

# COMMUNICATION DE NOTORIETE INTERNATIONALE AVEC ACTE DE CONGRES

Rakotsoana R., Rakotomalala R.M., Andrianaivoravelona J. O., **Ramaroson J. D.**, Andrianary P. A., Randrianarivelo F. « *Conception et réalisation d'un gazogène downdraft à usage domestique : application à la gazéification des éclats d'eucalyptus* ». Congrès International Plasma & Energie, 15 – 19 décembre 2014, Ambohitsaina – Antananarivo.



## ATTESTATION DE PARTICIPATION

Les membres du comité d'organisation du Deuxième Congrès International Plasma-Energie CIPE 2014, attestent par la présente que la communication, dont les détails sont cités ci-dessous, a été présentée à ce congrès. L'acte de communication international correspondant a été soumis et sera publié dans le journal du congrès.

**Titre de la communication :**

Conception et réalisation d'un gazogène downdraft à usage domestique : application à la gazéification des éclats d'eucalyptus

**Auteur et co-auteurs :**

**Rijalalaina RAKOTOSAONA**, Robinson M. RAKOTOMALALA, Jaconnet O. ANDRIANAIVORAVELONA, Jean de Dieu RAMAROSON, Philippe ANDRIANARY, Frédéric RANDRIANARIVELLO

**Intervenant :**

**RAKOTOSAONA Rijalalaina**

**Antananarivo, le 16 Juillet 2015**

Comité Scientifique :

André Pascal, Clermont Ferrand, France.  
Bachir Liani, Tlemcen, Algérie  
Bauchire Jean-Marc, Orléans, France  
Charrada Kamel, Monastir, Tunisie.  
De Izarra Charles, Bourges, France  
Gleizes Alain, Toulouse, France  
Gonzalez Jean-Jacques, Toulouse, France  
Koalaga Zacharie, Ouagadougou, Burkina Faso  
Meunier Jean-Luc, Montréal, Québec  
Pacheco Joël, Toluca, Mexique.  
Pokrzywka Bartłomiej, Cracovie, Pologne  
Rakotomalala Minoson, Antananarivo, Madagascar  
Randriamanantany Zely, Antananarivo, Madagascar  
Razafinimanana Manitra, Toulouse, France  
Zissis Georges, Toulouse, France.



Contact: RAMAROZATOVO Vonjy / RAMANANTSOA Ravo  
e-mail: contact@cipe2.org  
Tél: 032 86 113 44 / 033 09 992 45  
Comité d'organisation du Deuxième Congrès International  
Plasma-Energie  
Domiciliation: ESPA / IME  
BP 566 - Antananarivo 101, MADAGASCAR

## RESUME

La constatation des gaspillages d'énergie par les cuiseurs traditionnels souvent utilisés à Madagascar a motivé la confection du gazogène. Le choix s'est porté sur le type downdraft pour sa souplesse, du point de vue combustibles, mais aussi de l'utilisation du syngas produit. Le gazogène construit à partir des matériels disponibles à Madagascar contient les éléments suivants : la chambre de réaction, son enveloppe et la trémie (qui constituent le corps du gazogène) mais aussi le cyclone, le ventilateur centrifuge, le moteur, le variateur de vitesse et le refroidisseur de gaz (qui constituent les équipements auxiliaires). Nous avons ensuite utilisé le logiciel EES « gasifier », un programme de modélisation pour les gazogènes downdraft afin de déterminer la composition du gaz.

Les tests du gazogène ont été effectués avec des éclats d'eucalyptus avec une humidité de 10,92% et de formule  $CH_{1,37} O_{0,63}$ . A la vitesse maximale, on a obtenu un débit de biomasse de 3,09 kg/h qui décroît avec la diminution de la vitesse et se retrouve à 2,06 kg/h à vitesse minimale. La composition du syngas ne présente pas de différence majeure pour les trois tests concluants, la composition moyenne est  $CO : 21,3\%$ ,  $H_2 : 15\%$ ,  $CH_4 : 2\%$ ,  $CO_2 : 11,23\%$ ,  $N_2 : 50,47\%$  en base sèche. Ces résultats se sont donc avérés concluants pour les éclats d'eucalyptus.

