> (MJ/Kg)	<i>PCI_{anhydre}</i> (MJ/Kg)
Cendre des résidus charbonneux	14,14	14,14	12,79	14,14
Balle de riz	14,35	16,47	13,7	16,1

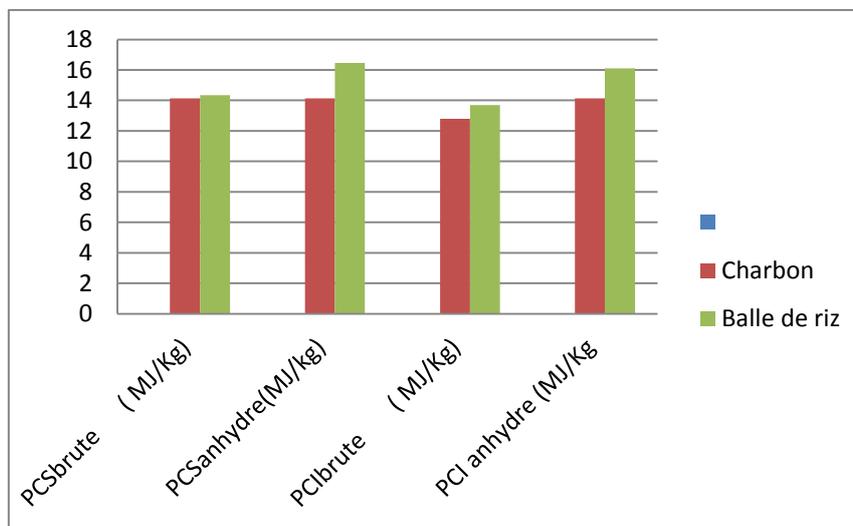


Figure 21 : Variation de PCI entre la balle de riz et le résidu charbonneux

Les résultats d'analyse révèlent une valeur de PCI_{brute} d'environ 14 MJ/kg pour les balles de riz et d'environ 13MJ/kg pour le résidu charbonneux. Ce PCI élevé signifie qu'il y'a encore beaucoup de carbone dans le résidu. Ces valeurs de PCI permettront de faire une estimation sur les quantités d'énergies contenues respectivement dans la balle de riz et la « cendre » afin d'établir le bilan énergétique du gazéifieur sur la base de l'énergie perdue par le combustible solide.

Il ressort finalement de l'analyse immédiate et de la mesure de PCI que la balle de riz a un potentiel énergétique intéressant et peut être utilisée comme combustible dans le gazogène pour la production de gaz combustible.

3. Présentation générale des tests réalisés.

Au cours de notre étude, onze(11) tests ont été réalisés au total. Certains tests avaient pour objectifs l'instrumentation du gazogène qui a consisté à :

- Placer les thermocouples et les tester,
- Mettre en place et en marche de la ligne d'échantillonnage des gaz et le tester en cours de fonctionnement.

D'autres parmi ces test ont échoué à cause des problèmes détectés soit au niveau des équipements de la ligne d'échantillonnage (pompe, système de condensation, Micro-GC) soit au niveau de la canne de prélèvement.

Plusieurs tests ont marché parmi lesquels les tests 3,4, 9 et 10 où nous avons pu recueillir des résultats dans les conditions optimales de fonctionnement et qui sont sélectionnés pour être étudiés dans la suite de cette étude.

Le tableau ci-dessous récapitule le bilan de tous les tests réalisés dans le cadre de cette étude

Tableau 9 : Bilan tests réalisés

	Date de déroulement	Objectifs	Activités
Test 1	15/02/2013	✓ Remise en marche du gazéifieur	✓ Mise en place des thermocouples
		✓ Tester les thermocouples	✓ 1 cycle de gazéification avec balles de riz
		✓ Observer l'évolution des températures et mesures de débit	✓ Observation de l'évolution des températures de gaz et des lits réactions
Test 2	21/03/2013	✓ Tester la mise en place de la ligne de prélèvement de gaz sans la Micro GC	✓ 3 cycles de gazéifications avec balle de riz
		✓ Enregistrer des données températures	✓ Installations et des équipements de condensation du gaz
		✓ Réaliser un bilan de matière du gazéifieur	✓ Prélèvement du gaz dans des sacs pour analyse à l'aide de la micro GC.
Test 3	29/03/2013	✓ Tester le fonctionnement la ligne de prélèvement avec la Micro GC	✓ Idem test 3
		✓ Analyser la composition du gaz	✓ Connexion de la Micro GC sur la ligne de prélèvement pour analyse en temps réel du gaz
		✓ Recueillir des données pour la caractérisation du gazéifieur	
Test 4	11/04/2013	✓ Idem test N°4	✓ 2 cycles de gazéification avec la balle de riz
		✓ Confirmer des résultats du test 3	✓ Mesure du débit de gaz, d'air de combustion et d'air
Test 5	18/04/2013	✓ Maitriser la méthode de mesure des débits de gaz à l'aide du tube de Pitot et du module ISOSTACK	✓ 1 cycle de gazéification avec la balle de riz
			✓ Mesure du débit de gaz, d'air de combustion et d'air
Test 6	22/04/2013	✓ Test échoué car la Micro_GC ne fonctionnait pas normalement, donc pas de résultat	
Test7	07/05/2013	✓ Test d'essai du gazo avec la coque d'arachide	✓ 2 cycles de gazéification avec la coque d'arachide
			✓ Mesure du débit de gaz, d'air de combustion et d'air et des températures
Test 8	14/05/2013	✓ Essai de fonctionnement de la micro_GC après le Nettoyage	
Test 9	17/05/2013	✓ Tester le fonctionnement la ligne de prélèvement avec la Micro GC	✓ 3 cycles de gazéifications avec balle de riz
		✓ Analyser la composition du gaz	✓ Test de barbotage du gaz
		Recueillir des données pour la caractérisation du gazéifieur	✓ Prélèvement du gaz dans des sacs pour analyse à l'aide de la micro GC. ✓ Mesure du débit de gaz, d'air de combustion et de gaz au point de prélèvement et des températures
Test 10	22/05/2013	✓ Idem Test 9	✓ 6 Cycles de gazéifications avec la balle de riz.
			✓ Idem au Test 9
Test 11	24/05/2013	✓ Test échoué car problème détecté au niveau de la pompe et bouchage constant de la canne de prélèvement	✓ 3 cycles de gazéifications avec la balle de riz
			✓ Prise des températures

4. Présentation détaillée de quatre principaux tests sélectionnés

Tests	Date du déroulement	Nombre de Chargement	Activités réalisées	Durée	Masse de la biomasse	Incidents relevés	Configuration des souffleurs
Test 3	29/03/2013	Chargement 1	Mesures des Températures	63 min	13,8 Kg	coupure courant 11:24mn_11:28m	
		Chargement 2		37 min	10,5 Kg		
		Chargement 3	Mesures des Températures mise en place de ligne d'échantillonnage de gaz	47 min	13,5 kg		
		Chargement 4		33 min	10,1		
Test 4	11/04/2013	Chargement 1	Mesures des Températures et des débits, Analyser le gaz	33 min	11,6		opercule ventilateur ouvert
		Chargement 2		33 min	11		Opercule ventilateur fermé
Test 9	17/05/2013	Chargement 1	Mesures des Températures et des débits, Analyser le gaz	90 min	17,5	bouchage constante de	Opercule ouvert
		Chargement 2		70 min	12,9	bouchage constante de tube de pito	Opercule ouvert
Test 10	22/05/2013	Chargement 1	Mesures des Températures et des débits, Analyser le gaz	51 min	15		Opercul fermé
		Chargement 2		62 min	11,12	Arrêt de la pompe pendant 28 min	
		Chargement 3		40 min	10,35		
		Chargement 4		40 min	11,1		
		Chargement 5		36 min	11,16		
		Chargement 6		29 min	11,23		

a. Caractéristique générale de différents tests

Comme mentionné précédemment, nous avons fait le choix de présenter les résultats de quatre tests qui ont bien marché et dans les conditions optimales de fonctionnement, Les activités effectuées lors de ce test sont :

- Lors de Test N°3 et Test N°9 nous avons mesuré les températures et échantillonner le gaz pour analyse
- Lors de Test N°4 et Test 10 nous avons mesuré les températures, les débits et échantillonner le gaz.

Par ailleurs la teneur en eau du gaz a été déterminé lors de Test N°4

Dans les essais de mesure de débits réalisés au cours des tests N° 9 et N°10 il s'agissait de mesurer le débit d'écoulements du gaz, de l'air de gazéification et de l'air de combustions selon diverses configurations des souffleurs.

Les débits étant sensible à la variation de température, les températures des fluides sont mesurées simultanément avec les débits. Les pressions différentielles relevées sur le gazogène aux différents points de mesures sont résumées dans *l'annexe 1* pour le test 4 et *l'annexe 2* pour le test 10. Ces valeurs de ΔP permettent de calculer les différents débits.

