



CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER

EXPERIMENTERS' KIT (GEK)

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME

D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER

SPECIALITE : GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le [04/07/2019] par

Mohamed Tidiane DOUMBIA (20111139)

Directeur de mémoire : M. Igor W OUEDRAOGO
Maître de conférences CAMES

Enseignant-chercheur à 2iE / Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique
(LabEREE)

Travaux dirigés par : M. Sayon SIDIBE Maître
assistant CAMES

Enseignant-chercheur à 2iE / Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique
(LabEREE)

Dr François PINTA
Chercheur au Cirad / Unité de recherche Biomasse, bois, énergie, bio-produits
(BioWooEB)

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr N'TSOUKPOE Kokouvi Edem**

Membres et correcteurs : **Dr Igor W OUEDRAOGO**
Dr Yohan RICHARDSON
Dr Sayon SIDIBE

Promotion [2018/2019]

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Je tiens à remercier vivement mon maitre de stage, Dr François PINTA, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien. Grâce aussi à sa confiance j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions. Il fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

Je remercie également toute l'équipe de l'UR Biowoeb du Cirad pour leur accueil, leur esprit d'équipe et en particulier Dr Laurent VAN STEEN auprès de qui j'ai beaucoup appris.

Je tiens à remercier aussi Jeremy et Charline de leur encadrement et aide dont j'ai bénéficié pendant mes analyses au laboratoire.

Je remercie Laurant Martin qui a œuvré à ce que tout soit disponible sur la plateforme Biomasse Energie du début à la fin de mon stage.

J'adresse mes remerciements à mon encadrant 2IE, Dr Sayon SIDIBE qui m'a beaucoup aidé et conseillé tout le long de mon stage.

Je remercie Valentin Huchon pour son aide, ces conseils et sa bonne collaboration depuis le début de mon stage.

Je tiens à remercier ma tante Dr CAMARA Fatoumata, ma femme CAMARA Mariam et tout le reste de ma famille pour leur soutien sans faille.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont conseillé lors de la rédaction de ce rapport de stage : Sébastien, Luck et Maria.

RESUME

L'Unité de Recherche Biowoob participe au développement de technologies novatrices performantes aptes à répondre aux besoins énergétiques et aux enjeux environnementaux des pays du sud et du nord. Notre étude s'inscrit dans cette dynamique et porte sur la caractérisation paramétrique d'un système compact de production d'électricité par gazéification de biomasse à petite échelle : Gasifier Experimenters' Kit (GEK) fonctionnant en régime stabilisé. La biomasse utilisée est le bois de pin maritime avec une granulométrie G40 ; à trois différentes teneurs en eau de la biomasse (10 ;18 ;23) %. Le paramètre du niveau de charges électrique a été expérimenté en trois configurations 5, 10 et 12 kWe. Nos expérimentations ont permis de mettre en évidence que l'équivalence ratio (ER) est non seulement influencé par la teneur en eau de la biomasse mais aussi par le niveau de charge électrique. L'équivalence ratio est compris entre 0,2 et 0,3 avec des consommations spécifiques du moteur comprise entre (1,2 et 2,5) kg de bois brut/kWh. La teneur en eau de la biomasse influence également le rendement électrique global du système (GEK). Le meilleur rendement énergétique mesuré en production électrique est de 20% obtenu en regime de production 10 kWe avec du bois à 10% d'humidité.

Mots clés : biomasse, gazéification, syngaz, électricité, rendement, équivalence ratio

ABSTRACT

The Research Unit Biowoob aim to contribute to the development of northern and southern countries in innovation and high-performance technology area in order to meet both the energy need and the environmental issues. Our study follows the same aim, its objective is the parameter characterization of a compact system for electricity production by biomass gasification: Gasifier Experimenters' Kit (GEK). The biomass that we use is the maritime pin with G40 as granulometry level; At different water content (10; 18; 23; 26) % combine to different electrical engine load (5;10;12) kW. Our experimentation allows us to discover that the ratio equivalent is not only influenced by the biomass' water content but by the engine electrical load level. The values of the ratio equivalent are between 0.2 and 0.3; with the engine spec

ificial consumption between (1.2 and 2.5) kg gross of wood / kWh. The electrical efficiency of the system is influenced too by biomass water content. The best electrical efficiency 20% is found at the experimentation with 10% moisture content and 10 kW of electric load.

Key words: biomass, gasification, syngas, electricity, efficiency, equivalence ratio

LISTE DES ABBREVIATIONS

10M10 :	Teneur en eau de la biomasse à 10% et Moteur à 10 kW
2ie :	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
Biowoob :	Biomasse, bois, énergie, bioproduits
Cirad :	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
ER :	Equivalence Ratio
GC MS :	Gas Chromatography Mass Spectrometre
GEK :	Gasifier Experimenters' Kit
PCI :	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCU :	Process Control Unit
Pcom :	Pression de la zone de combustion
PCS :	Pouvoir Calorifique Supérieur
Pfilt :	Pression dans le filtre
SNG :	Syngaz
PP20 :	Power Pallet 20
Tred :	Température de la zone de réduction
Trst :	Température de la zone de restriction
UR :	Unité de Recherche

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
RESUME.....	II
ABSTRACT	II
LISTE DES ABBREVIATIONS	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1 Objectif général	2
2 Objectifs spécifiques :	2
3 Méthodologie globale :	2
4 Méthodologie des travaux :	3
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1 Définition et composition de la biomasse	4
2 Les processus de la gazéification.....	4
3 Les réactions chimiques de la gazéification	4
4 La technologie de gazéification de biomasse.....	5
4.1 Les réacteurs à lit fixe	5
4.1.1 Les lits fixes contre-courant	5
4.1.2 Les lits fixes co-courant.....	6
4.2 Les réacteurs à lit fluidisé	7
4.2.1 Les lits fluidisés dense	8
4.2.2 Les lits fluidisés circulant	8
4.2.3 Les réacteurs à flux entraîné.....	9
5 Les atouts et contraintes des différentes technologies.....	10
6 Les produits de la gazéification de biomasse	11
MATERIEL ET METHODES	14
1 Description du Gasifier Experimenter's Kit (GEK)	14
2 Principe du Gasifier Experimenter's Kit (GEK)	14
3 Préparation de la biomasse.....	16

4	Caractérisation de la biomasse.....	16
4.1	Analyse élémentaire.....	16
4.2	Analyse immédiate.....	16
4.2.1	Teneur en humidité.....	16
4.2.2	Teneur en matière volatiles.....	16
4.2.3	Teneur en cendre	17
4.2.4	Teneur en carbone fixe	17
5	Pouvoir calorifique.....	17
6	Analyse des produits de la gazéification.....	17
6.1	Ligne d'échantillonnage du gaz	17
6.2	Analyse des gaz incondensables	18
6.3	Analyse des condensables.....	19
6.3.1	Quantification des goudrons.....	19
6.3.2	Teneur en eau des condensables (Karl-fisher).....	19
7	Méthode d'expérimentation :.....	20
7.1	Avant l'expérimentation	20
7.2	Pendant l'expérimentation	20
7.3	Après l'expérimentation.....	20
8	Méthode de calculs	21
8.1	La durée de la gazéification	21
8.2	Le débit de biomasse,.....	21
8.3	Débit d'air	21
8.4	Débit de gaz	21
	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	23
1	Résultats analyses immédiates et élémentaires.....	23
2	Analyse des profils de température	24
3	Analyses des gaz incondensables.....	24
4	Analyse des condensables : goudrons	28
5	Bilan matière.....	29
6	Bilan énergie	31
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	34
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	35

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

ANNEXES	37
1 Annexe 1 : Équipements utilisés pour expérimentation GEK,	37
2 Annexe 2 : Protocole d'utilisation du GEK	41

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 comparaison des différents types de procédés</i>	10
Tableau 2 liste des expérimentations	20
Tableau 3 analyse immédiate et élémentaire : biomasse, charbon et cendres.....	23
Tableau 4 températures du réacteur de gazéification	24
Tableau 5 composition syngaz des expérimentations	25
Tableau 6 Production de goudrons des expérimentations	28
Tableau 7 bilan matière gazogène	29
Tableau 8 bilan matière moteur.....	31
Tableau 9 bilan énergie gazogène	31
Tableau 10 bilan énergie moteur	32
Tableau 11 rendement électrique expérimentations	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 réacteur à lit fixe contre-courant (Xuan-Huynh, 2018)	6
Figure 2 réacteur à lit fixe co-courant (Xuan-Huynh, 2018).....	7
Figure 3 réacteur à lit fluidisé (Xuan-Huynh, 2018).....	8
Figure 4 réacteur à lit entraîné (Xuan-Huynh, 2018)	9
Figure 5 dégradation de la biomasse en ses sous-produits (M. BASSIL, 2012)	12
Figure 6 Les produits de gazéification de biomasse (M. BASSIL, 2012).....	12
Figure 7 schéma général du GEK.....	15
Figure 8 séchage biomasse	16
Figure 9 Biomasse (pin maritime).....	16
Figure 10 ligne d'échantillonnage syngaz (Biowoeb)	18
Figure 11 schémas de principe micro GC	18
Figure 12 schémas de principe Karl fischer	19
Figure 13 Humidité du syngaz en fonction de humidité de bois	26
Figure 14 PCI syngaz en fonction de TH biomasse	26
Figure 15 influence charge sur ER.....	27
Figure 16 influence TH biomasse sur ER.....	28
Figure 17 Produits de gazéification des expérimentations	30
Figure 18 rendement électrique en fonction TH biomasse en fonction TH biomasse.....	33

INTRODUCTION GENERALE

Dans les années 20 en Europe, la production de gaz des tracteurs, des camions et des voitures était fait par le gazéifieur (World Bank Technical Paper, 1995). Comme cette technologie n'était pas commode et était incertaine à l'époque, elle tomba alors dans l'oubli.

A cause de la rareté du pétrole pendant la seconde guerre mondiale, la technologie de gazéification de biomasse apparait une nouvelle fois en Europe ainsi qu'en Asie, en Amérique Latine et en Australie. En Europe, plus d'un million de véhicules utilisant le gazéifieur pour tourner ont contribué à maintenir le transport vivant (World Bank Technical Paper, 1995). La plupart de ces gazéifieurs fonctionnaient au charbon ou au bois. Encore une fois la technologie tomba dans l'oubli à cause du retour de la paix au détriment du pétrole qui était moins cher à l'époque. Mais la crise énergétique des années 70 et 80 a donné un regain d'intérêt à la technologie de gazéification de biomasse. A la recherche d'une solution à la crise, la gazéification de biomasse était vue comme pouvant être une alternative. D'ailleurs le manque des ressources énergétiques des pays développés a été un argument en faveur de la technologie de gazéification à l'époque.

Maintenant qu'en 2019, le coût d'extraction des ressources d'énergie fossiles (pétrole) est devenu une grande contrainte ; le développement de la technologie de gazéification de biomasse apparait comme une alternative viable pour les industries à moyennes échelle pourvue qu'il ait une disponibilité en ressources (biomasse).

Les besoins énergétiques du monde continuent d'augmenter. Les sources d'énergie fossile contribuent à 81 % à la satisfaction de ces besoins et la biomasse y contribue à hauteur de 12 % seulement. En 2035 la consommation mondiale en énergie augmentera de 53 % ; Et les sources d'énergie fossiles fourniront la plus grande part. (Agence international de l'Energie, 2011) . Pourtant les sources d'énergie fossiles sont épuisables et sont non renouvelables à l'échelle humaine. En plus, le coût d'extraction de cette ressource constitue une contrainte majeure actuellement. D'ailleurs la consommation de source d'énergie fossile provoque l'émission des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique. Depuis la révolution industrielle la concentration du CO_2 dans l'atmosphère a augmenté de 40 % (Biomass Power for the World, 2015).

L'utilisation judicieuse de la biomasse peut apporter solutions aux problèmes socio-économico-environnementaux. Ces bénéfices peuvent être la protection du climat, des ressources, la

sécurité énergétique et le développement des zones rurales (Daniela , et al., 2011). Depuis le protocole de Kyoto en 1997, il y a un regain d'intérêt pour l'utilisation de la biomasse en tant que source d'énergie (Chi-Hung, et al., 2017). Aux Etats-Unis, 30% de la consommation du pétrole devrait être remplacé par la biomasse en 2030. L'Union Européenne prévoit qu'en 2040, 40% de l'utilisation de la biomasse pour couvrir ses besoins énergétiques : électricité, chauffage et climatisation (ADEME, 2007).

Aujourd'hui, parmi les technologies de valorisation énergétique de la biomasse, la gazéification est un candidat privilégié par sa maturé. C'est dans ce contexte que All Power Lab a développé un système compact de production d'électricité par la gazéification de biomasse. Ce système nommé Gasifier Experimenters' Kit (GEK), peut être utilisé pour la production d'électricité à petite échelle. Le GEK répond-il aux spécifications techniques du constructeur ? Notre travail consiste en la caractérisation paramétrique du GEK. Il sera divisé en trois chapitre.