## **I. INTRODUCTION**

Le recours à des sources d'énergie alternatives est incontournable pour continuer à satisfaire les besoins énergétiques, tout en préservant l'environnement. Pour la majorité des ménages malgaches, le bois reste le premier choix en matière de combustible. Celui-ci est pourtant utilisé d'une manière encore très primitive, ce qui ne permet pas de profiter les innombrables potentiels qu'elle peut offrir. La problématique se pose sur la manière dont il faut exploiter la biomasse afin de rentabiliser le plus possible. La principale raison de cette étude est la conception et la réalisation d'un gazogène à petite échelle dans le but de valoriser la biomasse, considérée comme des déchets à Madagascar, en la transformant en gaz utilisable, ainsi que de réduire la consommation en bois pour la cuisson et pour la fabrication de charbon dans les ménages malgache.

## **II. MATERIEL ET METHODE**

### **A. Choix du type de gazogène. [1][2][3]**

Parmi les différents types de gazogène, nous avons choisi de réaliser un gazogène à lit fixe de type courant (downdraft) pour les raisons suivantes :

- Les gazogènes à lit fixe sont les mieux adaptés aux contextes des pays en voie de développement comme Madagascar car la taille des installations est convenable à l'utilisation domestique (cuisson) ou à la production d'électricité à petite échelle.
- Le gazogène downdraft est préféré par rapport à l'updraft, pour la qualité du gaz produit qui contient moins de goudron et donc à usage multiple.
- Les matériaux de construction sont faciles à se procurer. On a choisi l'acier ordinaire pour le corps du gazogène et l'acier galvanisé pour les tuyauteries, qui sont des matériaux non seulement résistants à l'usure du temps mais aussi disponibles sur le marché local.

### **B. Les composants du gazogène [2] [3] [6] [8]**

Les composants du gazogène sont divisés en deux groupes. Il y a les composants qui constituent le corps du gazogène et les équipements auxiliaires.

#### ***Le corps du gazogène***

Afin de faciliter la maintenance ou éventuellement la modification de l'appareil, Le corps du gazogène est divisé en deux éléments séparables : la chambre de réaction avec la trémie et l'enveloppe.

La chambre de réaction avec la trémie constitue le cœur du gazogène. C'est à l'intérieur de celle-ci que se passent les quatre étapes de la gazéification. Elle a été faite à l'aide d'un tube cylindrique en acier ordinaire de hauteur 450 mm, de diamètre intérieur 260 mm et d'une épaisseur de 4 mm. En bas du tube est soudée une plaque épaisse (5mm) perforée qui maintient le combustible et permet le passage des gaz. Il y a un rétrécissement au niveau de la zone de combustion du gazogène pour réduire la quantité de goudron qui se dépose à ce niveau.

L'air est alimenté à la partie basse du gazogène, au tiers de la longueur de la chambre de réaction (une hauteur très commune dans les gazogènes downdraft). D'abord, l'air est amené dans une chambre placée en haut sur le périphérique du réacteur avant d'être distribué à l'aide de trois conduites et ensuite injecté par des buses dans la zone de combustion. Le nombre de buses doit être un nombre impair de telle sorte que le jet d'une buse ne touche pas le jet du côté opposé, en laissant un espace mort entre les deux.

Afin de permettre l'assemblage de la chambre de réaction avec son enveloppe, une bride est soudée à 100 mm du haut. Des trous sont percés sur la périphérie de la bride pour l'assemblage par boulon. Les différentes vues de la chambre de réaction sont présentées sur la figure suivante.

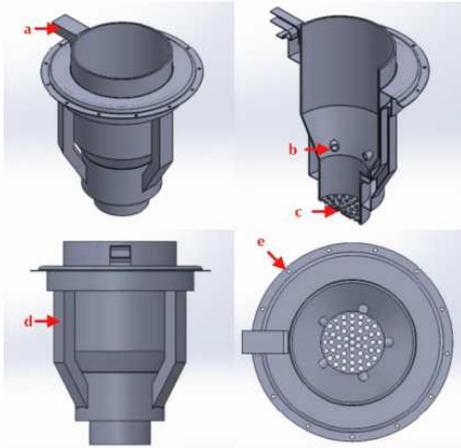


FIG 1 : Différentes vues de la chambre de réaction avec : (a) entrée d'air principale, (b) buse, (c) grille, (d) conduite de distribution d'air et (e) bride



FIG 2 : Photographie de la chambre de réaction

Le réacteur est surmonté d'une trémie dont l'usage permet un approvisionnement continu de biomasse dans le réacteur pendant un certain temps. Les dimensions de la trémie sont respectivement pour la hauteur et le diamètre de 500 mm et 400 mm. Elle est fermée par un couvercle sur la partie supérieure qui empêche l'air d'entrer par le haut. La figure suivante montre les différentes vues de la trémie de stockage de la biomasse.