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des valeurs de débits mesurées lors de 2 tests

Points de mesure de débits	Air de gazéification	Air de combustion	Point de prélèvement
Test N°4 (Débits en Nm³/min)			
Opercule ventilo ouvert (chargement 1)	1,49	1,73	1,47
Opercule Ventilo fermé (chargement 2)	1,25	1,37	1,37
Test N°10 (Débits en Nm³/min)			
Opercule Ventilo fermé	1,13	1,34	1,27

De ce tableau nous constatons une faible variation du débit entre les différentes configurations des souffleurs d'air. La variation du débit du gaz au point de prélèvement selon les configurations de souffleur est de l'ordre de 6.8%, celle du débit d'air de gazéification est de l'ordre de 19,2% contre 26,3% pour le débit d'air de combustion.

b. Résultats et interprétation des courbes températures, compositions des gaz et PCI_{gaz} de quatre principaux tests.

Dans cette partie nous présenterons les évolutions en fonction du temps des températures, compositions des gaz et PCI gaz obtenus lors des quatre tests.

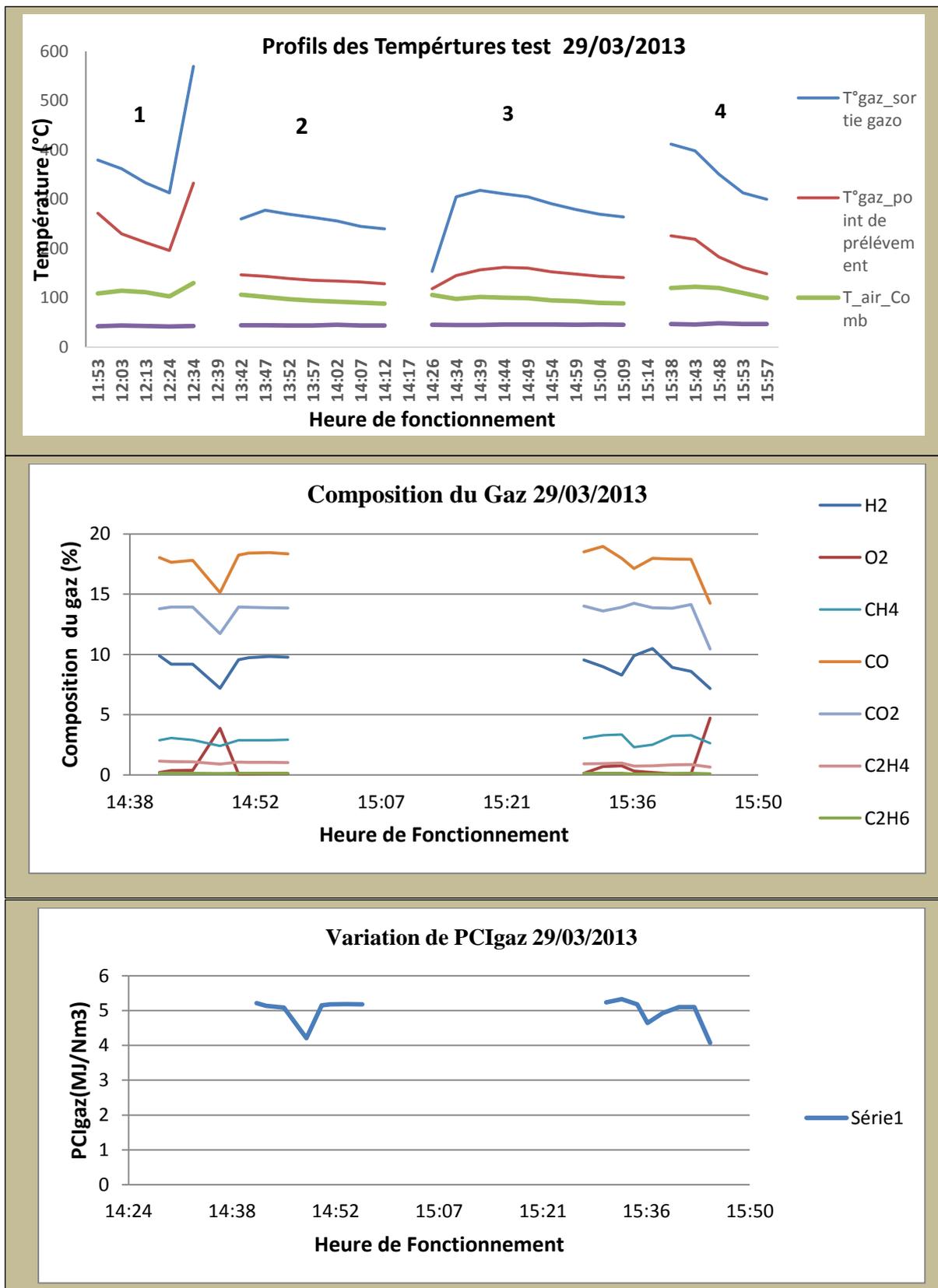
L'analyse du gaz de gazéification par la Micro-GC au cours de ces tests a permis d'étudier l'évolution de sa composition en fonction du temps et du débit d'air de gazéification. Le gaz issu de la gazéification de la balle de riz utilisant l'air comme agent gazéifiant, contient essentiellement les composés chimiques suivant : le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), le dihydrogène (H₂), le méthane (CH₄), l'azote (N₂), l'oxygène (O₂) les hydrocarbures en C₂ (C_{2n}H₄ + C₂H₆) et des goudrons à des proportions différentes.

Les résultats des analyses chromatographiques de la composition des gaz lors de ces tests sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11: Tableau récapitulatif de la composition du gaz des différents tests

	H2 (%)	CH4 (%)	CO (%)	N2 (%)	CO2 (%)	C _n H _m (%)	Teneur en Eau (g/Nm3)	PCI (MJ/Nm3)
Test N°3	7,16 - 10,49	2,29-3,28	14,22 - 19	53,2-59,95	10,45-14,2	0,7-1,3	–	4 - 5,22
Test N°4	7,12-12,38	1,78-3,92	17-20	51,52-61,7	5,55-14,39	0,45-1,2	107	4,28 – 5.7
Test N°9	6,86 -10,04	1,11-2,60	11,2-15,2	59-63,64	2.55-10,37	0.22-0,6	–	3 - 3,78
Test N°10	5 – 11,72	1,36-2.96	12.37 - 19	52,6 - 64,9	3,58 -11,6		–	3,39 – 5.20

Graphes profil Température, Compositions du gaz, et PCI gaz du test N°3



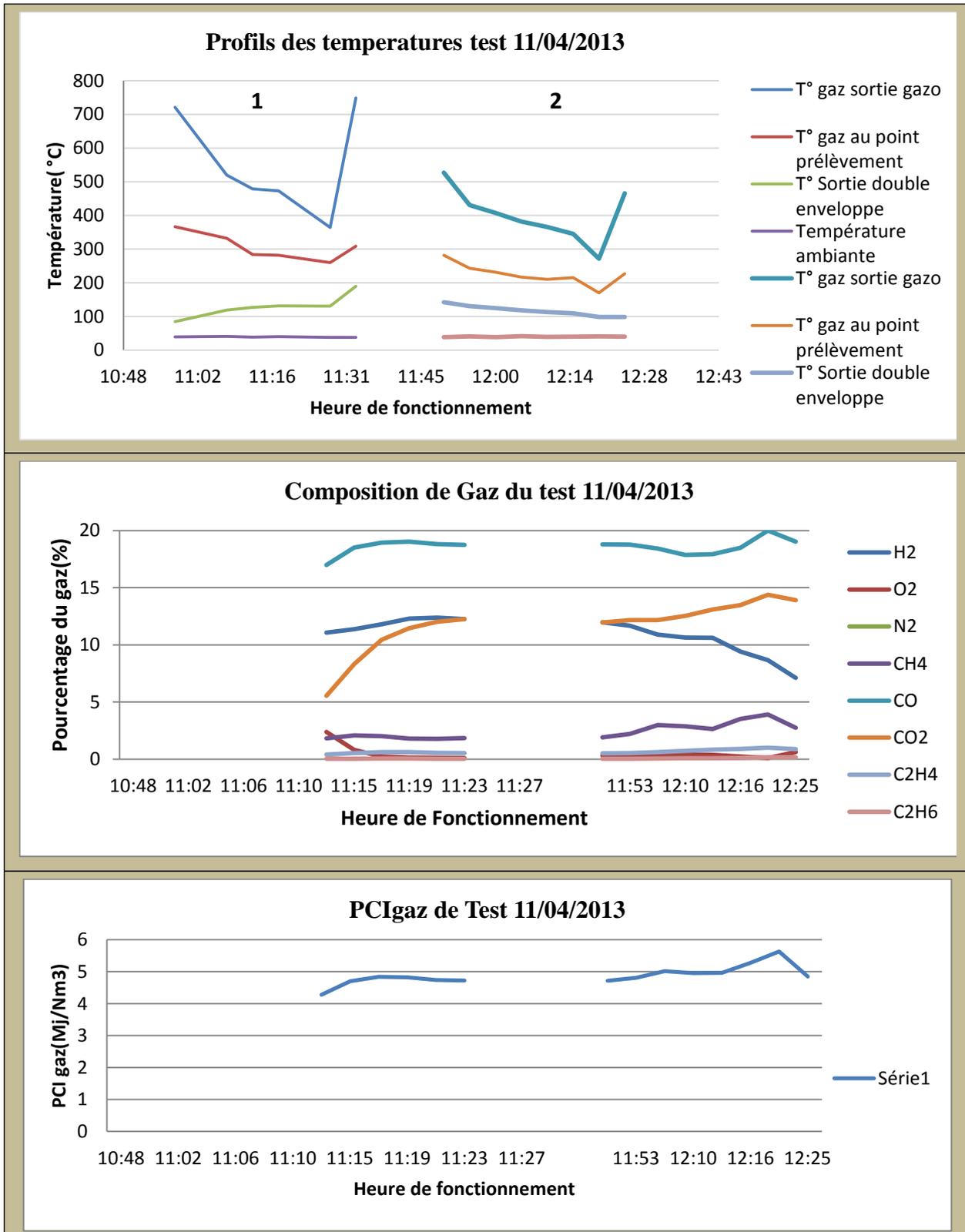
Analyse et Interprétation du Test N°3

Au cours de ce test quatre chargements de la balle de riz ont été réalisés, les mesures des températures ont été prises pendant les quatre chargements (voir graphe profil Températures) et le gaz est échantillonné lors de chargement trois et quatre. Pendant les deux premiers chargements nous avons eu un problème avec la mise en marche de la micro GC raison pour laquelle nous n'avons pas pu échantillonner le gaz.