- Chapitre 1 : dans ce chapitre nous avons définis la biomasse ainsi que ces différentes méthodes de valorisation énergétique. Nous avons aussi décrit les différents types de réacteurs de gazéification.
- Chapitre 2 : dans ce chapitre nous avons décrit les matériels et méthodes utilisés pour le travail.
- Chapitre 3 : dans ce chapitre nous avons présenté et discuté les résultats de nos travaux.

1 Objectif général

L'objectif général de nos travaux est la caractérisation paramétrique du Gasifisier Expérimenters' Kit (PP20) de l'entreprise All Power Lab en fonction de la teneur en eau de la biomasse et du taux de charge du groupe électrogène.

2 Objectifs spécifiques :

De l'objectif général découlent 2 **objectifs spécifiques** :

1. Etablir le bilan matière du GEK
2. Etablir le bilan énergie du GEK

3 Méthodologie globale :

La méthodologie globale de ces travaux consiste en la réalisation d'expérimentations scientifiques sur le Gasifier Experimenters' Kit de la plateforme Biomasse Energie du Cirad :

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

avec une même biomasse : bois du pin maritime (Pinus pinaster) qui sont en plaquettes forestières ; granulométrie G40.

- à des teneurs en humidité : 10%, 18%, 23% et 26%
- à 3 taux de charge: 29% ,59% et 74% correspondant respectivement à 5 ; 10 ; 12,5 kWe

Nous avons effectué quelques expérimentations de prise en main ensuite 6 expérimentations proprement dites avec les configurations suivantes :10M10, 18M5 ; 18M10, 23M10 26M10 et 26M12. (Exemple pour lire la nomenclature 23M12 : Teneur en eau biomasse 23%, Moteur à 12 kWe)

4 Méthodologie des travaux :

Pour mener à bien nos travaux nous avons procédé par des étapes :

- Etude bibliographique
- Caractérisation de biomasses
- Etudes expérimentales
- Caractérisation des produits de l'expérimentation (charbons ; syngaz)
- Bilan matière
- Bilan énergie
- Exploitation et analyse des résultats
- Rédaction des rapports d'avancement mensuel et du rapport final

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1 Définition et composition de la biomasse

La biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale utilisable à des fins alimentaires, énergétiques ou agronomiques. Les principaux composants de la biomasse sont le carbone, l'hydrogène ainsi que l'oxygène dans des proportions proches de $C_6H_9O_5$ (AREC, 2019). La proportion de ces éléments varie selon la biomasse (Donald L., 1998). La biomasse est composée d'environ 50 %m en C, 40 %m en O et 6 %m en H. Ils y existent peu de N (de 0,4 à 1,2 %m environ). L'azote (N), le soufre (S), le chlore (Cl), le silicium (Si), le potassium (K), le phosphore (P), le calcium (Ca) ainsi que le magnésium (Mg) sont les minéraux présents dans la biomasse (Manel Dahmani, 2017).

Selon la nature de la biomasse, différentes filières de valorisation énergétiques sont favorisées :

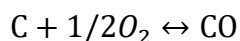
2 Les processus de la gazéification

Le processus de la gazéification se déroule en trois phases majeures. La première phase consiste à la décomposition de la biomasse sur l'effet de la pyrolyse. La pyrolyse produit du résidu de charbon, des goudrons et des matières volatiles. A la deuxième phase les matières volatiles et goudrons sont oxydés. A la troisième phase, nous assistons aux réactions homogènes entre les résidus de charbon et les gaz issu de la phase d'oxydation. Ce sont ces réactions homogènes qui génèrent les gaz élémentaires que l'on retrouve dans le syngaz. Comme CO , CO_2 , H_2 , C_nH_m . Les réactions ci-après décrivent les principales réactions opérant lors d'une gazéification .

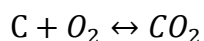
3 Les réactions chimiques de la gazéification

Les réactions (Juniper Consultancy Services Ltd, 2001)

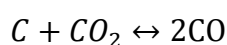
Réaction de combustion partielle



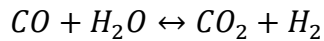
Réaction de combustion



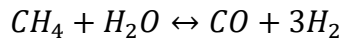
Réaction de Boudouard



Réactions water-gas-shift



Réaction de reformage



4 La technologie de gazéification de biomasse

4.1 Les réacteurs à lit fixe

Les réacteurs à lit fixe sont simples et robustes en général. Dans ces procédés la biomasse formant un lit dense dans le réacteur se déplace de manière verticale. On distingue plusieurs réacteurs à lit fixe. (M. BASSIL, 2012).

4.1.1 Les lits fixes contre-courant

Pour alimenter les réacteurs à lits fixes contre-courant en biomasse, on introduit la biomasse par le haut alors que l'air est introduit par le bas. L'avantage de ces réacteurs est d'accepter des biomasses avec un taux d'humidité important. Par contre, le gaz produit est fortement chargé en goudrons formés lors de la phase de pyrolyse. La concentration de goudron importante dans le gaz augmente son PCI lorsqu'il est valorisé dès la sortie du réacteur avant refroidissement. (M. BASSIL, 2012). Pour injecter ce type gaz dans un moteur à gaz, il faudra le nettoyer suffisamment.

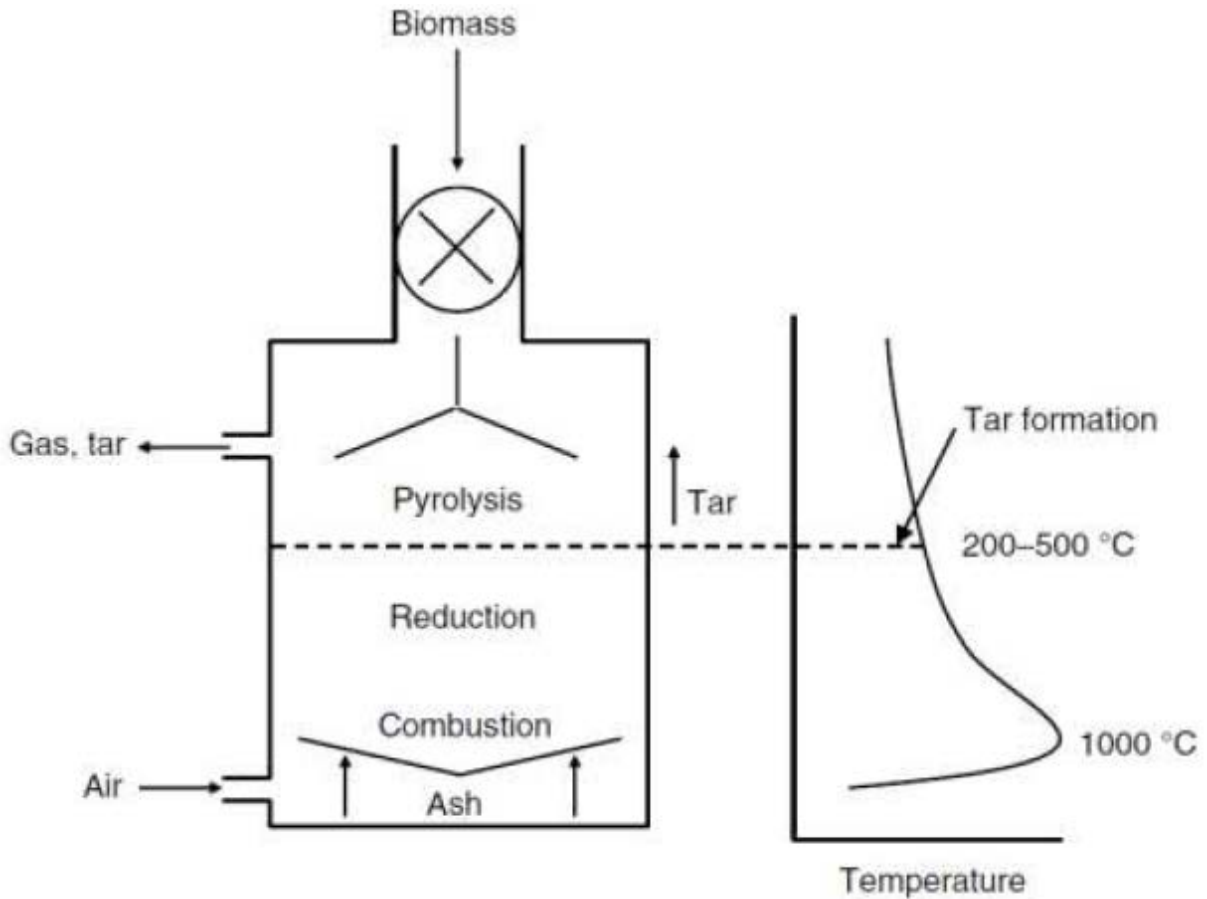


Figure 1 réacteur à lit fixe contre-courant (Xuan-Huynh, 2018)

4.1.2 Les lits fixes co-courant

Dans les réacteurs à lits fixes co-courant, la biomasse et l'air sont introduits en partie haute du réacteur. On crée une restriction de diamètre au niveau de la zone d'injection de l'air pour créer des zones vides qui sont favorables à l'oxydation des matières volatiles. Le gaz produit passe par une zone d'oxydation à haute température avant d'être évacué. Cela favorise le craquage thermique des goudrons. La teneur en goudrons du gaz produit est beaucoup plus faible dans ce cas. Ce type de réacteurs est plus adapté à la production d'électricité décentralisée, en l'injectant dans un moteur à gaz (Gazéification.info, 2019).

Cependant ces réacteurs à lits fixes sont plus contraignants sur la qualité et l'homogénéité du combustible et nécessitent un réglage pointu.

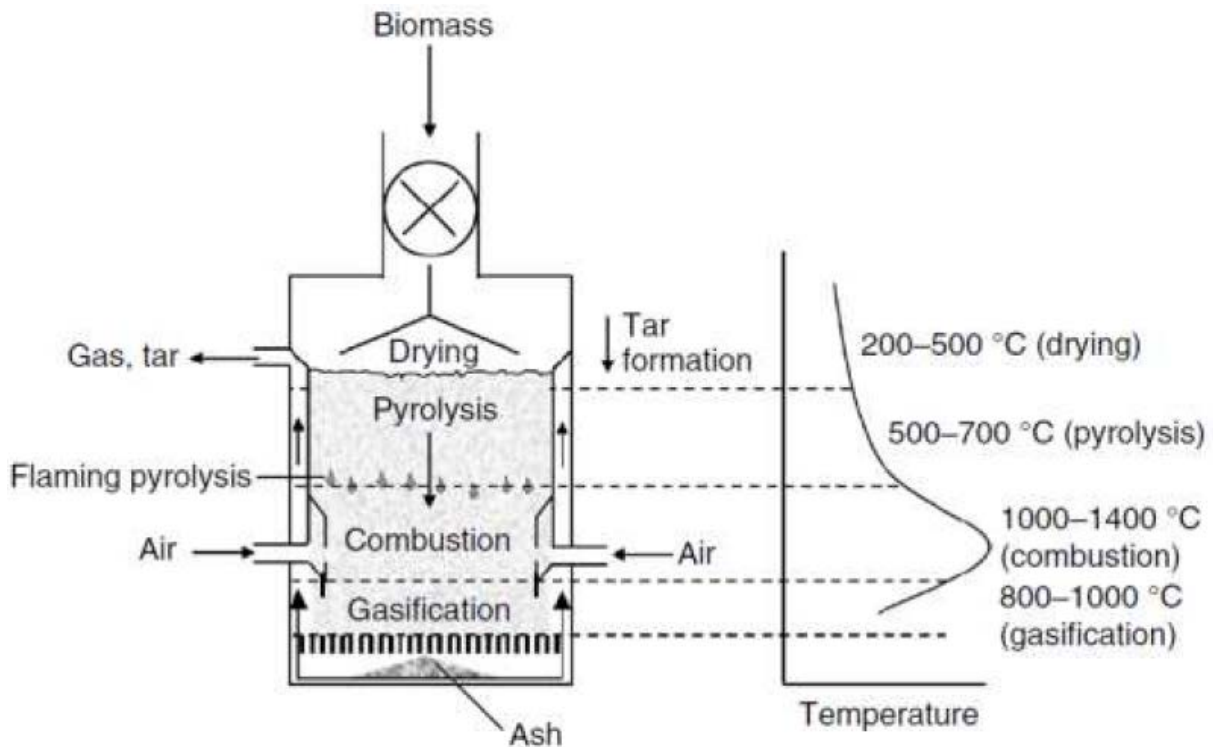


Figure 2 réacteur à lit fixe co-courant (Xuan-Huynh, 2018)

4.2 Les réacteurs à lit fluidisé

Dans ce type de réacteur, l'air est introduit à haute vitesse dans un lit ; c'est par cela que le combustible solide est fluidisé. Il est composé de particules de faible diamètre, par exemple du sable, pour améliorer la fluidisation. Le combustible solide se comportant comme un fluide et cela provoque une bonne homogénéité de température et de concentration des réactifs. Le convoyage du solide est en outre facilité. Mais, la fluidisation n'est rendue possible qu'avec des particules de petite taille (2 à 5 mm), ce qui nécessite généralement un broyage préalable de la biomasse (Gazéification.info, 2019).