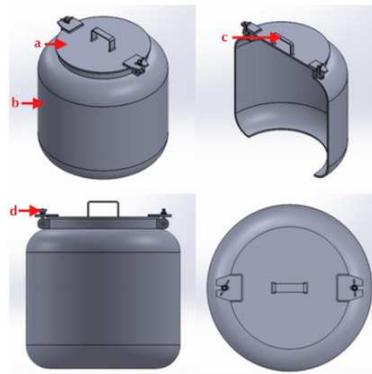


FIG 3 : Différentes vues de la trémie avec : (a) couvercle, (b) corps de la trémie, (c) poigné et (d) écrou de serrage à la main

L'enveloppe permet de stocker temporairement le gaz produit qui sort ensuite par la grille. Cette dernière permet de maintenir le combustible et de récupérer les cendres. Une bride est soudée sur son bord supérieur, permettant l'assemblage du corps du gazogène.



FIG 4 : Différentes vues de l'enveloppe avec : (a) bride, (b) sortie du syngas, (c) récupération du cendre et (d) fixation avec le cadre

L'espace entre l'enveloppe et le réacteur doit être hermétique et le gaz ne peut être évacué que par une perforation réalisée sur la surface latérale de l'enveloppe. Le gaz passe ensuite dans les équipements auxiliaires du gazogène. Une ouverture a été installée au fond de la cuve, pour récupérer les cendres. La figure N°4 montre l'enveloppe de la chambre de réaction sous différentes vues.

## 2. Les équipements auxiliaires

Les équipements auxiliaires comprennent : un système de séparation solide-gaz (le cyclone), un ventilateur centrifuge, un moteur, un dispositif mécanique de variation de tour et un refroidisseur.

### a. Le cyclone

A la sortie de la chambre de combustion, le syngas contient des particules en suspension. Le séparateur largement utilisé dans les procédés de gazéification est un cyclone à flux inversé. Le cyclone est construit avec un tôle d'épaisseur 2 mm. Les différentes vues du cyclone se trouvent dans la figure suivante.

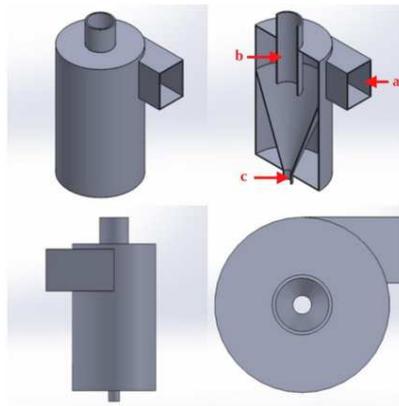


FIG 5 : Différentes vues du cyclone avec : (a) entrée du syngas impur, (b) diaphragme de sortie du gaz purifié et (c) récupération des particules de charbon

### b. Le ventilateur centrifuge

Le ventilateur centrifuge est le poumon du gazogène. Cet appareil permet en même temps l'entrée de l'air dans le gazogène et l'évacuation du syngas produit. La figure N°6 illustre un ventilateur centrifuge avec ses différents composants.

Le ventilateur à pales inclinées vers l'arrière a été choisi du fait de son efficacité par rapport aux ventilateurs à pales radiales. Le nombre de pales utilisées est de 6. La figure N°7 montre le schéma de notre roue avec les 6 pales.

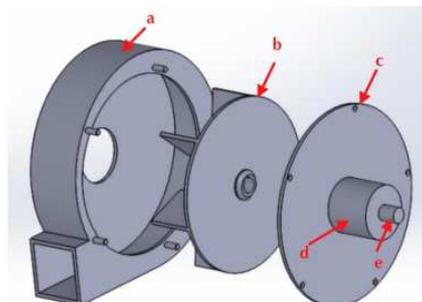


FIG 6 : Les composantes d'un ventilateur centrifuge avec : (a) carter, (b) roue, (c) porte roue, (d) palier et (e) arbre

Le ventilateur centrifuge est placé en aval de la chambre de réaction. Lorsque l'hélice tourne, elle crée une dépression qui aspire l'air depuis l'entrée d'air principale vers la zone de combustion. Le gaz produit passe à travers le cyclone avant d'être expulsé dans le refroidisseur. La vitesse de rotation de la roue détermine le débit de gaz déplacé. Le ventilateur est fabriqué à partir de d'une tôle d'acier de 4 mm d'épaisseur.