Nous constatons lors de cet test que :

- Le taux de CO varie entre 15 et 20% et celui de H₂ entre 7 et 10% ;
- Lors du premier chargement, les températures du gaz à la sortie du gazogène et celle au point de prélèvement augmentent considérablement entre le début et à la fin de gazéification ceci est justifié par les réactions endothermiques dans la zone de réduction ;
- Les courbes que ce soit celles des températures ou de la composition de gaz ne sont pas stables ce qui signifie que le régime stationnaire n'est pas atteint ;
- En faisant le lien entre le profil des températures et la composition du gaz lors des chargements trois et quatre, nous remarquons que c'est quand les températures commencent à se stabiliser que le syngaz est produit ;
- Au cours de troisième chargement un incident temporaire de 5 min s'est produit entre 14h45min et 14h50 min la pompe qui aspire le gaz s'est arrêté. Sur le graphe de la composition de gaz, nous constatons que dans cet intervalle le taux de O₂ a augmenté et le PCI de gaz a chuté, ce qui peut s'expliquer par une infiltration d'air dans le dispositif d'échantillonnage de gaz.

Graphes Profils températures, compositions du gaz et PCIgaz du test N°4



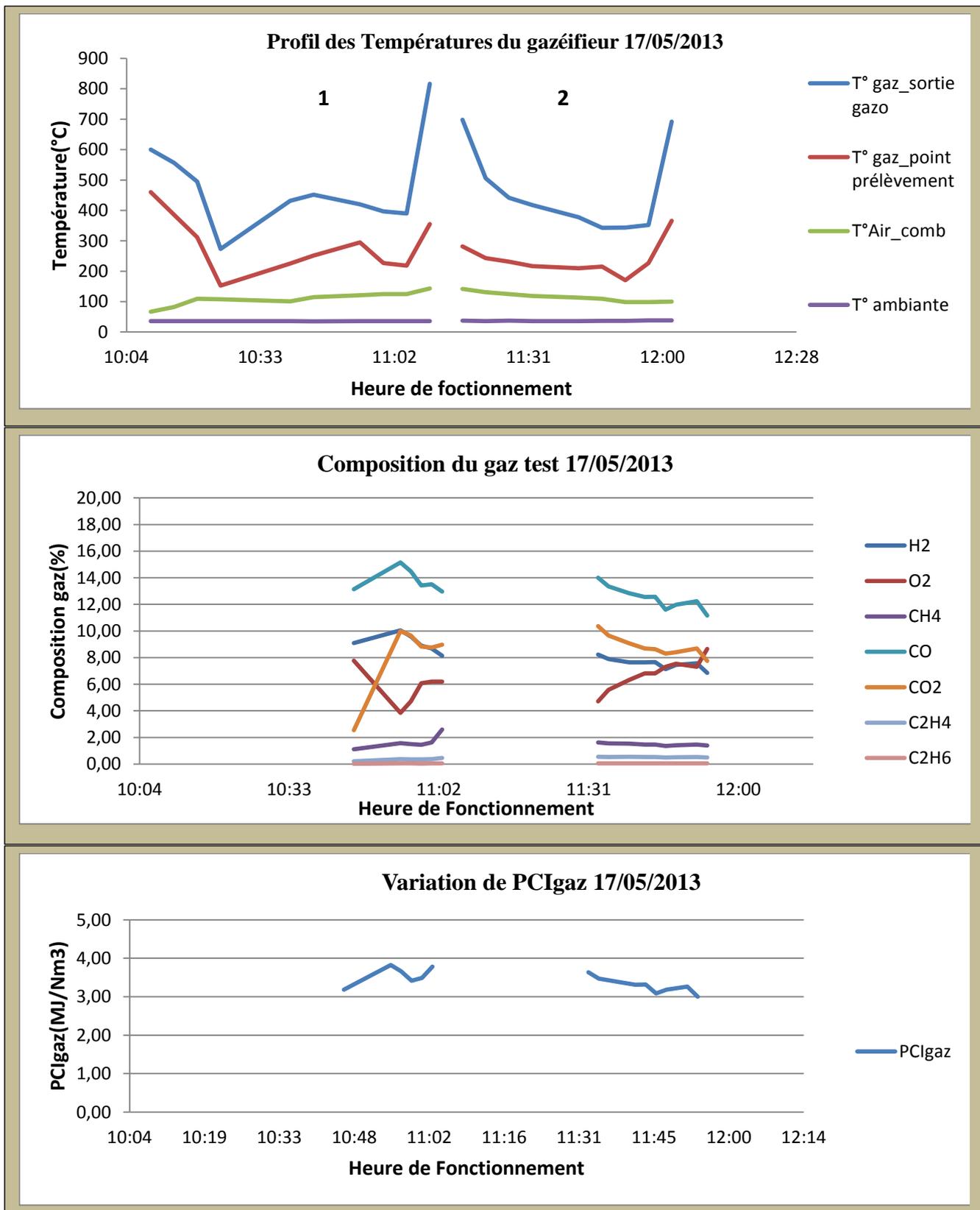
Analyse et Interprétation du test N°4

Lors de ce test deux chargements de la balle de riz ont été effectués où nous avons relevé les températures, les débits et échantillonner le gaz pendant les deux phases.

Nous constatons lors de ce test que :

- Le taux de CO varie entre 17 et 20 % tandis que celui de H₂ varie entre 7 et 13 % ;
- Le régime stationnaire n'est pas atteint ;
- Même remarque que pour le test précédent : Au début et à la fin de la gazéification les températures du gaz à la sortie du gazogène et celle au point de prélèvement augmentent considérablement, l'augmentation de la température est associée à des réactions exothermiques de combustion : ce qui semble être le cas puisqu'on observe une augmentation concomitante de la température du gaz en sortie et de la teneur en CO₂ du gaz. Donc en fin de chargement, les réactions de combustion sont probablement majoritaire ;
- En faisant le lien entre les profils de températures et la composition de gaz lors du premier chargement où les opercules des ventilateurs étaient ouverts, nous remarquons que lorsque la température du gaz à la sortie du gazogène avoisine 500°C on note une augmentation de taux de CO de H₂ et CH₄ dans le gaz produit. Par ailleurs l'augmentation des taux de ce gaz implique une augmentation de pouvoir calorifique, par contre au deuxième chargement pour lequel les opercules des ventilateurs étaient fermés, les taux de H₂ décroît considérablement tandis que le taux de CO₂ et CH₄ augmentent. Il semblerait d'après ces observations que l'augmentation de débit d'air contribue à augmenter la production de H₂.