En plus, le gaz produit est fortement chargé en particules, nécessitant son traitement avant sa valorisation. Contrairement au lit fixe, la fluidisation permet l'utilisation de combustibles plus variés tels que les CSR (Combustibles Solides de Récupération). En revanche, sa complexité de mise en œuvre le rend peu adapté aux installations de faible puissance (Gazéification.info, 2019).

4.2.1 Les lits fluidisés dense

Dans les lits fluidisés dense, les gaz oxydants traversent une grille sur laquelle repose le combustible avec une vitesse juste assez (1-2 m/s) afin de permettre le brassage des particules sans les entraîner hors du lit. L'exploitation des lits fluidisés dense est complexe, notamment au niveau du contrôle du niveau du lit lors des variations de charge. De plus, son fonctionnement est optimal lorsque la taille des particules est calibrée (Gazéification.info, 2019), (M. BASSIL, 2012).

4.2.2 Les lits fluidisés circulant

Dans les lits fluidisés circulant, le combustible circule entre la zone de réaction et un cyclone séparateur par lequel les cendres sont éliminées. Une partie des particules est entraînée hors du lit car la vitesse de fluidisation est élevée (4 à 6 m/s). Par rapport aux lits fluidisés dense, les lits fluidisés circulant ont une grande tolérance vis-à-vis du combustible. Actuellement la majorité des procédés de démonstration sont basés sur le principe du lit fluidisé circulant (Gazéification.info, 2019), (M. BASSIL, 2012).

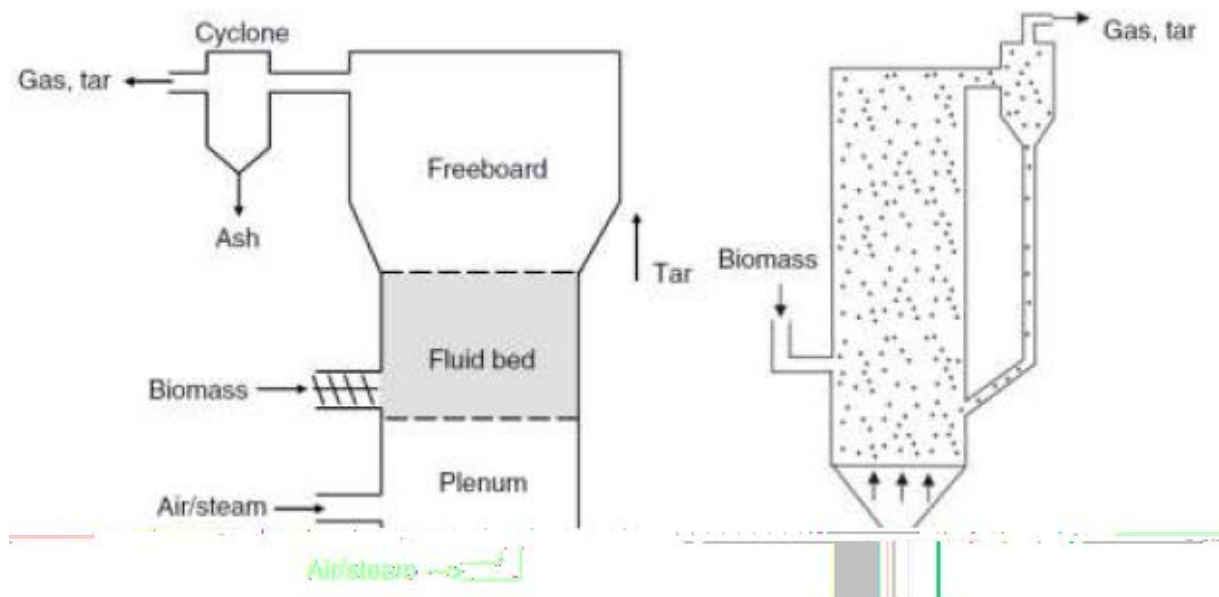


Figure 3 réacteur à lit fluidisé (Xuan-Huynh, 2018)

4.2.3 Les réacteurs à flux entraîné

Le combustible est pulvérisé dans le flux gazeux d'agent gazéifiant dans les réacteurs à flux entraîné. La vitesse de fluidisation est supérieure à 6 m/s. La vitesse des particules est proche de la vitesse des gaz. La température dans le réacteur est élevée (1400 – 1600°C) avec une pression comprise entre 20 et 50 bars. La vitesse de réaction est rapide. Il en résulte un craquage complet des goudrons. Il a un bon rendement, un faible impact environnemental ainsi qu'une forte puissance d'installation (> 20 MWe). C'est l'une des meilleures technologies pour convertir le charbon en électricité à grande échelle (Gazéification.info, 2019).

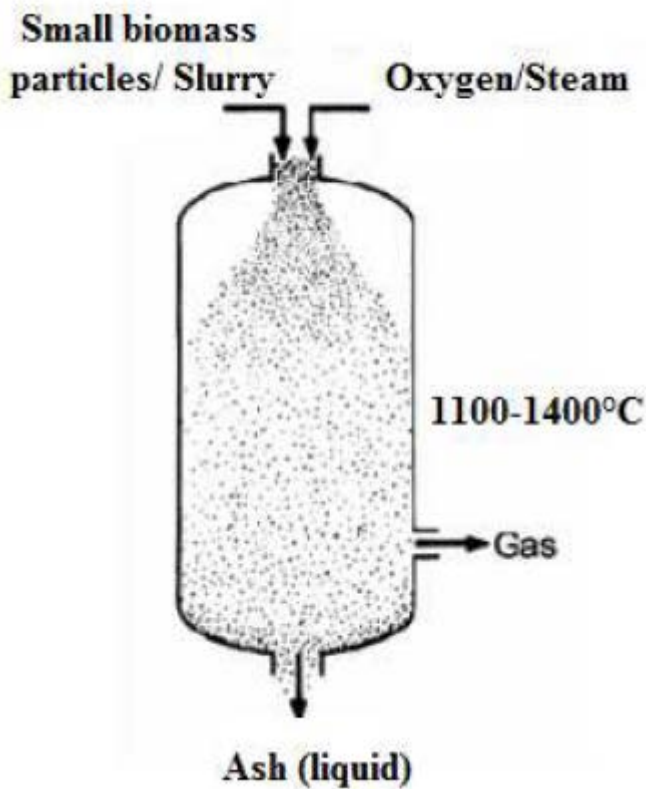


Figure 4 réacteur à lit entraîné (Xuan-Huynh, 2018)

5 Les atouts et contraintes des différentes technologies

Tableau 1 comparaison des différents types de procédés

		Avantages	Inconvénients
Lit fixe	Co-courant	<ul style="list-style-type: none"> • Simple de conception et éprouvé par certains types de combustibles • Taux de conversion élevé • Gaz relativement propre si combustible est approprié 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustible homogène et de taille significative • Taille des installations très limitée (350 kWe) • Possibilité de fusion des cendres dans la grille réacteur avec blocage • Faible humidité des combustibles nécessaires • Coût de maintenance élevée
Lit fixe	Contre-courant	<ul style="list-style-type: none"> • Construction simple et robuste • Rendement thermique élevé • Plus grande souplesse vis-à-vis de l'humidité de la matière première 	<ul style="list-style-type: none"> • Température de gaz faible en sortie avec risque de condensation • Gaz très chargé en goudron • Inadapté à la production d'électricité
Fluidisé	Dense	<ul style="list-style-type: none"> • Bon contrôle des températures • Vitesse de réaction élevée • Bon contact solide/gaz • Construction relativement simple • Pas de limite de taille • Traitement catalytique dans le lit possible 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille minimale pour être économique 20 MWe • Taux de particules dans le gaz élevé • Perte de C avec les cendres par entrainement limitant les rendements • Nécessite des particules de faible taille • Humidité faible <20% sensible à la répartition granulométrique

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

			<ul style="list-style-type: none"> • Taux de goudron modéré à élevé
Fluidisé	Circulant	<ul style="list-style-type: none"> • Bon contrôle de la température et de la vitesse des réactions • Grande tolérance par rapport au combustible • Taux goudrons dans le gaz modéré • Taux de conversion élevé • Pas de limite de taille 	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de particule dans les gaz élevé • Humidité faible <20% • Taille minimale pour être économique 20 MWe • Pert de C avec les cendres • Nécessite de particules de faible taille pour bénéfice optimal des propriété
Fluidisé	Entrainé	<ul style="list-style-type: none"> • Bon contact gaz solide et mélange • Vitrification des cendres • Pas de limite de taille • Taux de conversion élevé • Gaz propre par rapport au goudron 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût biomasse élevé • Haute température, donne gaz de qualité mais faible PCI • Inventaire des combustibles limités • Très forte taille minimale >50 MWe

6 Les produits de la gazéification de biomasse

La gazéification de la biomasse conduit à deux types de produits. Les uns sont les produits gazeux (les gaz condensables et les gaz incondensables) et les autres sont les solides (enrichi en carbone par rapport à la biomasse).

Pour les produits gazeux, les gaz incondensables sont constitués de mélange de CH_4 , CO , CO_2 et H_2 ainsi que NH_3 , HCl , H_2S , HCN . Et les gaz condensables sont constitués de vapeur d'eau et de goudron.

Quant aux solides ce sont des résidus enrichis en carbone par rapport à la biomasse $C_xH_yO_z$. Ils contiennent aussi des inorganiques tels que K, Na, Mg, Si et Al.

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

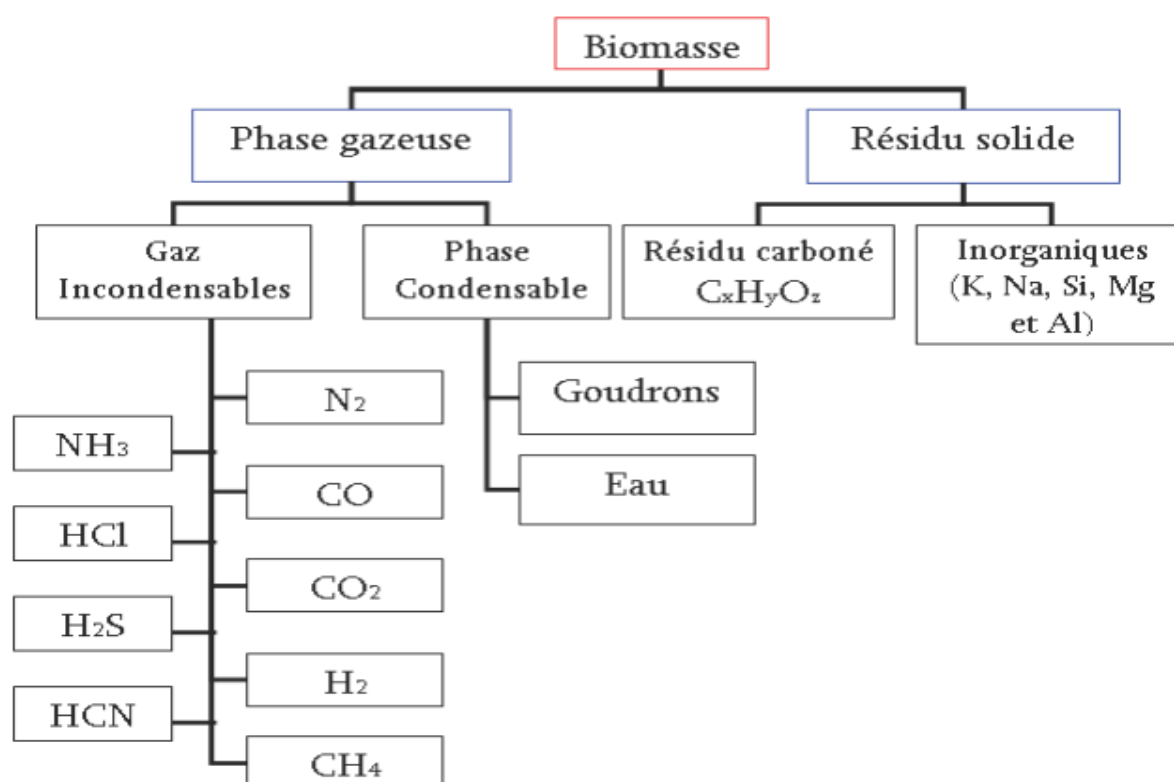


Figure 5 dégradation de la biomasse en ses sous-produits (M. BASSIL, 2012)

	Unité	Lit fixe co-courant	Lit fixe contre-courant	Lit fluidisé circulant	Lit fluidisé indirect de type FICFB (vapeur d'eau)	Lit fluidisé sous pression (air, type bioflow)	Lit entraîné (oxygène/vapeur d'eau, type CHOREN)
Température	°C	500-1000		800-1000	850	850	1500
Pression	bar	1	1	1	1	20	25
Teneur en eau du syngas	% sur masse sèche	6-25	10-50	13-20	n.d. (~20)	5-20	Résidus de pyrolyse
Particules	g/Nm ³	0,1-8	0,1-3	8-100	5-10	n.d.	~0 (vitrification)
Goudrons	g/Nm ³	0,01-6	10-150	2-30	1,5-4,5	2,5-3,7 (goudrons légers)	n.d. (~0)
PCI	kWh/Nm ³	1,1-1,6	1-1,9	1-1,6	3,6	1,4-1,8	-
H ₂	% vol.	15-21	10-18	15-22	35-45	9,5-12	40
CO	% vol.	10-22	15-25	13-15	20-30	16-19	39
CO ₂	% vol.	11-13	8-10	13-15	15-25	14-18	20
CH ₄	% vol.	1-5	2-5,5	2-4	8-12	5,5-7,5	<0,1
C _n H _m	% vol.	0,5-2	n.d.	0,1-1,2	n.d.	n.d.	~0
N ₂	% vol.	~50	~50	~50	3-5	~50	0,11

Figure 6 Les produits de gazéification de biomasse (M. BASSIL, 2012)

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

Après cette étude bibliographique, dans la suite du document, nous parlons d'abord des matériels et méthodes utilisés pour mener à bien nos expérimentations. Ensuite nous présentons et discutons les résultats obtenus pendant nos expérimentations. Enfin, nous faisons une conclusion des résultats de nos expérimentations et proposons quelques idées d'améliorations qui sont les perspectives.