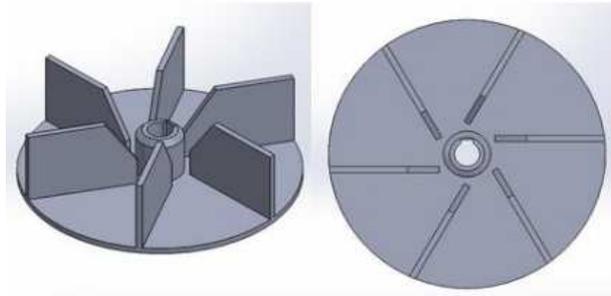


FIG 7 : Schéma de l'assemblage roue-pales

#### *c. Le moteur*

Le moteur utilisé pour faire fonctionner le ventilateur est un moteur électrique asynchrone monophasé dont les caractéristiques sont données dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Les caractéristiques du moteur utilisé

Marque	GEORG SAHM
Puissance nominale	0,75 kW
Tension d'alimentation	220-230 V
Courant nominal	5,40 A
Vitesse de rotation	2800 tr/ min à 50 Hz et 3360 tr/min à 60 Hz
Facteur de puissance $\cos(\varphi)$	0,82
Condensateur permanent	25 $\mu$ F 450 V

#### *d. Le variateur de vitesse*

Le débit d'air qui passe dans l'appareil dépend de la vitesse de rotation du ventilateur. Sur le plan technologique, un variateur de vitesse mécanique est conçu pour varier en continu la vitesse au niveau du ventilateur sans arrêter le moteur. Ce type de variateur est moins performant que celui d'un variateur électronique mais le moyen financier de laboratoire ne permettra pas l'acquisition de ce dernier.

Le variateur est composé d'une roue menante de 130 mm de diamètre montée sur l'arbre du moteur et d'une roue menée de 100 mm placée perpendiculairement à la première. Cette deuxième roue peut coulisser librement sur l'arbre de transmission à l'aide de la manivelle (f). Pour améliorer le transfert de mouvement entre les deux roues, une gaine en caoutchouc est fixée sur la roue menée

Lorsque la roue menée s'éloigne de l'arbre du moteur, la vitesse de rotation de cette dernière augmente. Une poulie est assemblée sur l'arbre de transmission

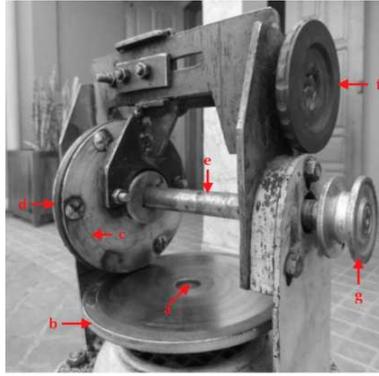


FIG 8 : Variateur mécanique de vitesse avec : (a) arbre du moteur, (b) roue menante, (c) roue menée, (d) caoutchouc, (e) arbre de transmission, (f) réglage de la position de la roue menée et (g) poulie menante

En supposant qu'il n'y a pas de glissement entre les deux roues, les vitesses linéaires de la roue menée et de la roue menante sont les mêmes,

$$\frac{N_2(\text{roue menée})}{N_1(\text{roue menante})} = \frac{dr1}{dr2}$$

Avec

$dr1$  : le diamètre d'un cercle se trouvant sur le plan de la roue menante, de centre O et passant par le point de contact entre les deux roues.

$dr2$  : le diamètre de la roue menée.

$N_1$  et  $N_2$  : respectivement la vitesse de rotation de la roue menée et de la roue menante.

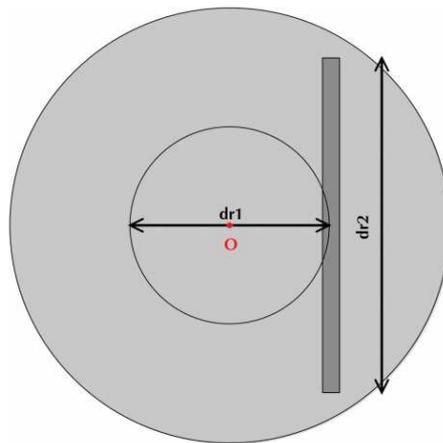


FIG 9 : disposition de la roue menante et la roue menée

Le déplacement de la roue menée est limité à  $dr1(\text{min}) = 40 \text{ mm}$  et  $dr1(\text{max}) = 130 \text{ mm}$ . La vitesse de rotation de la roue menée est comprise entre  $N_2(\text{min}) = 1120 \text{ tr/min}$  et  $N_2(\text{max}) = 3640 \text{ tr/min}$ . Cette valeur est également la vitesse de rotation de la poulie menante.