Graphes profils température, compositions du gaz et PCIgaz du tests N°9



Interprétation des résultats Test N°9

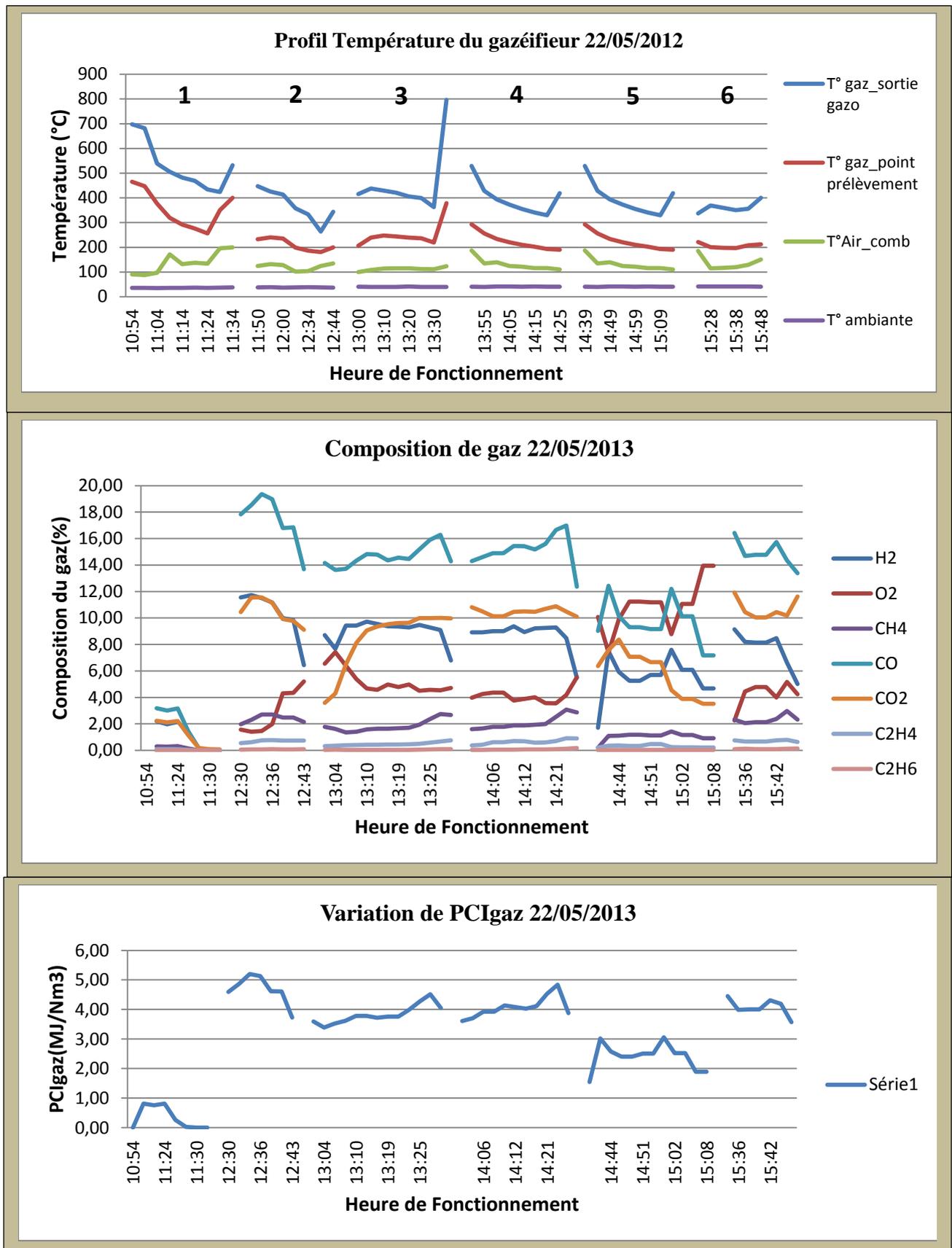
Au cours de ce test deux chargements de la balle de riz ont été également effectués d'une durée de 2 h, les mesures des températures et de débits ont été relevées pendant les deux chargements (voir graphe profil Températures) ainsi que l'échantillonnage du gaz.

Lors de ce test nous constatons que :

- Comme lors des chargements de certains tests au début et à la fin de gazéification les températures de gaz à la sortie de gazogène et celle au point de prélèvement augmentent de façon considérable ;
- Le taux de CO dans le gaz varie entre 11 et 16% et celui de H₂ varie entre 6 et 10% ;
- Le régime est instable vu le profil des températures et de la composition de gaz ;

Il est à noter que lors de ce test nous avons observé des fuites de gaz dû au problème d'étanchéité de la connexion entre la pompe et la micro-GC ce qui peut être à l'origine de la faible valeur du pouvoir calorifique du gaz .

Graphes profil températures, composition du gaz et PCIgaz du test N°10



Analyse et Interprétation des résultats

Six(06) chargements de la balle de riz ont été réalisés au cours de ce test (d'une durée de 180 minutes), les mesures des températures, de débits et échantillonnage de gaz ont été effectués (voir graphe profil Températures). Pendant le premier chargement nous avons eu un problème avec le système de condensation de gaz, celui-ci ne circulait pas bien dans les flacons ce qui nous a empêcher de réaliser son échantillonnage (ceci est illustré dans le graphe de la composition de gaz) .Egalement Au cinquième chargement il y'a eu bouchage de la canne de prélèvement de gaz par des résidus charbonneux.

Lors de ce test nous pouvons faire les remarques suivantes :

- Le taux de CO dans le gaz varie entre 12 et 20% tandis que celui de H₂ varie entre 6 et 12% lors des chargements 2,3 4 et 6 ;
- Des fluctuations des températures, ainsi que de la composition de gaz sont observées ce qui témoigne l'instabilité du régime ;
- Comme dans les autres tests , au début et à la fin de la gazéification les températures du gaz à la sortie du gazogène et celle au point de prélèvement augmentent considérablement ;
- Les taux de CO, H₂ et CH₄ baissent dans le gaz lors du deuxième chargement cela peut être expliqué par le fait que l'excès d'air dans le lit de réaction tend à favoriser l'oxydation du charbon et des goudrons.

c. Bilan énergétique de test N°4 et Test N°10

A partir des valeurs de PCI gaz (MJ/Nm³) et des débits (Nm³/min) acquises lors des tests N°4 et N°9, la quantité d'énergie contenue dans le gaz a pu être estimée ce qui a permis d'en déduire la puissance fournie par le gazéifieur à la sortie du gaz. Cependant il faut noter que ces puissances sont obtenues pendant la période où le gaz est produit c'est-à-dire pendant la gazéification.

Le tableau n°13 donne les puissances obtenues au cours des tests 4 et 9 selon les différentes configurations des souffleurs.

Tableau 12 : Bilan énergétique de test N°4 et test N°10

Chargement	PCI gazmoy (MJ/Nm3)	Débit (Nm3/min)	Puissance moyenne(KW)	Configuration Ventilo
Test N°4				
Chargement 1	4,69	1,37	106,7	opercule fermé
Chargement 2	5,03	1,47	123	opercule ouvert
Test N°10				
Chargement 1	4,68	1,39	108,2	opercule fermé
Chargement 2	3,77	1,39	88,7	
Chargement 3	4	1,39	92,5	
Chargement 4	4,07	1,39	94,2	

Les résultats obtenus lors du test N°4 affichent une puissance moyenne de l'ordre de 106.7 KW pour la configuration où le souffleur d'air de gazéification fourni son débit minimal et de 123KW dans le cas où ledit souffleur fourni son débit maximal. L'écart des valeurs de puissance entre ces différentes configurations est de l'ordre de 14 %. Ainsi nous pouvons donc confirmer en partie notre hypothèse formulée précédemment sur l'influence de la faible variation de débit d'air des souffleurs sur la performance du gazéifieur.

Concernant le test N°4 où nous avons les mêmes débits c'est-à-dire la même configuration de souffleur d'air, nous constatons que la puissance varie légèrement en fonction de chargement. Cela peut être dû en partie à la qualité du gaz produit lors de chaque chargement.

5. Synthèse bilan matière, énergétique et évaluation de la performance du gazéifieur

L'évaluation de la performance du gazéifieur est faite lors des tests N°4 et N°10, tous les paramètres de fonctionnement du gazéifieur sont pris en compte afin de bien le caractériser durant ces tests. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 13 : Bilan de matière et d'énergie de gazéification

Bilan global des matières		
Tests	Test 4	Test 10
Masse de la biomasse(Kg)	22,6	43,8
Durée de Démarrage (min)	23	25
Durée de gazéification (min)	43	84
débit de la biomasse (Kg/min)	0,53	0,52
Débit d'air gazéification (Nm3/min)	1,49 Opercule ouvert	1,13 Opercule fermé
débit d'air de combustion de gaz (Nm3/min)	1,37 Opercule fermé	1,34 Opercule fermé
Energie de la biomasse (MJ)	309,62	600,06
Masse de la cendre (Kg)	4,48	9,15
Energie de la cendre (MJ)	57,30	117,03
Energie nette gazéification (MJ)	252,32	483,03
Puissance entrée gazéification (KW)	97,80	95,87
Puissance sortie gazéification (KW)	65,40	71,48
Consommation Spécifique (Kg/KWh)	0,48	0,44
Rendement massique (%)	11.38	6
Taux de conversion (%)	89	94
Rendement énergétique (%)	66.87 %	74.73 %

Juste pour rappeler que le rendement énergétique est obtenu en faisant le rapport entre l'énergie entrante et l'énergie sortante du gazéifieur.

Analyse des résultats d'évaluation de la performance du gazéifieur

Les résultats des tests de gazéification montrent que la consommation de la biomasse du gazéifieur a varié très légèrement suivant les 2 tests. Au Test N°4 le débit de la biomasse est de 0,53 Kg/min par contre au test N°10 il est de 0,52Kg/min, soit un écart de débit de l'ordre de 1,88%. La variation du débit d'air de gazéification est susceptible d'être à l'origine de ce phénomène, car lors du test N°4 les opercules du souffleur d'air gazéification étaient ouverts tandis que ceux du test N°10 étaient fermés, ce qui justifie donc la légère accélération de la consommation de la biomasse du gazéifieur.

On remarque que les performances énergétiques du gazéifieur varient d'un test à l'autre. Le rendement obtenu du test N°4 est inférieur à celui du test N°10, les facteurs qui peuvent influencer cette différence de rendement sont notamment l'état d'encrassement des conduites de gaz, lors du fonctionnement du gazéifieur et la présence de goudrons et de résidus de charbon contenus dans le gaz produit qui se déposent dans les conduites de gaz et provoquent une perte de charge réduisant ainsi la performance du gazéifieur. Le rendement obtenu au test N°4 illustre bien ce phénomène. Le taux d'humidité de la biomasse peut également influencer la puissance du gazéifieur et donc par conséquent le rendement du gazéifieur

6. Perspectives d'amélioration de test

Sur la base des résultats des tests de performances et aux observations faites durant les gazéifications nous avons proposé des perspectives d'amélioration des tests suite aux difficultés rencontrées à fin d'en améliorer les performances et le fonctionnement. Il s'agit de :

- ✓ Envisager le remplacement de l'acétone (trop volatile) actuellement utilisé par de l'isopropanol beaucoup moins volatil ça permettra de mieux quantifier l'eau contenu dans le gaz.
- ✓ Trouver avec le constructeur du gazogène un dispositif permettant un positionnement stable du tube de Pitot et facilitant son retrait pour le nettoyage car il est assez sensible et difficile à mettre en œuvre à côté du brûleur de gaz. Cela permettra d'avoir des mesures de débits beaucoup plus fiables.
- ✓ Envisager le remplacement des souffleurs actuels par d'autres souffleurs ou un compresseur d'air offrant une plage de débit et de pression plus importants.