MATERIEL ET METHODES

1 Description du Gasifier Experimenter's Kit (GEK)

Le GEK est un système compact de production d'électricité par gazéification de biomasse. Il est développé par l'entreprise Californienne All Power Labs. C'est un leader mondial dans le domaine de la gazéification à petite échelle. Le GEK est le fruit d'un long travail commencé depuis 2008. Ces dimensions sont de 145x145x223 cm; il consomme des biomasses dont la teneur en eau comprise entre 10 et 30 wt % sur base sèche, avec une granulométrie de 12 à 40 mm.

IL est constitué de : une trémie, un réacteur de gazéification, un filtre à gaz, un groupe électrogène GM Vortec 3.0L 4 cylindre à allumage par étincelle qui peut produire jusqu'à 17 kW, un générateur MeccAlte NPE 32 E/4 et une unité de commande PCU.

Le PCU du GEK contrôle, surveille, informe et répond en temps réel aux conditions internes du réacteur de gazéification, du filtre à gaz et du moteur à gaz. Il règle de manière automatique le mélange air/gaz injecté dans le moteur par le biais d'un capteur d'oxygène Bosch à large bande. Et cela en mesurant la quantité d'oxygène dans les gaz d'échappement pour savoir si le mélange air/gaz injecté dans le moteur est suffisant ou pas. Le capteur d'oxygène surveillé par un lambda mètre envoie un signal analogue au PCU. C'est ce signal qui est utilisé pour maintenir le bon ratio air/gaz injecté dans le moteur. Le PCU contrôle de même l'allumage de la torchère.

2 Principe du Gasifier Experimenter's Kit (GEK)

L'alimentation du GEK en biomasse est faite comme suit : par le haut du GEK, la biomasse est introduite et stockée dans une trémie de 330 litres qui a la forme d'un entonnoir. Elle est poussée par une vis sans fin pour arriver dans le réacteur de gazéification. La vis sans fin est contrôlée par un capteur de niveau situé dans la partie supérieure du réacteur de gazéification. Dans le réacteur de gazéification, la biomasse traverse plusieurs étapes qui sont : le séchage, la pyrolyse, la combustion et la réduction. Il est produit du syngaz et des résidus charbonneux et cendreux. Le syngaz sort du réacteur et passe par un cyclone. Le cyclone capte ces particules solides. Le syngaz passe ensuite par un filtre à charbon. Le filtre à charbon retient quelques goudrons et vapeurs d'eau qu'il contient. A la sortie du filtre le syngaz est injecté dans le groupe électrogène pour produire l'électricité. Une partie de la chaleur des gaz d'échappement est récupérée pour améliorer la réaction de pyrolyse.

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

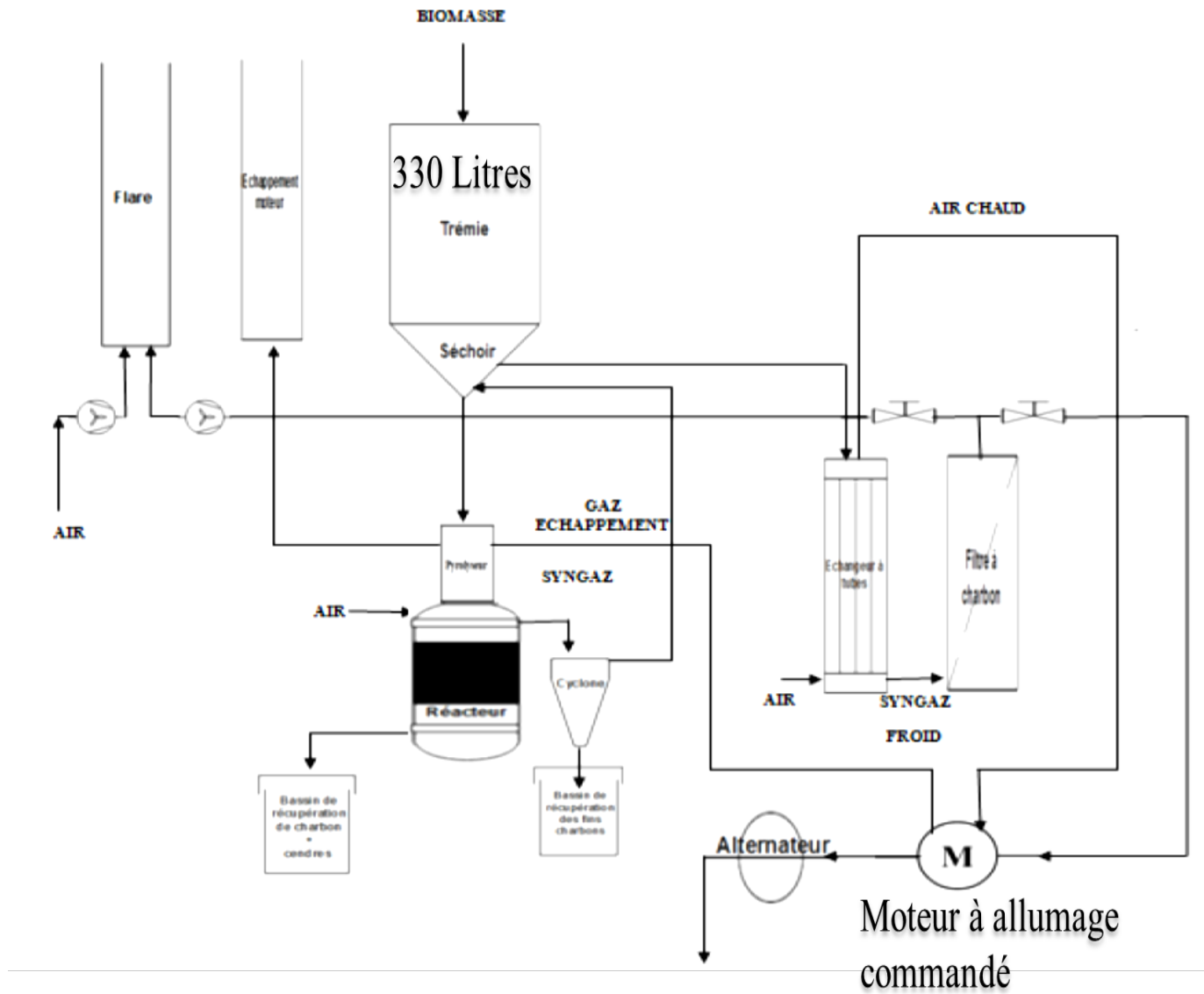


Figure 7 schéma général du GEK

3 Préparation de la biomasse

Les plaquettes forestières sont utilisées comme combustible ; de la famille de PINACEAE (gymnosperme) ; du nom scientifique *Pinus pinaster* avec un taux d'humidité de (10 ; 18 ; 23 26) % et une granulométrie de 40mm. Ces plaquettes sont contenues dans de big bag, stockées dans un magasin.



Figure 9 Biomasse (pin maritime)



Figure 8 séchage biomasse

4 Caractérisation de la biomasse

4.1 Analyse élémentaire

L'analyse élémentaire organique CHNO/S est faite selon la norme XP CEN/TS 15104 pour les biocombustibles solides. Elle permet de conclure la formule chimique générale du combustible qui est plus souvent sous forme de $C_xH_yO_zN_t$

4.2 Analyse immédiate

4.2.1 Teneur en humidité

L'échantillon est séché à une température de 105°C et maintenu à cette température jusqu'à obtention d'une masse constante. La teneur en humidité est calculée à partir de la masse perdue de l'échantillon.

Reference : norme NF EN ISO 18134-3.

4.2.2 Teneur en matière volatiles

L'échantillon est chauffé à 900°C pendant 7min. Le pourcentage de matières volatiles est déterminé par la perte de masse de l'échantillon après avoir soustrait la masse due à l'humidité.

Reference: NF EN ISO 18123.

4.2.3 Teneur en cendre

L'échantillon est chauffé sous air jusqu'à une température de 550 (± 10) °C. Il est maintenu à cette température jusqu'à obtention d'une masse constante.

La teneur en cendres est calculée à partir de la masse de résidu obtenue après calcination.

Reference : norme NF EN ISO 18122.

4.2.4 Teneur en carbone fixe

Le carbone fixe est le carbone restant après élimination des matières volatiles et des cendres de la biomasse solide sec. La teneur en carbone est déduite des résultats des analyses de teneurs en humidité, matières volatiles, et en cendre

$$C_{fixe} = 100 - (V + A)$$

V : teneur en matières volatiles, exprimée en pourcentage de masse de produit sec

A : teneur en cendres, exprimée en pourcentage de masse de produit sec

5 Pouvoir calorifique

Le pour calorifique est mesuré à l'aide d'un calorimètre

Références :

- ✓ Norme NF EN ISO 18125,
- ✓ Mode d'emploi du calorimètre Parr 6200
- ✓ MOS2-027, MOS2-02, MOS2-03, MOS2-024 et MOS2-031.

6 Analyse des produits de la gazéification

6.1 Ligne d'échantillonnage du gaz

L'échantillonnage des gaz se fait en respectant le Tar Protocol. Les gaz condensables et non condensables sont aspirés par une pompe. Ils passent à travers un filtre chauffé à 350°C. Après le filtre à particules, les gaz passent par un ensemble de bulleurs. Ces bulleurs, selon leurs positions contiennent ou ne contiennent pas de l'isopropanol. Ils sont plongés dans un bain de 40 ou de -20°C en fonction de leurs positions Les gaz condensables sont condensés dans les bulleurs. A la sortie des bulleurs, les gaz incondensables passent sur du silica gel. Le silica gel absorbe leur humidité avant injection dans la micro chromatographe (micro GC). La ligne d'échantillonnage est aussi équipée d'un débit mètre flotteur et d'un compteur volumique.

Le gaz est aspiré par une pompe et passe à travers un filtre à particule

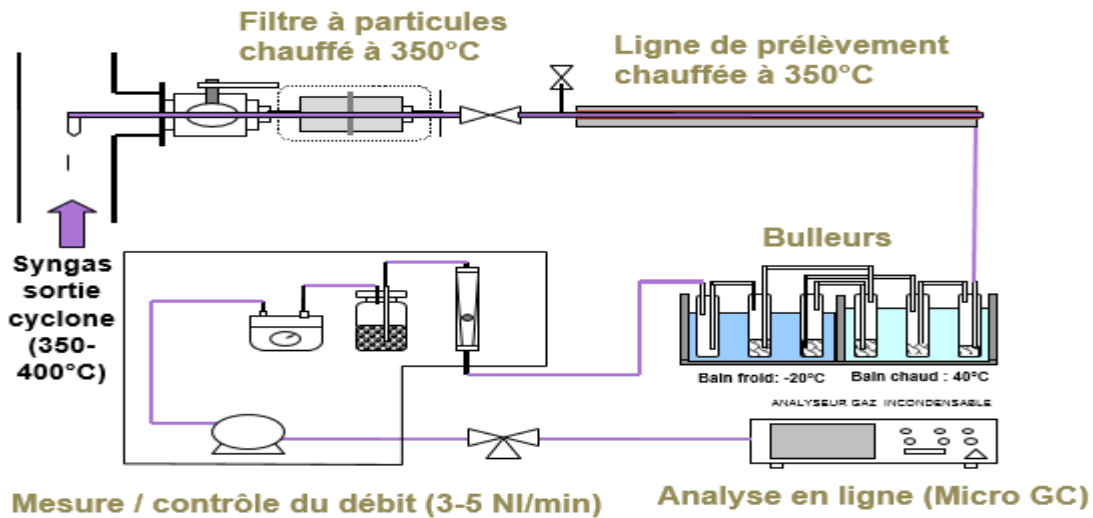


Figure 10 ligne d'échantillonnage syngaz (Biowoeb)

6.2 Analyse des gaz incondensables

Une Micro-GC VARIAN CP-4900 est utilisée pour l'analyse d'échantillons gazeux issus du procédé de gazéification. Elle a permis de mesurer la concentration de H_2 , O_2 , N_2 , CO , CH_4 , CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 dans le gaz. Cet appareil est équipé d'un détecteur du type TCD et de deux colonnes chromatographiques (Molsieve 5Å, Poraplot Q). La colonne 1 Molsieve 5Å utilise l'argon pour phase mobile et mesure les gaz tels que de H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO et H_2 . La colonne 2 Poraplot Q utilise l'hélium pour phase mobile et mesure les gaz tels que CH_4 , CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 et C_2H_2 .