En fixant la vitesse de rotation maximale au niveau de la pale du ventilateur à  $5500 \text{ tr/min}$  et le diamètre de la poulie menante du variateur à  $40 \text{ mm}$  de diamètre, le diamètre de la poulie au niveau du ventilateur est égal à  $60 \text{ mm}$ .

Après calcul, la plage de vitesse de rotation de la pale est entre  $1680 \text{ tr/min}$  à  $5500 \text{ tr/min}$ .

e. *Le refroidisseur*

Le syngas produit contient une certaine quantité d'eau sous forme de vapeur qui réduit considérablement le pouvoir calorifique du combustible gazeux, donc il est nécessaire de l'éliminer par une simple condensation sur une paroi possédant une grande surface. Le refroidisseur est composé d'un seul tube de grand diamètre et d'une bonbonne qui sont soudés ensemble. La surface totale est suffisamment grande pour permettre la condensation de la vapeur d'eau. Le refroidisseur fait aussi office de réservoir tampon pour le syngas produit.

Une fois assemblé, l'image en 3D de l'appareil conçu est présentée sur la figure suivante



FIG 10 : image du gazogène conçu

		
<p>FIG 11 : chambre de réaction</p>	<p>FIG 12 : enveloppe – cyclone - refroidisseur - ventilateur</p>	<p>FIG 13 : variateur de vitesse</p>

### III. Mise en marche de l'appareil

#### A. La biomasse utilisée

Le bois d'eucalyptus a été choisi pour tester le gazogène pour les raisons suivantes :

- l'eucalyptus est très utilisé à Madagascar comme bois de chauffe et de fabrication de charbon de bois. Il est alors intéressant de trouver une mode de valorisation énergétique d'eucalyptus plus efficace que celui du bois de chauffe et du charbon de bois.
- On peut en trouver facilement d'une quantité importante.
- L'eucalyptus ne contient pas beaucoup de résine, on peut espérer d'obtenir un gaz plus propre.

L'eucalyptus utilisé provient des chutes de bois récupérés dans les scieries dans la ville d'Ambatolampy (50 km au sud d'Antananarivo, la capitale de Madagascar). Elles ont été coupées en petit morceaux d'environ de 1cmx1cmx5cm à la hache. La taille des échantillons devrait, en effet, être assez petite pour permettre son passage à travers l'engorgement situé dans la zone de combustion du gazogène. Les échantillons sont ensuite séchés au soleil pendant 2 jours pour réduire son taux d'humidité. La figure suivante montre la photographie des morceaux de bois d'eucalyptus après séchage.



FIG 14 : Photographie du combustible utilisé lors des tests

#### 1. Humidité du bois

L'humidité est une donnée capitale pour tous procédés de gazéification. La méthode d'analyse de l'humidité utilisée repose sur le principe de séchage/pesage de l'échantillon. Le principe de la méthode est la suivante :

- Pesée de l'échantillon humide avec une précision supérieure à 0,5g.
- Séchage dans l'étuve à 103°C jusqu'à séchage complet de l'échantillon
- Pesée de l'échantillon après séchage jusqu'à en avoir une masse constante.

L'humidité sur base humide en pourcentage est alors donnée par la formule

$$H = 100 \left( \frac{\text{masse}_{\text{frais}} - \text{masse}_{\text{sec}}}{\text{masse}_{\text{frais}}} \right)$$

La durée du séchage est de 1h30min, un temps largement suffisant pour un échantillon de 50 g. L'humidité des différents échantillons ainsi que l'humidité moyenne de l'eucalyptus est présenté dans le tableau suivant :

Tableau N°2 : humidité de l'échantillon

Echantillon	Humidité [%]
Echantillon 1	11,07
Echantillon 2	11,56
Echantillon 3	10,14
moyenne	10,92

## **B. Mode opératoire**

Le protocole expérimental à suivre pour réaliser les tests de gazéification des éclats d'eucalyptus est la suivante. Avant tout démarrage, vérifier le serrage de tous les boulons ainsi que les ouvertures au fond du gazogène, sur le cyclone et sur le refroidisseur.