- ✓ Automatiser l'enregistrement des données par l'utilisation d'une centrale de donnée car l'enregistrement manuelle des données entraîne un décalage de temps dans les mesures.
- ✓ Proposer un meilleur système de déchargement et envisager l'isolation thermique des conduites de gaz dans la phase d'optimisation du gazéifieur car les glissières et les conduites de gaz s'encrassent au fil de l'utilisation du gazéifieur.

V. ANALYSE DE LA FAISABILITE TECHNIQUE, ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE POUR UNE UTILISATION CHEZ UN ARTISAN PRATIQUANT DE L'ETUVAGE DU RIZ.

1. Contexte

On considère la demande d'un artisan de la filière de la transformation rizicole qui souhaite réaliser l'étuvage artificiel du riz paddy grain encore entouré de ses enveloppes (glumes et glumelles) qui est obtenu après battages des panicules. Pour atteindre son seuil de rentabilité, l'artisan a une production journalière de deux (02) tonnes de riz paddy à étuver par jour en utilisant du bois. La quantité de bois nécessaire à l'étuvage d'une tonne de riz est d'environ 230 kg [20] avec les foyers utilisés par l'unité. L'étuvage du riz est réalisé dans un dispositif simple. Le principe de fonctionnement de ce dispositif est la pré-cuisson à vapeur. Ce dispositif est composé de la superposition de deux-fûts métalliques (fûts de récupération). Le demi-fût supérieur est percé de petits trous à sa base. Le besoin de l'énergie est constant au cours du temps.

L'artisan souhaite utiliser le gazéifieur à balle de riz pour produire de la chaleur nécessaire pour l'étuvage en utilisant la balle de riz issue du décorticage. L'étude consiste donc à analyser la faisabilité technique, économique de la substitution des foyers à bois par le gazéifieur à balle de riz.

2. Analyse de la faisabilité technico économique de l'installation du gazogène

Pour faire cette analyse, quatre scénarios ont été définis :

- Nous avons considéré l'état actuel de l'unité c'est-à-dire l'état où l'unité utilise les bois pour étuver comme scénario de référence.

Pour son fonctionnement, le gazéifieur a besoin d'électricité nécessaire pour alimenter les souffleurs d'air, cela nous a amené à considérer trois scénarios possibles.

- Dans le premier scénario, nous avons supposé que l'unité est installée dans une zone urbaine où il y'a couverture du réseau électrique, donc les souffleurs seront directement alimentés par le réseau électrique ;
- Dans le second scénario, nous considérons que l'unité est située dans une zone rurale dépourvue de la couverture électrique, dans ce cas de figure l'unité utilise le groupe électrogène à essence comme source d'électricité ;

- Le troisième scénario toujours en zone rurale mais cette fois-ci l'unité utilise une installation photovoltaïque pour alimenter les souffleurs d'air.

a. Hypothèses des calculs

Compte tenu des quatre scénarios existants, quelques hypothèses ont été définies pour réaliser le bilan énergétique en partant de scénario de référence.

Donnée : 100kg de riz paddy est constitué de 80 kg de son de farine et 20kg de balle de riz [20] donc 2 tonnes par jour de riz paddy correspond à 400kg de balle de riz [20]

Le tableau 15 résume les données d'entrées des quatre scénarios.

Tableau 14 : Données d'entrées des quatre scénarios

	Scénario référence	Scénario N°1	Scénario N°2	Scénario N°3
Quantité journalière de riz paddy étuvé (Kg)	2000	2000	2000	2000
Nombre production (J/mois)	20	20	20	20
Nombre de mois de production annuelle (mois/an)	7	7	7	7
Quantité de bois utilisé kg par jour	460	-	-	-
Rendement des foyers (%)	15%	-	-	-
Puissance thermique du gazéifieur (kW)	-	35		
Rendement massique décorticage du paddy en riz(%)	80%			
Puissance des souffleurs (kW)		0,44		

Situation avant l'utilisation du gazéifieur

- La quantité de bois par jour utilisée pour étuver deux (02) tonnes de riz est 460 kg ;
- Le bois est considéré à une humidité comprise entre 7 et 10% (sur masse brute)
- La quantité d'énergie contenue dans le bois est : $18\text{MJ/kg} \times 460\text{ kg} = 8280\text{ MJ}$;
- La quantité d'énergie utile pour étuver deux tonnes est : $8280 \times 0.15 = 1242\text{ MJ}$;

Situation en utilisant le gazéifieur

- La quantité d'énergie utile pour étuver les deux tonnes est égale à 1242 MJ ;
- La puissance thermique du gazéifieur est de 35 kW [21] ;
- La durée de fonctionnement du gazéifieur est 9,86 h/j calculée à partir de la puissance thermique du gazéifieur ;
- La consommation horaire de la balle de riz est estimée à 33 kg ;
- La quantité de la balle de riz produite au courant de la journée est 400 kg ;

- La quantité journalière de la balle de riz nécessaire pour étuver deux tonnes est 325,4kg ;
- Le taux de couverture des besoins en balle de riz est environ 123%
- L'énergie électrique consommée par les souffleurs est de 4,34 kWh

b. Modèles technico économiques des différents scénarios

- **Modèle économique de l'utilisation de bois**

Dans le scénario de référence où l'unité utilise le bois comme source de référence, le bilan économique donne le résultat suivant :

	<i>journalier</i>	<i>mensuel</i>	<i>annuel</i>
<i>Quantité de bois</i>	460 kg	9200 kg	64400kg
<i>Prix 1kg de bois</i>	100 FCFA		
<i>Prix du bois</i>	46 000 FCFA	920 000 FCFA	6 440 000 FCFA

Il ressort de cette analyse économique qu'annuellement, l'artisan dépense une somme de **6.440.000FCFA** pour l'étuvage du riz en utilisant les bois.

- **Modèle économique du scénario1**

Dans le scénario N°1 l'unité utilise un gazéifieur à balle de riz. Pour le fonctionnement, la conduite, et l'entretien du gazéifieur il est nécessaire de recruter deux (02) employés à raison de 2000FCFA/jour chacun. L'unité utilise l'électricité du réseau pour faire fonctionner les souffleurs d'air du gazéifieur. Le modèle économique en utilisant ce scénario1 est récapitulé dans le tableau suivant :

Tableau 15 : Résultat d'analyse économique du scénario 1

	Investissement	Journalier	Mensuel	Annuel
Achat gazéifieur	2 500 000 FCFA	/	/	/
Frais Installation et divers	450 000 FCFA	/	/	/
Employés	/	4 000 FCFA	80 000 FCFA	560 000FCFA
Frais d'électricité	/	417 FCFA	8 333 FCFA	58 330 FCFA
Frais de maintenance	/	/	10 000 FCFA	70 000 FCFA
Total	2 950 000 FCFA	4 417 FCFA	98 333 FCFA	688 330 FCFA
Total Année 1	3 638 330 FCFA			

Dans ce scénario, l'artisan doit dépenser une somme de **3 638K FCFA** lors de la première année dont **2950 KFCFA** d'investissement.

- **Modèle économique du scénario2**

Dans le scénario n°2 l'unité utilise le gazéifieur comme dans le scénario n°1 à la différence que les souffleurs d'air sont alimentés à l'aide d'un groupe électrogène de 2KVA (le plus petit groupe existant sur le marché) [21]. La consommation journalière de ce groupe est de 4 litres de carburant pour 10 h de fonctionnement. Le coût d'achat du carburant est de 750 FCFA/litre. La maintenance du groupe et du gazéifieur coûte environ 20 000 FCFA à l'unité par mois. Le modèle économique du scénario deux est le suivant :

Tableau 16 : Résultat d'analyse économique du scénario 2

	Investissement	Journalier	Mensuel	Annuel
Achat gazéifieur	2 500 000 FCFA	-	-	-
Achat groupe électrogène (2KVA)	90 000 FCFA	-	-	-
Frais d'installation divers	450 000 FCFA	-	-	-
Employés	-	4 000 FCFA	80 000 FCFA	560 000 FCFA
Frais carburant	-	3 000 FCFA	60 000 FCFA	420 000 FCFA
Frais de maintenance	-	-	20 000 FCFA	140 000 FCFA
Total	3 040 000 FCFA	7 000 FCFA	160 000 FCFA	1 120 000 FCFA
Total Année 1	4 160 000 FCFA			

Pour ce scénario, l'artisan doit dépenser une somme de **4.160 KFCFA** au cours de la première année dont **3 MFCFA** pour l'investissement.