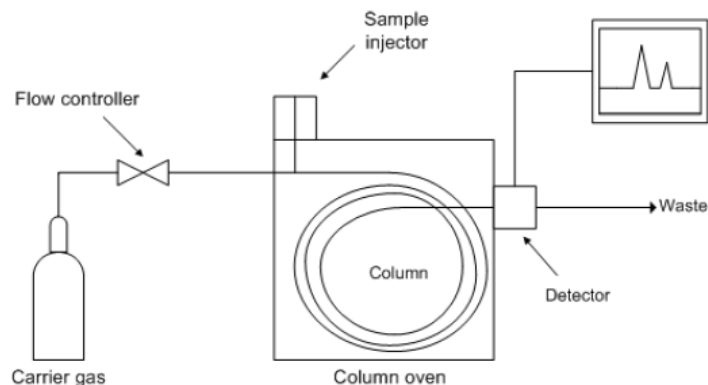


Figure 11 schémas de principe micro GC

6.3 Analyse des condensables

Après chaque expérimentation, des échantillons de condensats piégés dans les bulleurs sont prélevés pour analyse.

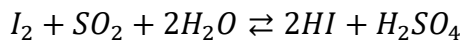
6.3.1 Quantification des goudrons

La masse de goudrons dans le gaz est obtenu en retranchant la masse d'eau contenu dans le gaz à la masse totale de matière piégées pendant l'expérimentation. Quant à la masse d'eau dans le gaz est déterminée par la méthode Karl Fischer.

6.3.2 Teneur en eau des condensables (Karl-fischer)

La teneur en eau dans l'échantillon des gaz condensables est déterminée par la méthode de Karl Fischer. Elle utilise la réaction d'oxydation du dioxyde de soufre par l'iode en présence d'eau.

Equation de la réaction d'oxydation :



Le point final de la réaction se traduit par un léger excès d'iode détecté de façon potentiométrique par une électrode en platine.

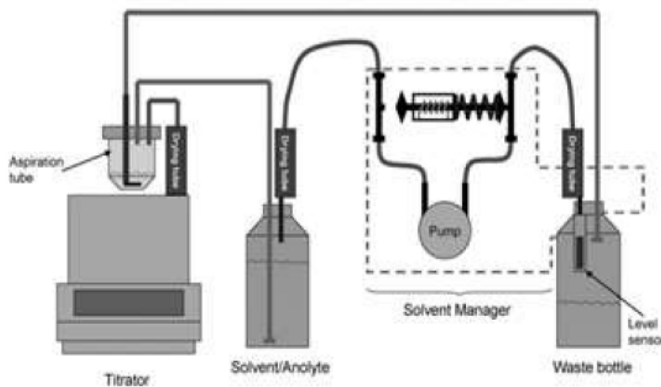


Figure 12 schémas de principe Karl fischer

7 Méthode d'expérimentation :

Pendant nos travaux, nous avons au total fait 13 expérimentations. 7 expérimentations ont porté sur tout le système du GEK (gazogène + groupe électrogène), les 6 autres ont porté sur le gazogène seul (fonctionnement à la torchère). La teneur en eau et la charge du groupe électrogène étaient fixées à chaque expérimentation.

Tableau 2 liste des expérimentations

Manipulation	Date	Humidité biomasse	Charge moteur(kW)
10M10	15/11/2018	10,7%	10,00
26M10	24/01/2019	26,00%	10,00
26M12	24/01/2019	26,00%	12,50
10M10_02	08/02/2019	10,9%	10,00
23M10	19/02/2019	23,50%	10,00
18M5	22/02/2019	18,00%	5,00
18M10	22/02/2019	18,00%	10,00

7.1 Avant l'expérimentation

- ✓ Préparation du bois (séchage si nécessaire)
- ✓ Préparation de la ligne d'échantillonnage du syngaz
- ✓ Maintenance du GEK
- ✓ Pesage du bois et remplissage de la trémie du GEK

7.2 Pendant l'expérimentation

- ✓ Echantillonnage de syngaz selon le tar Protocol (30 min)
- ✓ Analyse micro GC du syngaz
- ✓ Mesure de débit d'air
- ✓ Enregistrement automatique des paramètres du réacteur
- ✓ Enregistrement manuel des évènements

7.3 Après l'expérimentation

- ✓ Vidange et pesage de bois restant dans la trémie
- ✓ Prélèvement des échantillons des bulleurs pour analyse Karl-Fischer et GC MS
- ✓ Pesage et analyse des charbon et cendres

8 Méthode de calculs

8.1 La durée de la gazéification

La durée de gazéification correspond à l'instant de l'apparition de la flamme à la torchère jusqu'à l'instant de coupure du ventilateur d'air lorsque le gazogène est en fonctionnement torchère.

La durée de gazéification en fonctionnement moteur correspond à l'instant de démarrage du groupe électrogène jusqu'à l'arrêt de celui-ci

8.2 Le débit de biomasse,

Le débit de la biomasse est la quantité de biomasse consommée par le gazogène lors de son fonctionnement divisé par la durée de gazéification.

8.3 Débit d'air

La détermination du débit d'air a consisté à mesurer le temps nécessaire pour que le gazéifieur vide un volume d'air d'environ 100 litres à un même régime de fonctionnement - une dizaine de répétitions. Elle a été mesurée par un débitmètre massique également.

$$Q_{air} = \frac{V}{T}$$

$V[m^3]$: volume vider par le gazéifieur

$T[h]$: temps mis du gazéifieur pour vider le volume V

$Q_{air}[m^3 \cdot h^{-1}]$: débit volumique d'air à l'aspiration du gazéifieur

8.4 Débit de gaz

Le débit du gaz est déterminé en utilisant le nitrogène N_2 dans l'air de gazéification comme gaz traceur.

$$\dot{m}_{gaz} = \frac{\dot{m}_{N_2}}{Y_{N_2}}$$

$\dot{m}_{N_2}[kg \cdot h^{-1}]$ est calculé à partir du débit d'air à l'entrée

$Y_{N_2}[\%m]$ fraction massique N_2 dans le gaz, calculé à partir de sa concentration volumique

$$Y_{N_2} = \frac{M_{N_2} * [N_2]}{M_{gaz}}$$

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

$M_{N_2}[g.mol^{-1}]$ masse molaire de N_2

$M_{gaz}[g.mol^{-1}]$ fraction massique de syngaz sur sec

$$M_{gaz} = \sum_j M_j Y_j$$

$j = \{N_2, O_2, H_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6\}$

$Y_j[\%v]$: fraction volumique j dans le gaz mesurée par la micro GC

$M_j[g.mol^{-1}]$: masse molaire de gaz

Le débit de chaque composé dans le gaz est calculé par :

$$\dot{m}_j = Y_j * \dot{m}_{gaz}$$

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1 Résultats analyses immédiates et élémentaires

Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'analyse immédiate et élémentaire de la biomasse (Pin maritime) utilisée ainsi que son charbon et cendres après gazéification. Les caractéristiques de cette biomasse (pin maritime) sont semblables à ce qu'on retrouve dans la littérature (Ntshenged S., et al., 2009), (Xuan-Huynh, 2018). Mais sa teneur en matière volatile (81,7%) est légèrement supérieure à ce que dit Ntshenged pour un bois normal (72 -78) %. Il faut dire que les combustibles qui ont une grande teneur en matière volatile produisent plus de goudrons (Ntshenged S., et al., 2009).

Tableau 3 analyse immédiate et élémentaire : biomasse, charbon et cendres

	Biomasse	Charbon et cendres
Analyse immédiate		
Cendres (%m sur sec)	0,9	0,1
Mat. volatiles (%m sur sec)	81,7	1,4
Carbone fixe (%m sur sec)	17,4	85
PCI sur anhydre (MJ/kg)	16,8	26,4
Analyse élémentaire		
C (%m sur sec)	50,92	80,95
H (%m sur sec)	6,01	0,38
N (%m sur sec)	0,12	0,54
O (% m sur sec)	42,95	18,13

2 Analyse des profils de température

Les températures de la zone de réduction (Tred) et de restriction (Trst) du réacteur de gazéification sont présentées dans le tableau ci-dessous pendant les expérimentations. La température Tred est entre 300 et 700 °C et la température Trst entre 800 et 900. Nous avons fonctionné dans les limites de températures du réacteur de gazéifications annoncées par le constructeur voir annexe 2.

Tableau 4 températures du réacteur de gazéification

Expérimentation	Evolution Tred (°C)	Evolution Trst (°C)
10M10	500-650	800-900
18M10	500-700	900
23M10	400-630	900
26M10	450-650	900
26M12	500-650	900
18M5	300-700	800-900

3 Analyses des gaz incondensables

Le tableau ci-dessous présente les résultats d'analyse des gaz incondensables par la micro GC ainsi que leur teneur en eau. Il présente également le PCI du gaz et l'équivalence ratio pour chaque expérimentation. La teneur en eau dans le syngaz est déterminée par l'analyse Karl-fischer. Le l'équivalent ratio (ER) est déterminé comme suit :

$$ER = \frac{\frac{Q_{air}}{Q_{bois}}}{\left(\frac{Q_{air}}{Q_{bois}}\right)_{stchiométrique}}$$

Q_{air} : débit d'air de gazéification

Q_{bois} : débit de bois de gazéification

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

Tableau 5 composition syngaz des expérimentations

Eléments	10M10	26M10	26M12	10M10_02	23M10	18M5	18M10
H2 (% vol sur brut)	16,80	13,73	14,35	17,11	15,35	14,61	15,95
N2 (% vol sur brut)	37,01	33,49	32,76	35,42	31,11	33,63	34,25
CH4 (% vol sur brut)	2,17	1,88	1,97	2,30	1,59	1,75	1,88
CO (% vol sur brut)	23,77	15,16	16,26	23,63	16,44	17,44	19,77
CO2 (% vol sur brut)	7,38	9,44	9,49	8,26	8,86	8,38	8,46
H2O (% vol sur brut)	12,13	25,10	24,23	12,38	25,94	23,21	18,97
PCI sur brut (MJ/Nm3)	5,989	4,382	4,621	5,998	4,553	4,705	5,186
ER	0,23	0,27	0,22	0,23	0,25	0,26	0,23

Les composés majoritaires du syngaz sont les suivants : CO, CO₂, CH₄, N₂, H₂. Il peut aussi contenir d'autres hydrocarbures tels que C₂H₄, C₂H₆ et C₂H₂ mais en faible concentration (voir le diagramme composition syngaz des expérimentations ci-dessous). Pour toutes les expérimentations la concentration de N₂ est la plus élevée variant entre 31 et 37%. Elle est inférieure à celle prévue par le constructeur (45%). La concentration en CO varie entre 15 et 23% coïncidant avec la prévision du constructeur (22%). Pour la concentration en CH₄ elle varie entre 1,7 et 2,3% correspondant presque au 3% prévu par le constructeur. Quant aux concentrations de CO₂ et de H₂, elles varient entre 7 et 9% pour CO₂, entre 14 et 16% pour le H₂. Le constructeur prévoit 10% pour le CO₂, et 20% pour le H₂. Presque toutes ces concentrations coïncident aux concentrations données par le constructeur dans la fiche technique avec le même type de bois (pin maritime) avec une teneur en humidité entre 10 et 30%.

Lorsque la teneur en eau de la biomasse augmente alors la teneur en eau du syngaz augmente. Pour une teneur en eau de 10, 18, 26 % dans la biomasse, nous avons respectivement une teneur en eau dans le syngaz de 12,13 ; 18,97 et 25,10 %. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une partie de l'eau contenue dans la biomasse est condensée dans le réacteur de gazéification à une température de 500°C. Cela rend ensuite le syngaz plus humide (Patrik N Sheth, et al., 2018), (voir la figure ci-dessous).