1. Ouvrir le couvercle de la trémie.
2. Peser le combustible.
3. Démarrer le moteur et régler la vitesse jusqu'au maximum.
4. Mettre du combustible facile à brûler (déchet de papier, de copeaux de bois, ...) au fond de la chambre de réaction.
5. Allumer le feu
6. Verser une poignée du combustible pesé.
7. Attendre 2 minutes pour que le feu prenne et verser le reste du combustible.
8. Fermer le couvercle de la trémie.
9. Tester l'inflammabilité du gaz avec un bruleur à gaz à la sortie du refroidisseur toutes les minutes.
10. Lorsque le feu se stabilise, choisir la vitesse voulue.
11. Attendre jusqu'à l'extinction de la flamme.
12. Arrêter le moteur.
13. Laisser le gazogène se refroidir.
14. Récupérer et peser le mélange de cendre et de charbon tombé à travers de la grille qui supporte les combustibles.
15. Récupérer et peser le reste de combustible non brûlé dans le gazogène.

Ce mode opératoire est une compilation de plusieurs essais préliminaires.

## **C. Résultats et discussions**

Les résultats obtenus sont basés sur les observations au cours du test de gazogène

### **I. Test 1**

Après 12 min et 48 s de marche, la fumée présente un signe d'inflammabilité. A l'approche du bruleur, quelques flammes apparaissent dans l'épaisse fumée. Elles ne sont pas encore stables, et s'éteignent aussitôt dès qu'on enlève le brûleur. En continuant de temps à autre de brûler la fumée, on a obtenu une belle flamme de couleur bleue à la base surmontée d'une couleur orange (témoigne de la présence de CO et H<sub>2</sub>)

A  $t = 16$  min et 59 s cette flamme ne contient aucune fumée et elle est capable de se maintenir par elle-même. La vitesse du ventilateur est toujours au maximum ( $V_p = 5.208$  tr/min). La flamme s'est maintenue jusqu'à  $t = 2$  h 23 min et 52 s. Ce qui donne une durée de 127 min de flamme stable. A la fin de l'opération, lorsqu'on observe l'état du combustible dans le gazogène, les combustibles dans le réacteur sont tous consommés sauf ceux qui sont retenus dans les volumes morts. La figure suivante montre l'évolution de l'inflammabilité du syngas.



FIG 15 : Evolution de l'inflammabilité du syngas

## 2. *Test 2*

Tous les paramètres sont les mêmes que celui du test 1 sauf qu'on a réduit la vitesse du ventilateur à  $V_p = 4.284$  tr/mn. La fumée commence à être inflammable à  $t = 9$  min : 30 s. La flamme se maintient à  $t = 18$  min et 19 s jusqu'à  $t = 2$  h : 22 min et 18 s. Une durée totale de 124 min.

## 3. *Test 3*

On a réduit la vitesse du ventilateur à  $V_p = 3.528$  tr/min. La fumée commence à être inflammable à  $t = 24$  min et 15 s, elle se maintient à  $t = 33$  min : 16 s jusqu'à  $t = 3$  h : 21 min et 19 s, une durée totale de 168 mn.

## 4. *Test 4*

On a démarré le gazogène avec une vitesse de rotation du ventilateur entre 3.528 tr/mn et 4.284 tr/mn, une vitesse intermédiaire entre le test 2 et le test 3. La fumée commence à être inflammable à  $t = 17$  min et 32 s. Au bout de  $t = 26$  min et 45 s, une belle flamme bleu-orange se maintient. On réduit au fur et à mesure d'une manière continue la vitesse du ventilateur jusqu'à 2.520 tr/mn et on observe que la flamme s'éteint.

## 5. *Consommation de combustible*

Le débit de combustible est le rapport entre la quantité de combustible consommé et la durée de l'expérimentation. La quantité consommée étant la différence entre la masse de combustible pesé et la masse de combustible non brûlé dans le gazogène à la fin de l'expérimentation. La durée de l'expérimentation est comptabilisé à partir du moment où le couvercle du gazogène est fermé jusqu'à l'extinction de la flamme produit par le syngas.

Ainsi, le tableau suivant donne les différentes masses, les durées de l'expérience et les débits de bois calculés des quatre tests.