- **Modèle économique du scénario3 : avec panneaux photovoltaïque**

Dans le scénario N°3 le groupe électrogène est remplacé par une installation photovoltaïque de 1535 WC munie d'un parc d'une batterie d'accumulateur de capacité $C_b = 1405Ah$ pouvant assurer une autonomie totale de 2 jours. L'installation du système photovoltaïque entraîne une augmentation du coût de l'installation qui est de 700 000 FCFA. Seul avantage, ce système ne requière que peu de maintenance et permet de se soustraire des inconvénients lié au problème d'approvisionnement en carburant en zone rural et les problèmes lié à la fiabilité du groupe électrogène. Ce scénario nous donne le modèle économique suivant :

	Investissement	Journalier	Mensuel	Annuelle
Achat Gazéifieur	2 500 000 FCFA	/	/	/
Frais équipement énergie solaire	1 531 000 FCFA		/	/
Frais d'installation	700 000 FCFA			
Employé	/	4 000 FCFA	80 000 FCFA	560 000 FCFA

Frais de maintenance	/	/	10 000 FCFA	70 000 FCFA
Total	4 731 000 FCFA	4 000 FCFA	90 000 FCFA	630 000 FCFA
Total Annuel	5361 000 FCFA			

Pour ce cas de figure(en utilisant l'énergie solaire comme source d'alimentation électrique des souffleurs), l'artisan doit faire dépenser **5.361 KFCFA** la première année dont **4731 KFCFA** d'investissement.

c. Analyse de la rentabilité

Le but de cette analyse est de comparer les trois scénarios pour cela nous allons :

- Calculer le temps de retour sur investissement
- Evaluer également les réductions cumulées des dépenses (que nous appellerons ici « bénéfices » pour simplifier) obtenues de 5 ans pour chaque type de scénario

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats d'analyse économique des quatre scénarios sur la période de cinq ans.

Tableau 17 : Tableau récapitulatif des quatre scénarios sur la période de cinq ans.

		1 ^{er} Année	2 ^e Année	3 ^e Année	4 ^e Année	5 ^e Année	Total
Scénario référence	Investissement	0					0
	Charge de fonctionnement(KFCFA)	6 440	6 440	6 440	6 440	6 440	32 200
	Retour d'investissement (FCFA)	0					
	Bénéfices (KFCFA)	0	0	0	0	0	0
Scénario N°1	Investissement (KFCFA)	2 950					2 950
	Charge de fonctionnement (KFCFA)	688	688	688	688	688	3 441
	Retour d'investissement	5.5 mois					
	Bénéfices annuelle(KFCFA)	2 801, 670	5 751, 670	5 751, 670	5 751, 670	5 751, 670	25 808
Scénario N°2	Investissement (KFCFA)	3040					3 040
	Charge de fonctionnement (KFCFA)	1 120	1 120	1 120	1 120	1 120	5 600
	Retour d'investissement	5.7 mois					
	Bénéfices (KFCFA)	2 280	5 320	5 320	5 320	5 320	23560
Scénario N°3	Investissement (KFCFA)	4 731					4 731
	Charge de fonctionnement(KFCFA)	630	630	630	630	630	3 150
	Retour d'investissement	8.82 mois					
	Bénéfices(KFCFA)	1 079	5 810	5 810	5 810	5 810	24 319

Conclusion

Ce qui ressort de cette analyse comparative est que :

- Dans le cas de scénario1 où l'artisan utilisera le réseau national comme source d'énergie, il aura le retour d'investissement au bout de **5 mois et demi** avec un bénéfice de **25 808 KFCFA** pendant les cinq ans.
- Dans le cas de scénario 2 où il utilisera plus tôt un groupe électrogène de puissance 2 KVA comme source d'alimentation des souffleurs, le retour d'investissement sera obtenu également au bout **de 5 mois et demi** avec un bénéfice de **23 560 KFCFA** pendant les cinq ans.
- Le dernier scénario où l'artisan doit utiliser l'énergie solaire comme source d'énergie, le retour d'investissement sera obtenu au bous de **9 mois environs** avec un bénéfice de **24 319 KFCFA** pendant les cinq ans.

Des trois scénarios il ressort que le scénario1 est le meilleur scénario vu la rentabilité économique et le temps de retour d'investissement. Par contre en zone rurale en comparant les deux scénarios 2 et 3, toujours en tenant compte des aspects temps de retour d'investissement et bénéfices obtenus au courant de cinq ans nous nous rendons compte qu'en termes de bénéfice le scénario 3 est mieux alors qu'en terme de temps de retour sur investissement c'est plus tôt le scénario 2.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de nos travaux réalisés au laboratoire biomasse et biocarburant (LBEB) du 2ie a été la caractérisation des performances d'une unité pilote de gazéification conçu par un constructeur local basé à Ouagadougou.

Il a tout d'abord été effectué une synthèse bibliographique d'une part sur la gazéification et d'autre part sur les études paramétriques existantes sur des installations de gazéification à travers le monde. Cette synthèse bibliographique a permis de mieux comprendre la technologie de gazéification de la biomasse à petite échelle et a également permis d'obtenir des précisions sur des installations de gazéification à lit fixe co-courant existantes. Les objectifs des expérimentations qui ont été réalisées ensuite étaient de caractériser la performance de l'unité pilote de gazéification et analyser la faisabilité technique, économique et environnementale pour une utilisation chez un artisan d'une filière agroalimentaire de la transformation du riz. Dans cette optique, nous avons caractérisé la balle de riz et les résidus cendreux récupérés en sortie du gazéifieur grâce aux analyses immédiates réalisées au laboratoire, les résultats de ces analyses nous révèlent un taux d'humidité bas de 12,8 % de la masse brute, une teneur en cendres de 20 à 22% ; et un pouvoir calorifique proche de 14 MJ/Kg. Malgré un taux de cendres élevé, Ces caractéristiques font de la balle de riz une biomasse convenant en usage énergétique pour la gazéification.

Le gazéifieur a été instrumenté afin de recueillir les données nécessaires pour sa caractérisation. Les instruments installés ont permis de mesurer les températures et les débits à plusieurs emplacements du gazéifieur et prélever le gaz de synthèse (syngaz) produit pour l'analyse à l'aide d'une chromatographie en phase gazeuse. Les tests ont montré qu'un gaz de très bonne qualité est obtenu au test N°4 avec un pouvoir calorifique de gaz sec variant entre 4.3 MJ/Kg et 5.7MJ/kg pour un débit du syngaz variant entre 1.37 Nm³/min (opercule souffleur fermé) et 1.47Nm³/min (opercule souffleur ouvert), et une puissance à la sortie variant entre 97.5 KW et 140 KW.

De l'évolution des profils de température, on peut retenir qu'au démarrage et à l'arrêt du gazéifieur c'est-à-dire à la fin de gazéification la température du gaz à la sortie du gazogène augmente considérablement de l'ordre de 500°C à 700°C et au cours du fonctionnement cette température reste presque constante. L'augmentation de cette température s'explique par les réactions exothermiques de combustion qui s'opère quand l'air dévient en large excès par rapport à la biomasse résiduelle.

Pour évaluer la performance du gazéifieur, un certain nombre de paramètres ont été pris en compte tels que la quantité de la biomasse consommée, la durée de la gazéification, le débit d'air de la gazéification et le débit d'air de combustion. Les résultats des tests menés donnent une puissance entrée gazéification (puissance obtenue à partir de la différence entre l'énergie biomasse et l'énergie des résidus carbonés pendant la durée de gazéification) de **97 KW** pour un débit d'air de gazéification de 1,4 Nm³/min en moyenne. La consommation de la biomasse a été également calculée et est égale à 0,53Kg/min. Le rendement du gazogène a été calculé à **66,9%** lors du test N°4 et **74,8%** lors du test N°10

Sur la base des résultats des tests de performance et des observations faites durant les tests de gazéification, nous avons proposé des pistes d'amélioration des expérimentations pour contrer les difficultés rencontrées.

- ✓ Envisager le remplacement de l'acétone (trop volatile) actuellement utilisé par de l'isopropanol beaucoup moins volatil ça permettra de mieux quantifier l'eau contenu dans le gaz ;
- ✓ Trouver avec le constructeur du gazogène un dispositif permettant un positionnement stable du tube de Pitot et facilitant son retrait pour le nettoyage car il est assez sensible et difficile à mettre en œuvre à côté du brûleur de gaz. Cela permettra d'avoir des mesures de débits beaucoup plus fiables ;
- ✓ Envisager le remplacement des souffleurs actuels par d'autres souffleurs ou un compresseur d'air offrant une plage de débit et de pression plus importants ;
- ✓ Automatiser l'enregistrement des données par l'utilisation d'une centrale de donnée car l'enregistrement manuelle des données entraîne un décalage de temps dans les mesures ;
- ✓ Proposer un meilleur système de déchargement et envisager l'isolation thermique des conduites de gaz du gazéifieur car les glissières et les conduites de gaz s'encrassent au fil de l'utilisation du gazéifieur .