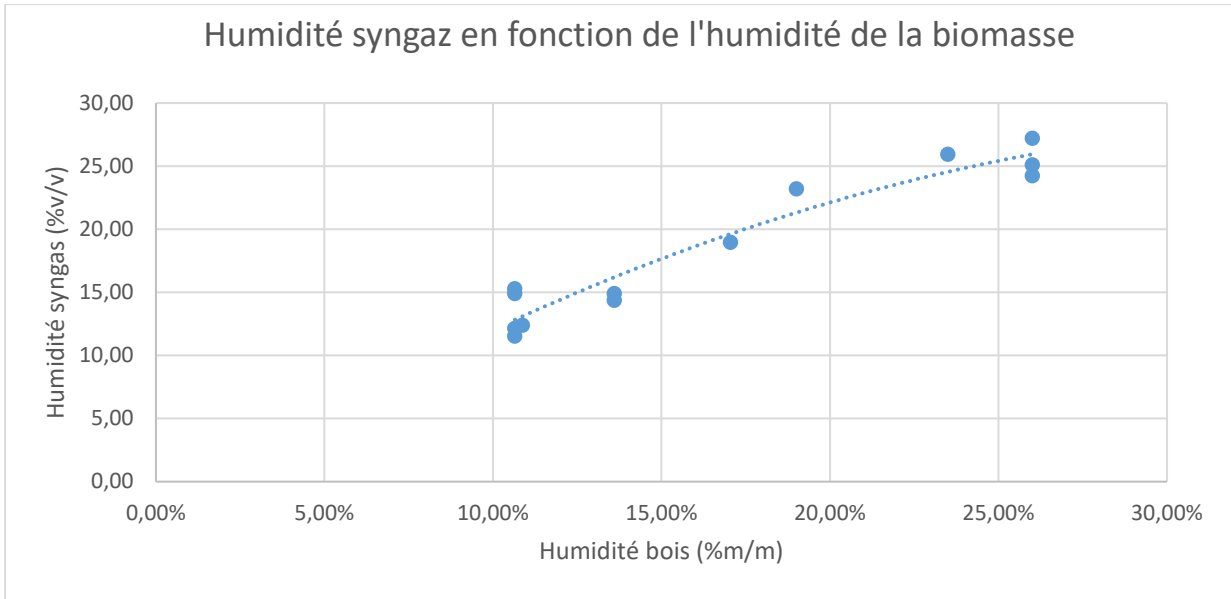


Figure 13 Humidité du syngaz en fonction de humidité de bois

Lorsque la teneur en eau de la biomasse augmente elle provoque l'augmentation de la teneur en eau dans le syngaz. Nous observons ainsi la diminution du PCI du syngaz. Cela s'explique par le fait que le syngaz est dilué par l'eau qu'il contient (Patrik N Sheth, et al., 2018) (voir figure ci-dessous).

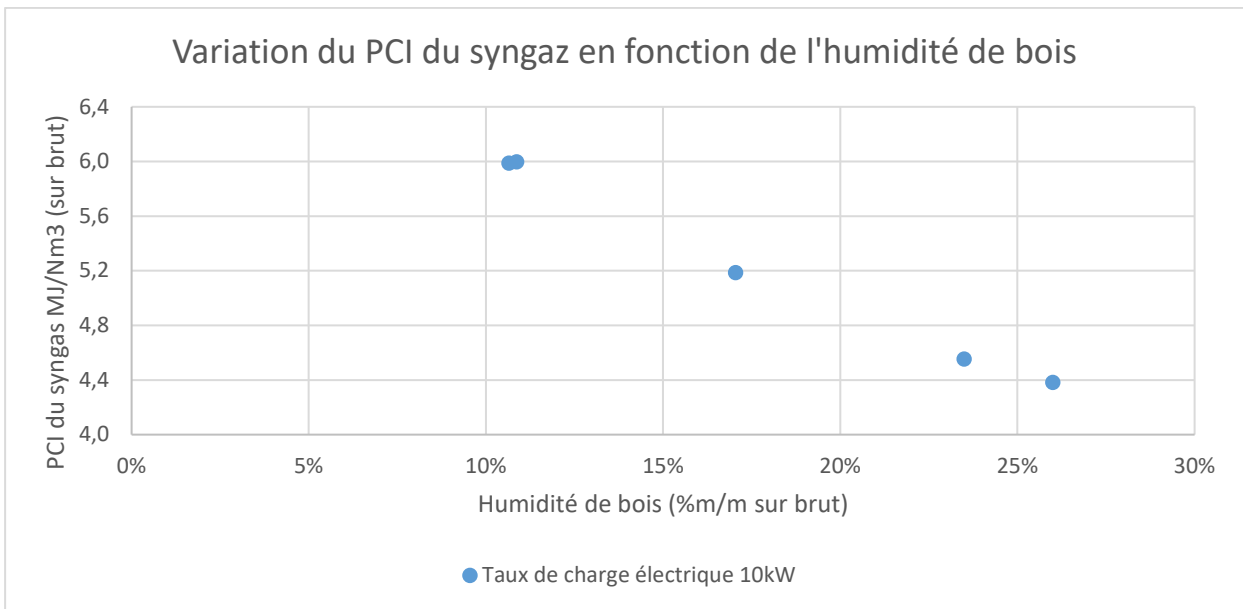


Figure 14 PCI syngaz en fonction de TH biomasse

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

La plus grande équivalence ratio 0,26 est observée lors de l'expérimentation 18M5 quant à la plus basse 0,22 est observée à l'expérimentation 26M12. Ces ratios correspondent à ceux trouvés dans la littérature qui se situent entre 0,2 et 0,4. Pour une teneur en eau de la biomasse constante, par exemple fixée à 26%. L'équivalence ratio diminue de 0,27 à 0,22 lorsque la charge électrique augmente de 10 à 12 kW (26M10 et 26M12). Le même phénomène est observé en fixant la teneur en eau de la biomasse à 18%. Où l'équivalence ratio diminue de 0,26 à 0,23 lorsque la charge électrique augmente de 5 à 10 kW (18M5 et 18M10). L'équivalence ratio diminue lorsque la charge électrique augmente (voir figure ci-dessous).

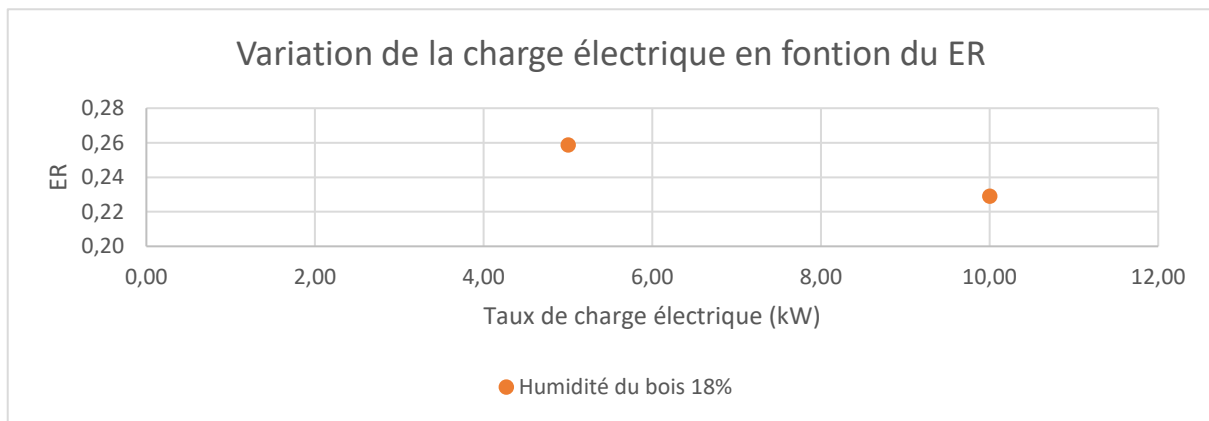


Figure 15 influence charge sur ER

Lorsque la charge électrique ne varie pas par exemple c'est-à-dire fixée à 10 kW. L'équivalence ratio augmente de 0,23 à 0,27 lorsque la teneur en eau de la biomasse augmente de 10 à 26% (10M10 et 26M10). L'équivalence ratio augmente quand la teneur en eau de la biomasse augmente. Cela s'explique par le fait que lorsque la teneur en eau de la biomasse est grande la consommation de biomasse diminue ce qui provoque l'augmentation de l'équivalence ratio (Patrik N Sheth, et al., 2018) (voir la figure ci-dessous)

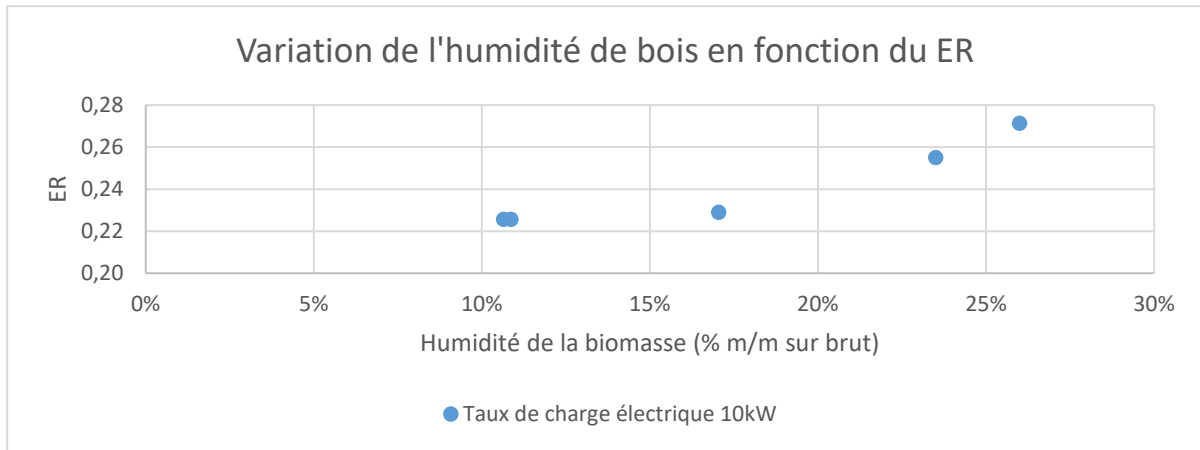


Figure 16 influence TH biomasse sur ER

4 Analyse des condensables : goudrons

Le tableau ci-dessous présente la concentration de goudrons lors des différentes expérimentations.

Tableau 6 Production de goudrons des expérimentations

Expériences	10M10	26M10	26M12	10M10_02	23M10	18M5	18M10
Goudrons (mg/Nm3 brut)	8891,09	10405,75	12025,17	8833,35	9245,99	9586,90	10689,71

Nous constatons que pour une même charge électrique (10 kW) et des teneurs en eau de biomasse différente (10 et 23) %, (23M10 - 10M10) : La concentration de goudrons dans le syngaz est d'autant plus grande que la teneur en eau de la biomasse est élevée. Soit une différence de 355 mg/Nm³. Cela pourrait s'expliquer par le fait que lorsque la teneur en eau de la biomasse augmente, les vapeurs d'eau se condensent sur les parois du réacteur dans la zone de pyrolyse augmentent. Les vapeurs d'eau condensées sur les parois du réacteur coulent et descendent dans la zone de combustion (zone d'oxydation). Elles étouffent la réaction de combustion (Patrik N Sheth, et al., 2018). Cet étouffement provoque la baisse de la température intérieure du réacteur. Cela favorise la production de plus de goudrons parce qu'il s'opère un craquage incomplet des goudrons (Brendan, et al., 2017).

Pour une même teneur en eau de la biomasse 26 % et des charges électriques différentes (10 et 12) kW, (26M10 et 26M12) la concentration de goudron dans le syngaz est d'autant plus grande que la charge électrique est élevée. Soit une différence de 1619 mg/Nm³. La même analyse est observée aux expérimentations 18M5 et 18M10. Soit une différence de 1100 mg/Nm³. Ce phénomène a été aussi observé par d'autres chercheurs tels que Brendan Quinlan. Il peut

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

s'expliquer par le fait que lorsque la charge électrique augmente, le débit du syngaz du moteur augmente. Par cela le temps de résidence des gaz de pyrolyse dans le réacteur de gazéification diminue. On assiste alors par conséquent à un craquage incomplet des goudrons (Brendan, et al., 2017).

5 Bilan matière

Dans cette partie, nous présentons le bilan matière des 7 expérimentations choisies depuis le début. Le tableau ci-dessous présente le bilan matière des expérimentations réalisés au cours de nos travaux. Les erreurs sur le bilan sont toutes inférieures ou égales à la limite acceptable qui est de 10% pour une telle expérimentation (Ouadi, et al., 2013).

En entrée le débit de biomasse varie entre 9 et 13 kg/h quant au débit d'air il varie entre 14,2 et 18,6 kg/h. Pour la sortie le débit de syngaz varie entre 21,8 et 28,9 kg/h. Le débit de goudron varie entre 0,21 et 0,35 kg/h. celui du char (charbon et cendres) varie entre 0,20 et 0,65 kg/h. Nous constatons que le débit d'eau en sortie est toujours supérieur au débit d'eau à l'entrée. Il y a donc des molécules d'eau qui sont formées au cours de la gazéification dans le réacteur.