VII. BIBLIOGRAPHIE

- [1]- *EIA, E.I.A. (2008)*, « International Energy outlook 2008 » in secondary« International Energy outlook 2008 ». Official Energy statistics from U.S. Government: Washington DC (USA) .P.260.
- [2] BP, Statistical review of world Energy, 2010 <http://www.bp.com/Statistical> review consulté le 12/04/2013
- [3] *AIE, (2004)* in *Karekezi et al*, les énergies renouvelables en Afrique, 2005.
- [4] *Harrie Knoef (2005)*. Hand book biomass gasification, BTG biomass technology group BV, the Netherlands,
- [5] *Cirad-Foret (2001)* Observatoires des énergies renouvelables, pyrolyse et gazéification de la biomasse pour la production d'électricité, Rapport ADEME, P.155
- [6] *Floriane MERMOUD (2006)*, Gazéification de charbon de bois à la vapeur d'eau: de la particule isolée au lit fixe continu, *Thèse de doctorat*, Institut polytechnique de Toulouse, P.256
- [7] *Deglise et Lede (1980)*. Valorisation Energétique de la biomasse par voie thermique. Entropie (Paris), n°16. P.24
- Reed TB. Et Das A (1988)*, Hand book of biomass downdraft gasifier Engine systems: United States. Pages.140.
- [8] *Mc Kendry P (2002)*, Energy production from biomass (part1): overview of biomass, bio resource technology, vol 83, pp.37-46,
- [9] *Fromentin et al (2000)*. Etat des connaissances dans le domaine de la gazéification du bois. Rapport final sur Manda DD-EPFL Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, P.34
- [10] *Van de Steene L et Girard P (2003)*, le point sur la gazéification de la biomasse, Bois Energie N°1, Revue (Dossier cogénération), 4 pages.
- [11] *Schenkel, Yves et Benabdallah, Boufeldja, (2005)* Guide biomasse Energie. S.L. : Publication de l'IEPF,
- [12] *Luc GERUN, (2007)* Etude Numérique et expérimentale de la valorisation énergétique du bois par gazéification ; Nantes

- [13] **Chao Gai, Yuping Dong, (2012)** Experimental study on non-woody biomass gasification in downdraft gasifier, Article P.10
- [14] **Xylowatt Sa, Frédéric Bourgeois.** Gazéification de la biomasse, Diaporama, P.60
- [15] **Barrio, M Gobel et al,(2001)**, Steam gasification of wood char and the effect of hydrogen inhibition on the chemical kinetics in Bridgwater, A.V (Ed).progress in thermochemical biomass conversion Blackwell, London,P.
- [16] **Joyah et al, (2003)**, computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying, Biomass & Bioenergy, vol 25 P. 459-469.
- [17] **Zainal, Z.A ; Rifan et al (2002)** , Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier, Biomass & bioenergy, vol 23 P. 283-289.
- [18] **Laurence CHARRIER (1992)** Combustion du charbon de bois et emission de gaz à effet de serre ; Mémoire école Nationale d'ingénieurs des travaux agricoles(CIRAD), P.67
- [19] **KABORE Dimitri (2012)** Etude d'optimisation d'un gazéifieur à coques d'anacarde, Mémoire de Master II, 2IE, 77P + annexes
- [20] **Paul Houssou (2002)** Développement de l'étuvage du riz au Bénin, Rapport P.5
- [22] **Kiloutou .fr** Vente des groupes électrogènes <http://www.kiloutou.fr/energie-amp-air/groupe-electrogenes-accessoires-electriques/groupe-electrogene-2-kva-230-v-essence>
consulté le 30/05/2013
- [23] **Alexis T. Belonio, Daniel Alexis H. Belonio et al, (Avril 2010)** TRAINING MANUAL ON RICE HUSK GAS STOVE, Phillipine , P.18

ANNEXES

Annexe 1 : Mesure de ΔP (PA) et résultats des débits calculés lors de test N°4

Les mesures de ΔP (PA) aux différents points ont permis de calculer les débits

	ΔP air de gazéification(pa)		ΔP de sortie du gaz (pa)				ΔP air de combustion (pa)	
	Ventilo fermé	Ventilo ouvert	Ventilo Gazo Fermé		Ventilo Gazo ouvert		Ventilo fermé	Ventilo ouvert
	22,6	41,1	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	21,2	34,5
	23,8	32,3	14,3	9,8	15	15,9	22,4	35
	23,9	32	15,3	11	14	17,2	21,1	39,7
	23,7	39,3	14,1	12,3	13,1	14,4	22,5	37,6
	25,4	33,8	15	9,4	16,4	19,8	21,8	38
	22,8	32,7	13,8	7,6	17,8	16,3	21,9	35,8
	23,6	31,5	13	9,5	18,7	17,3	21,3	36,2
	21,5	28,1	14,3	9,8	19,5	17,4	21,4	37
	24,7	34,1	13,6	7,8	13,3	16,5	23,5	38,7
	23,3	33,5	12,4	10,7	12,2	16	23,6	40,6
	24,2	33,9	13,1	10,4	15,3	13,4	23,4	36,9
	23,3	33,1	14,1	9,9	18,2	16,8	22,2	36,3
	23,8	34,3	13,2	10	19,4	12,3	22,6	36
	25,5	35,2	14,2	10,5	17,8	15,3	23,3	34,6
	24,1	33,7	13,7	10,8	18,2	14,4	21,2	36,2
Moyenne ΔP	24,3	34	12,1	11,9	16,2	15,3	22,3	32,7
	23,78	33,91	13,75	10,09	16,34	15,89	22,23	36,61
			11,92		16,11			

Air de gazéification (ventilo fermé)				Air de gazéification (ventilo ouvert)			
Température (°C)	Vitesse maxi (m/s)	Vitesse corrigé(m/s)	Débit Nm ³ /min	Température (m/s)	Vitesse maxi(m/s)	Vitesse corrigé(m/s)	Débit (Nm ³ /min)
39,4	6,49	5,26	1,250	38,5	7,74	6,27	1,490
41,1	6,51	5,28	1,253	40,7	7,76	6,30	1,496
38,9	6,48	5,26	1,249	38,4	7,74	6,27	1,490
39,9	6,49	5,27	1,251	41,4	7,77	6,30	1,497
37,8	6,47	5,25	1,247	39,1	7,74	6,28	1,492
38	6,47	5,25	1,247	39,8	7,75	6,29	1,494
			1,249	40,8	7,76	6,30	1,496
				40	7,76	6,29	1,494
							1,494

Point de prélèvement(ventilo fermé)				Point de prélèvement(ventilo ouvert)			
Température (°C)	Vitesse maxi(m/s)	Vitesse corrigé(m/s)	Débit (Nm3/min)	Température (°C)	Vitesse maxi(m/s)	Vitesse corrigé(m/s)	Débit (Nm3/min)
366,8	7,46	6,05	1,437	282	8,05	6,53	1,551
332	7,25	5,88	1,398	243,4	7,77	6,30	1,496
284	6,96	5,64	1,341	231,2	7,67	6,22	1,478
282	6,95	5,63	1,339	216,8	7,56	6,13	1,457
260	6,81	5,52	1,312	210,1	7,51	6,09	1,447
309	7,11	5,77	1,371	215,1	7,55	6,12	1,454
			1,37	170	7,19	5,83	1,386
				227	7,64	6,20	1,472
							1,47

Air de combustion (ventilo fermé)				Air de combustion (ventilo ouvert)			
Température (m/s)	Vitesse maxi (m/s)	Vitesse corrigé(m/s)	Débit Nm3/min	Température (m/s)	Vitesse maxi (m/s)	Vitesse corrigé (m/s)	Débit (Nm3/min)
84,8	6,71	5,44	1,293	142	9,28	7,52	1,788
119,2	7,03	5,70	1,354	130,9	9,15	7,42	1,763
127,1	7,10	5,76	1,368	125,1	9,09	7,37	1,751
131,4	7,14	5,79	1,375	118,2	9,01	7,31	1,736
130,7	7,13	5,78	1,374	113,4	8,95	7,26	1,725
190	7,64	6,19	1,471	109,1	8,90	7,22	1,715
			1,373	98,6	8,78	7,12	1,691
				98,5	8,78	7,12	1,691
							1,732

Les trois tableaux ci-dessus donnent les résultats calculés des débits moyens à chaque point de mesure et selon les différentes configurations.

Les vitesses doivent être corrigées pour obtenir une vitesse moyenne dans la section.

D'après la loi de PRANDTL dans le cas d'une conduite circulaire le coefficient de correction ramenant la vitesse max à la vitesse moyenne est de 0,811

$$V = 0,811 * V(O)$$

Annexe 2 : Mesure de ΔP (PA) et débits lors de test N°10

	ΔP air de gazéification (pa)	ΔP au point de prélèvement de gaz (pa)	ΔP air de combustion (pa)
	<i>opercule ventilo fermé</i>		<i>opercule fermé</i>
	19,7	11,9	20
	14,5	17,2	20,9
	24,9	19,8	19,6
	13	17,1	21,7
	18,3	14,1	21,8
	21,3	14,6	19,8
	12,1	14,7	21
	24,3	14,3	23,6
	19,3	14,5	21,9
	18,8	12,4	22,7
	23,5	14,3	23
	20,9	12,3	21,5
	23,5	12,7	24,3
	18,1	15	23,9
	22,1	15,2	22,2
	20,8	14,5	19
Moyenne ΔP	19,69	14,66	21,68

Point de prélèvement			
Température(°C)	Vitesse maxi (m/s)	Vitesse corrigé(m/s)	Débit Nm3/min
460,1	7,50	6,08	1,445
385,8	7,11	5,77	1,370
311,5	6,70	5,43	1,290
152,6	5,71	4,63	1,101
225,1	6,18	5,01	1,191
251,5	6,34	5,14	1,222
			1,27

Air de Combustion (ventilo ouvert)			
Température (°C)	Vitesse maxi (m/s)	Vitesse corrigée (m/s)	Débit Nm3/min
66,9	8,60	6,98	1,658
81,9	8,79	7,13	1,694
108,9	9,12	7,40	1,757
107,5	9,10	7,38	1,754
100,6	9,02	7,32	1,738
115	9,19	7,46	1,771
			1,73

Point de prélèvement			
Température(°C)	Vitesse maxi (m/s)	Vitesse corrigé(m/s)	Débit Nm3/min
460,1	7,50	6,08	1,445
385,8	7,11	5,77	1,370
311,5	6,70	5,43	1,290
152,6	5,71	4,63	1,101
225,1	6,18	5,01	1,191
251,5	6,34	5,14	1,222
			1,27

Idem au test N°4 sur le pourquoi et comment on corrige la vitesse

Annexe 3: protocole de mise en œuvre du gazéifieur

Les étapes à suivre pour mettre en œuvre le gazéifieur sont :

- Le chargement qui dure environ 5 min ;
- La mise en marche qui dure de 10 à 15 min ;
- L'arrêt qui consiste à débrancher les souffleurs d'air de la source d'alimentation ;
- Le déchargement qui dure environ 10 min.

Le chargement :

1- Fermer les deux sas de déchargement du gazéifieur et retirer les bouchons placés sur les orifices d'amorçage

2- Verser par le sas de chargement une quantité de charbon de la balle de riz préalablement Pesé à la balance (environ 4 kg) qui constitue la zone morte du gazéifieur

3- Bien étaler le lit charbon et vérifier que le niveau de charbon est à environ 5 cm au fond de la chambre de gazéification.

4- Verser au-dessus du lit de charbon des morceaux de papiers ou des feuilles d'arbre mortes jusqu'à ce atteindre le niveau des orifices d'amorçage du gazéifieur. Ce lit servira d'amorce afin d'accélérer le démarrage du gazéifieur. Environ 1 kg de papiers ou de feuilles mortes suffisent.

5- Charge le gazéifieur avec une quantité préalablement pesée de coques d'anacardes et Veiller à ne pas dépasser le niveau du sas de chargement.

6- Refermer le sas de chargement

La mise en marche :

1- Placer les deux souffleurs au niveau des orifices de soufflage du gazéifieur

2- Connecter les souffleurs au réseau en veillant à ce que les câbles électrique ne soit pas proche d'un bouche d'amorçage ou en contact avec la paroi du gazéifieur.

3- Ouvrir la vanne du circuit de gaz

4- Démarrer le souffleur du gazéifieur selon la configuration des opercules voulus

5- A l'aide de morceau de bois, de cartons ou d'un chalumeau enflammer la zone de combustion à travers chaque une bouche d'amorçage. Un jet de flamme sortant de la bouche d'amorçage est le signe que l'amorçage est réussi.

6- Refermer chaque bouche d'amorçage à l'aide son bouchon. On remarque alors que la sortie d'un épaisse fumée sortant du brûleur.

7- Activer le souffleur N°2 (Air brûleur)

8- Approcher une flamme du brûleur sans s'exposé aux fumées et attendre que le gaz produit s'enflamme.

Le déchargement :

1- Attendre l'extinction de la flamme du bruleur, signe de la fin de la gazéification

2- Fermer la vanne du circuit de gaz

3- Eteindre les souffleurs et les retirer du gazéifieur

4- Attendre au moins le refroidissement total du gazéifieur, signe qu'il y a plus de feu à l'intérieur du réacteur.

5- Ouvrir le sas supérieur et pousser les charbons à l'aide d'un bâton

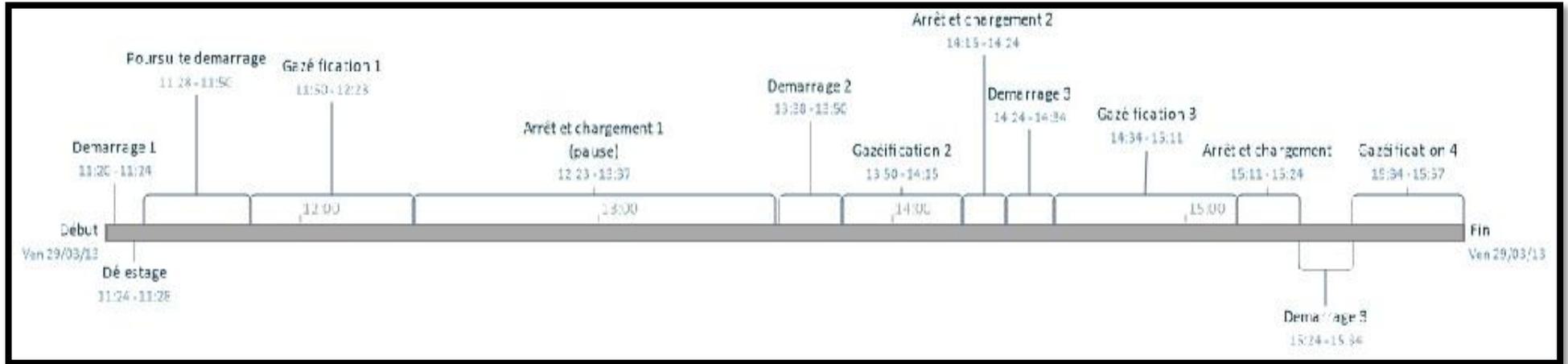
6- Ouvrir les sas de déchargement et vider le charbon.

7- Répéter les étapes 5 et 6 jusqu'au déchargement total du gazéifieur.

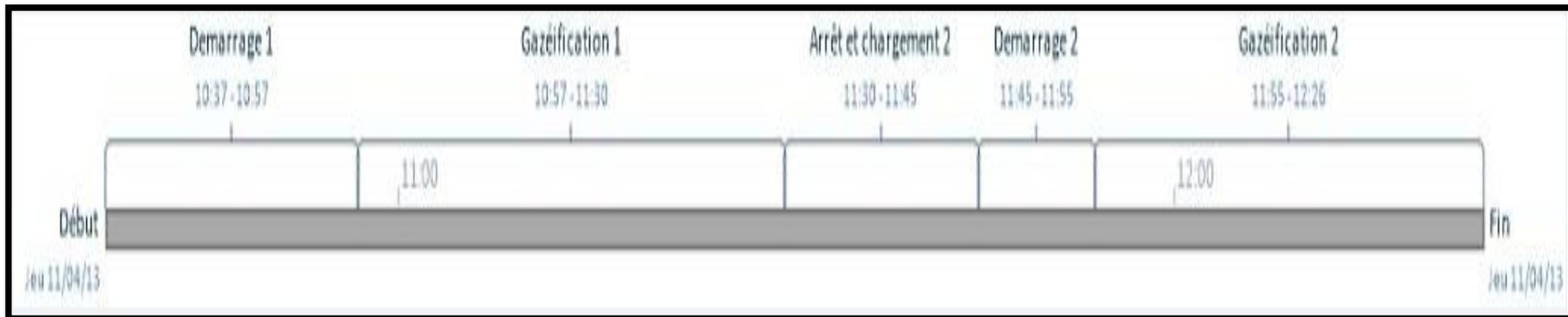
8- Peser la masse totale de charbon retiré du gazéifieur.

Annexe 4 : chronogrammes des différents tests sélectionnés

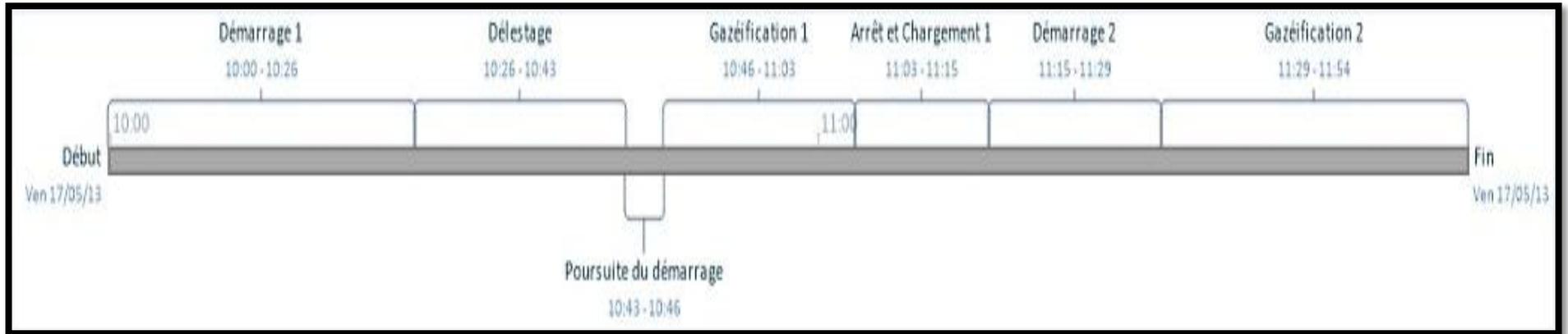
Chronogramme test N°3



Chronogramme test N°4



Chronogramme test N°9



Chronogramme test N°10