Tableau 7 bilan matière gazogène

Bilan matière du gazogène										
Expérimentation	Entrée (kg/h)				Sortie (kg/h)					Erreur
	Biomasse	Eau	Air	Total	Char	Syngaz	Eau	Goudrons	Total	
10M10	10,36	1,26	14,22	25,85	0,45	21,90	2,26	0,21	24,82	3,98%
10M10_02	10,36	1,26	14,22	25,85	0,45	22,78	2,40	0,21	25,86	-0,03%
26M10	9,34	3,28	15,42	28,04	0,65	22,96	5,56	0,29	29,46	-5,04%
26M12	12,04	4,23	15,86	32,12	0,65	24,34	5,66	0,35	31,00	3,50%
23M10	12,03	3,70	18,66	34,39	1,04	28,94	7,52	0,33	37,83	10,01%
18M5	9,25	2,17	14,54	25,96	0,20	21,81	4,84	0,25	27,10	-4,38%
18M10	13,22	2,72	18,41	34,36	0,58	28,42	4,94	0,35	34,28	0,21%

Sur la figure ci-dessous nous observons que la production de goudrons est constante à 1% pour toutes les expérimentations. Quant à la production de syngaz, nous observons le plus grand pourcentage (88%) à l'expérimentation 10M10_02 et le plus bas pourcentage est observé à l'expérimentation 23M10. Nous constatons lorsque la teneur en eau dans le syngaz augmente la production de syngaz diminue. Quant à la proportion de char elle est presque constante à 2%

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

sauf aux expérimentations 23M10 et 18M5 où elle est de 20 et 18% respectivement. L'erreur est comprise entre 0,2% et 10%. Ces erreurs peuvent avoir diverses origines notamment la surestimation de paramètres. Dans la littérature l'erreur maximale acceptée sur un bilan matière est de 10%.

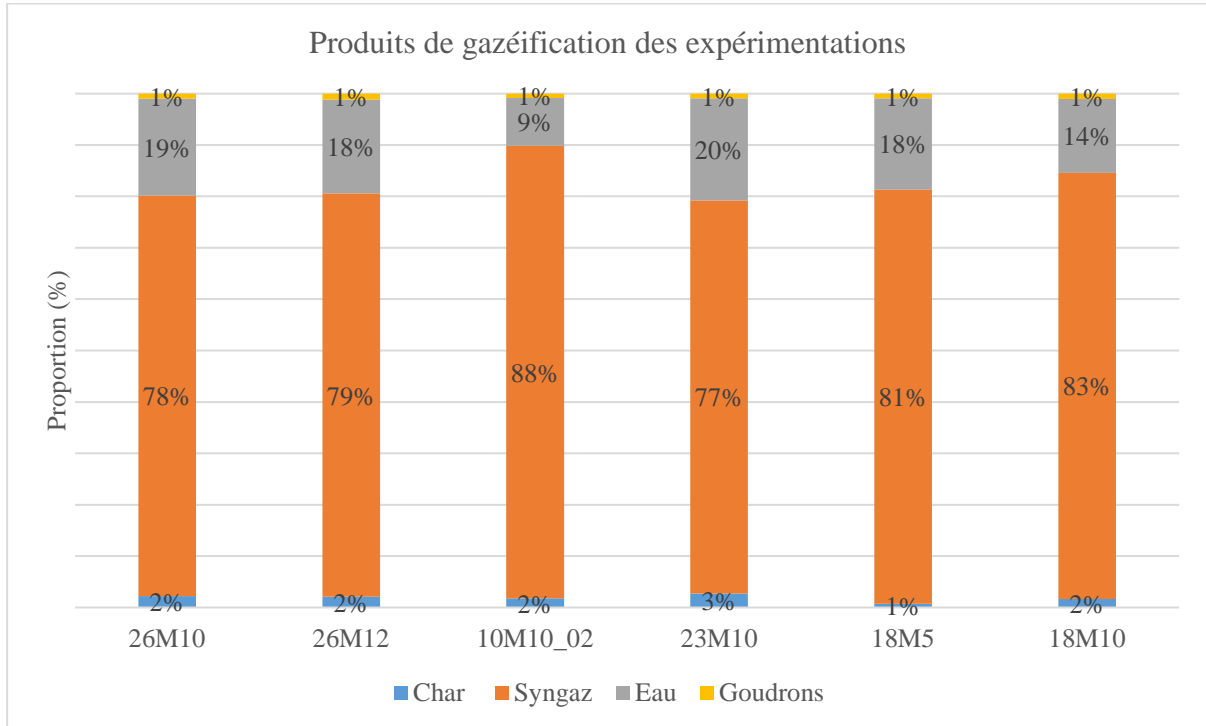


Figure 17 Produits de gazéification des expérimentations

Le tableau ci-dessous présente le bilan matière du moteur. A l'entrée du moteur nous avons du syngaz et l'air qui se mélangent pour être brûlé dans le moteur. En sortie du moteur nous avons les gaz d'échappement. Le débit du syngaz reste le même qu'en sortie du gazéifieur. Quant au débit d'air, il est calculé à partir du débit de syngaz, de la richesse qu'affiche le CPU du GEK et la valeur du PCO du syngaz. Ce débit varie entre 29,3 et 38,9 kg/h. Pour le débit des gaz d'échappement, il est calculé en sommant le débit de syngaz et celui de l'air à l'entrée du moteur. Il varie entre 51,12 et 67,8 kg/h.

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

Tableau 8 bilan matière moteur

Bilan matière du groupe électrogène						
Expérimentation	Entrée (kg/h)				Sortie (kg/h)	Ecart
	Syngas sec	Richesse	PCO (kg d'air / kg combustible)	Air	Gaz d'échappement	
10M10	21,90	1,05	1,28	29,43	51,33	0
26M10	22,96	1,05	1,28	30,86	53,82	0
26M12	24,34	1,05	1,28	32,71	57,05	0
10M10_02	22,78	1,05	1,28	30,62	53,40	0
23M10	28,94	1,05	1,28	38,89	67,83	0
18M5	21,81	1,05	1,28	29,31	51,12	0
18M10	28,42	1,05	1,28	38,20	66,62	0

6 Bilan énergie

Le tableau ci-dessous présente le bilan énergie du gazogène. A partir du bilan matière, nous avons établi le bilan énergie du GEK. Le rendement énergétique sur gaz froid (CGE) du gazogène est calculé en divisant en sortie du gazogène la puissance du syngaz par la puissance de la biomasse à l'entrée du gazogène. Le plus grand CGE 76,3% est observé à l'expérimentation 10M10. Quant au plus bas 62,8%, il est observé à l'expérimentation 26M12.

Tableau 9 bilan énergie gazogène

Bilan énergie du gazogène						
Expérimentation	Entrée (kW)	Sortie (kW)				Rendement (CGE)
	Biomasse (brut)	Char	Syngas brut	Perte thermique sng	Total	
10M10	53,04	3,28	38,61	4,38	46,28	72,80%
26M10	46,36	4,71	33,85	5,39	43,95	73,02%
26M12	59,74	4,71	37,53	5,68	47,92	62,82%
10M10_02	53,04	3,28	40,41	4,60	48,30	76,20%
23M10	60,06	7,48	45,82	7,03	60,33	76,30%
18M5	46,62	1,44	34,14	5,03	40,61	73,24%
18M10	66,92	4,17	46,78	6,23	57,18	69,90%

Le tableau ci-dessous présente le bilan énergie du moteur. Le rendement électrique du moteur est calculé en divisant la charge électrique par la puissance du syngaz qui rentre dans le moteur. Le plus grand rendement électrique 31,9% est observé à l'expérimentation 26M12 avec une

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

consommation spécifique de 1,4 kg bois brut/kWh. Quant au plus bas 13,5%, il est observé à l'expérimentation 18M5 avec une consommation spécifique 2,5 kg bois brut/kWh. C'est la plus grande consommation spécifique observée pendant les expérimentations. Quant à la plus basse 1,2 kg bois brut/kWh, elle est observée aux expérimentations 10M10. Ces valeurs de consommations spécifiques correspondent à celle prévue par le constructeur et également celle qu'on rencontre dans la littérature qui est 1,2 kg bois brut/kWh (C.Y., et al., 2018).

Tableau 10 bilan énergie moteur

Bilan énergie moteur				
Expérimentation	Entrée (kW)	Sortie (kW)	Rendement électrique	Conso spécifique (kg bois brut/kWh)
	Syngas brut	Electricité		
10M10	38,61	9,7	25,12%	1,20
26M10s	33,85	9,7	28,66%	1,30
26M12	37,53	12	31,98%	1,36
10M10_02	40,41	9,7	24,00%	1,20
23M10	45,82	10,04	21,91%	1,57
18M5	34,14	4,6	13,47%	2,48
18M10	46,78	10,04	21,46%	1,59

Le tableau ci-dessous présente le rendement global. Le rendement global du système (GEK) est calculé en divisant la puissance électrique en sortie du moteur par la puissance de la biomasse à l'entrée du gazogène. Le plus grand rendement 20,9% est observé à l'expérimentation 26M10. Quant au plus faible 9,9%, il est observé à l'expérimentation 18M5. Ces valeurs de rendement tournent autour de celle qu'on peut trouver dans la littérature 18% (C.Y., et al., 2018). Sauf pour les rendements des expérimentations 18M10 et 18M5 qui sont respectivement 15 et 9,9%. Le faible rendement observé lors de l'expérimentation 18M5 peut s'expliquer par le fait qu'à la charge électrique de 5 kW, le moteur fonctionne à faible régime par conséquent le gazogène est moins sollicité à cette charge ce qui engendre un faible rendement électrique (Brendan, et al., 2017).

Tableau 11 rendement électrique expérimentations

Expérimentation	Rendement électrique système (GEK)
10M10	18,29%
26M10	20,93%
26M12	20,09%
10M10_02	18,29%
23M10	16,72%
18M5	9,87%
18M10	15,00%

Le rendement électrique global du système est influencé par la teneur en eau de la biomasse comme le présente la figure ci-dessous. Ce rendement est aussi influencé par la charge électrique du moteur.

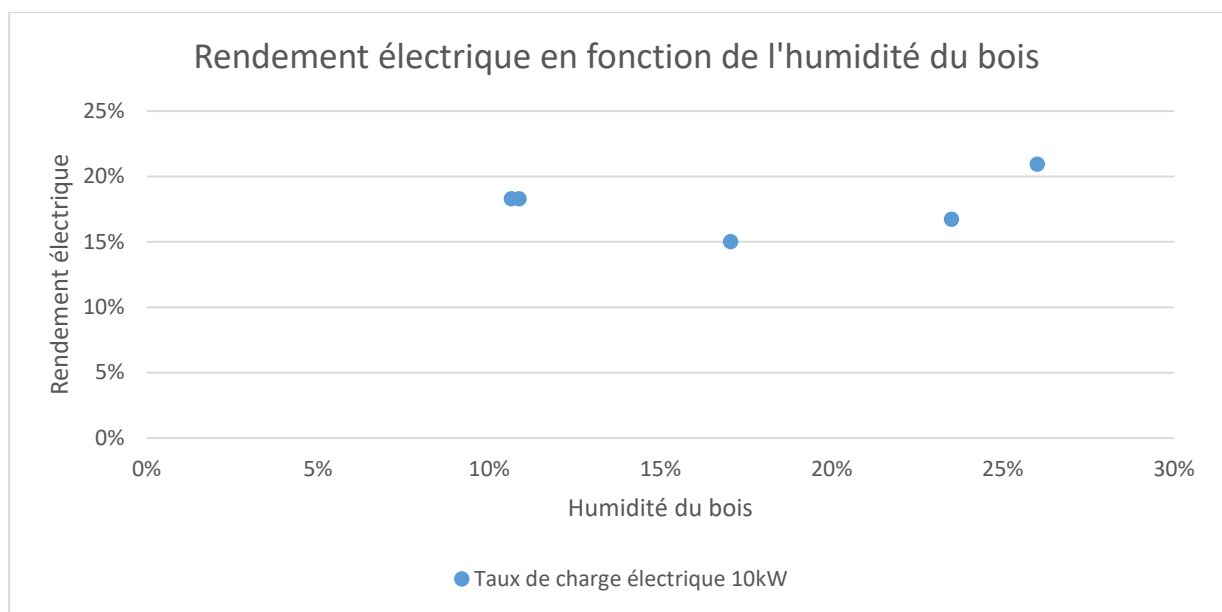


Figure 18 rendement électrique en fonction TH biomasse en fonction TH biomasse

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour faire face au défi climatique actuel et pour anticiper un effondrement des ressources énergétiques fossiles futur plusieurs innovations sont en cours dans divers domaines. La valorisation énergétique de la biomasse est une alternative qui a permis le développement de plusieurs technologies. La technologie de gazéification de biomasse pour la production d'électricité est l'une d'entre elle.

Notre travail, nous a permis de mettre en évidence que la teneur en eau de la biomasse ainsi que la charge électrique du groupe électrogène influencent le rendement électrique global du système de gazéification de biomasse pour la production d'électricité. Ce rendement pouvant aller au-delà des 18% habituels ; dans notre cas, il est à 20% dans la meilleure configuration. Notre travail nous a également permis de mettre en évidence que la concentration de goudron dans le syngaz est influencée par la charge électrique du groupe électrogène et la teneur en eau de la biomasse.

Nous recommandons de faire fonctionner le GEK pour les conditions optimales de fonctionnement à 10% de teneur en eau de la biomasse et à 10 kW de charge électrique du groupe électrogène.

Le GEK pourrait être utiliser en Afrique de l'ouest pour la production d'électricité à petite échelle dans les zones rurales, notamment chez les artisans.

La recherche par expérimentation demande de la rigueur et de la méthode. Elle permet des découvertes innovantes et repousse sans cesse les limites de la connaissance de l'Homme. Néanmoins, la recherche par expérimentation reste coûteuse en temps et en argent.

Comme perspectives l'amélioration des expérimentations, il est proposé de l'équiper pour :

- ✓ pouvoir mesurer le refroidissement du syngaz, et la température des gaz d'échappement et permettre ainsi de calculer précisément les pertes d'énergie;
- ✓ ajouter sur la trémie un accès latéral pour faciliter la vidange de bois restant après les expérimentations ;

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME. 2007.** *La valorisation de la biomasse.* Bordeaux : s.n., 2007.
- Agence international de l'Energie. 2011.* 2011.
- Antonini G et Hazi M. 2004.** *Pyrolyse - Gazéification des déchets solides.* s.l. : Etude ADEME/procédés, 2004.
- AREC. 2019.** *Agence Régionale d'Evaluation environnement et Climat en Nouvelle-Aquitaine.* 2019.
- Biomass Power for the World. Pan Stanford Series on Renewable Energy-volume 6. 2015.* Vienne : Pan Stanford Publishing, 2015. European Biomass Conference.
- Brendan, Quinlan, et al. 2017.** *Application of OLTTin gasification power systems.* 2017. pp. 773-778.
- Bridgwater A. V. et Peacocke, G. V. C. 1999.** Fast pyrolysis processes for biomass. 1999, Vol. 41, pp. 1-73.
- Bridgwater A. V., Toft A. J. et Brammer J. G. 2002.** A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2002, Vol. 6, pp. 181-246.
- C.Y., Li, et al. 2018.** *Evaluation of a combined cooling, heating, and power system based on biomass gasification in different climate zones in the U.S.* 2018. pp. 326-340.
- Chi-Hung et al. 2017.** 2017.
- Daniela , Thran et al. 2011.** 2011.
- Donald L., Klass. 1998.** *Biomass for Renewable Energy, Fuel, Chemicals .* 1998.
- Gazéification.info. 2019.** *Gazéification.info.* 2019.
- Juniper Consultancy Services Ltd. 2001.** *PYROLYSIS AND GASIFICATION OF WASTE.* Inde : s.n., 2001.
- M. BASSIL, Georgio. 2012.** *Gaszéification de la biomasse: Elimination des goudrons par lavage, étude expérimentale et modélisation.* LYON : UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1, 2012.
- Manel Dahmani. 2017.** *Analyse Energétique, Exergétique, Environnementale et Economique des système de valorisation énergétiques de biomasses.* 2017.
- Mckendry P. 2001.** Energy production from biomass (part 2): conversion technologie. 2001.
- Ntshenged S., Mamphweli et Edson L., Meyer. 2009.** *Implementaation of the biomass gasification for community empowerment at Melani village, Eastern Cape, South Africa.* 2009. pp. 2923-2927.
- Ouadi, M., et al. 2013.** *Fixed bed downdraft gasification of paper industry wastes.* 2013. pp. 692-699.

Patrik N Sheth et B. V. Babu. 2018. *Experimental Studies on Downdraft Biomass Gasifier.* India : s.n., 2018.

Swierczynky D. 2004. *Elaboration et développement d'un ctalyseur Ni/Olivine pour la production d'hydrogène par gazéification de la biomasse en lit fluidisé.* StrasBourg-France : Université Louis Pasteur , 2004.

World Bank Technical Paper. 1995. *Small Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power.* Washington, D.C : s.n., 1995.

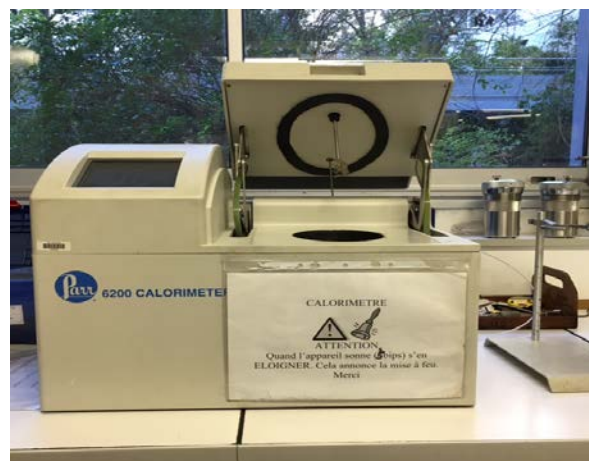
Xuan-Huynh, PHAM. 2018. *Oxidative pyrolysis of biomass pallets in a fixed bed.* Montpellier : UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2018.

ANNEXES

1 Annexe 1 : Équipements utilisés pour expérimentation GEK,



Four à moufle électrique Nabertherm



Calorimètre Parr 6200



Débit mètre massique



Débit mètre branché au GEK

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT



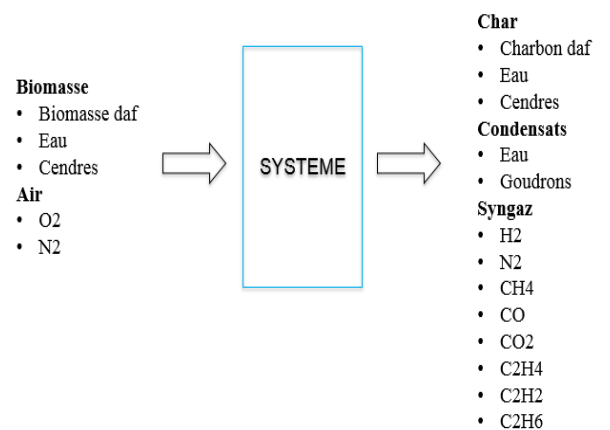
Condensats dans les bulleurs



Appareil Karl-Fischer

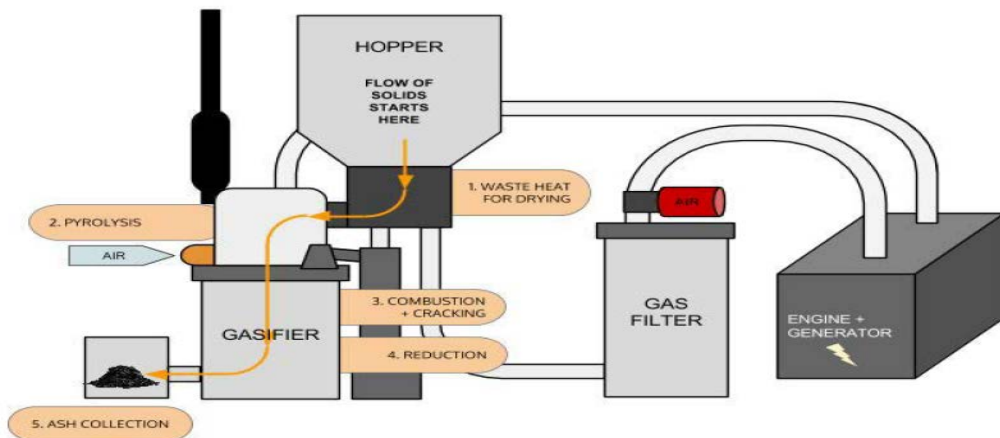


GC MS

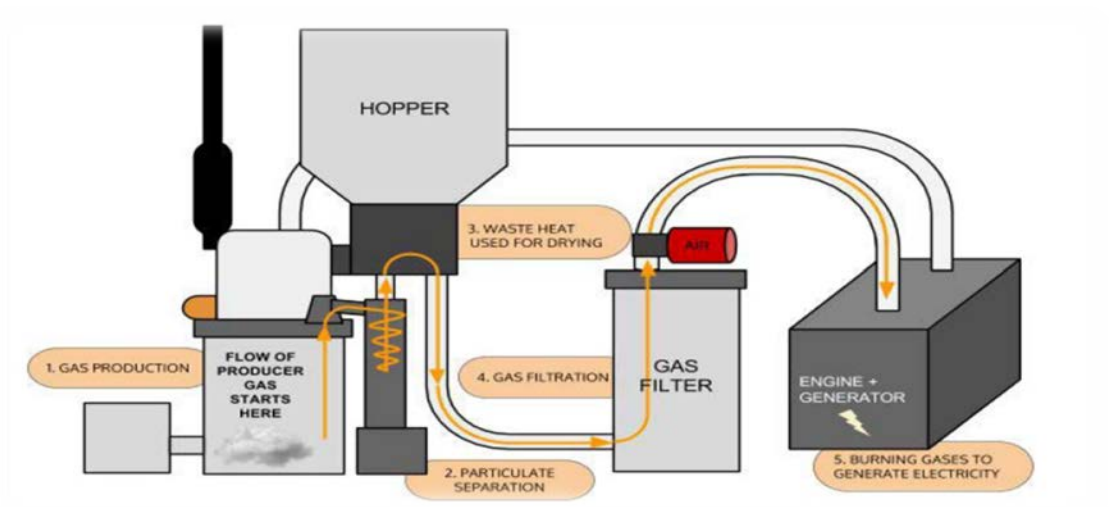


Schémas bilan matière

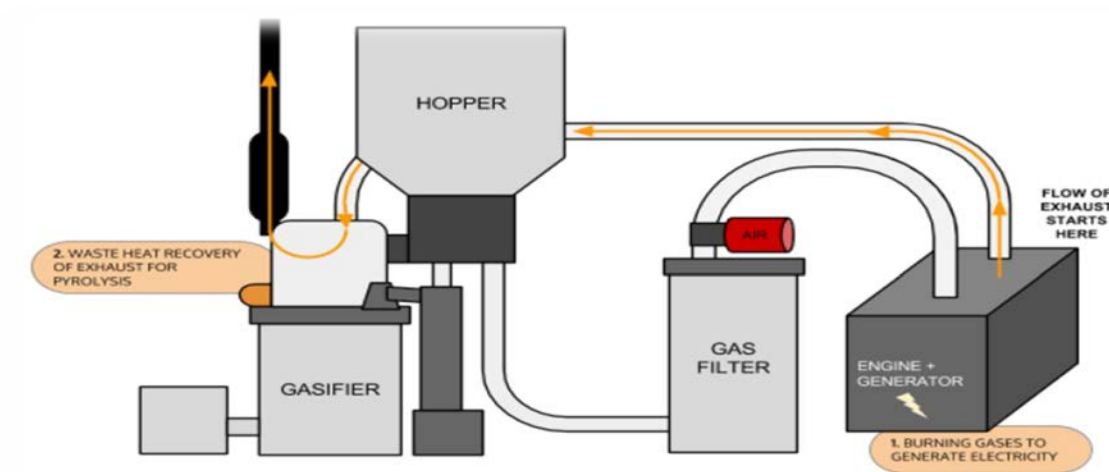
CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT



Circuit de biomasse du GEK

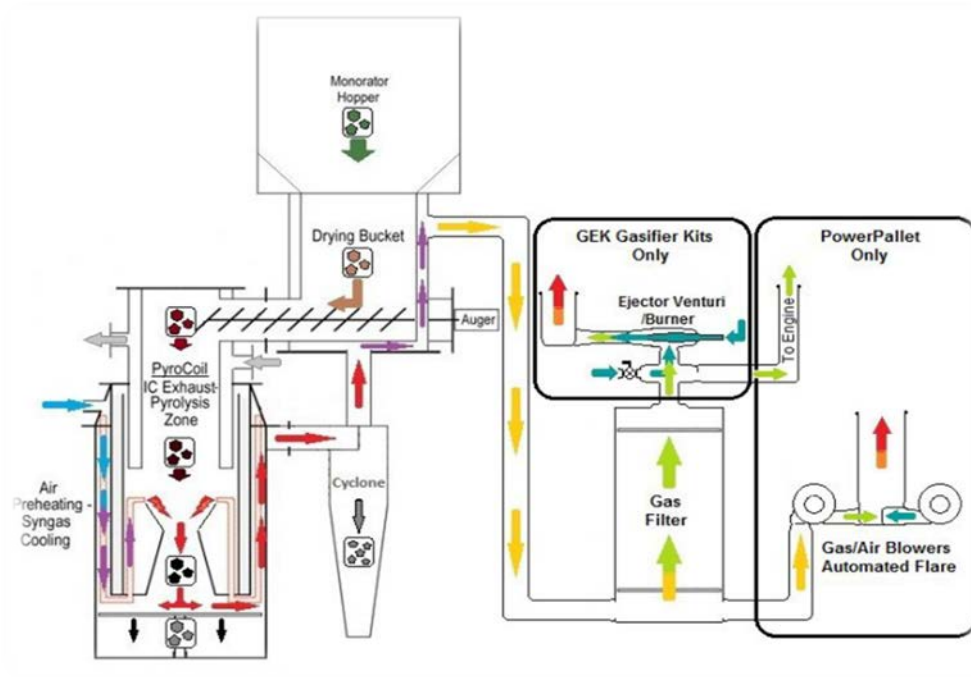


Circuit de syngaz du GEK



Circuit de gaz d'échappement du GEK

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT



Ensemble des flux circulants dans le GEK



Photo du GEK

2 Annexe 2 : Protocole d'utilisation du GEK

Vérifications avant la mise en route :

- Vérifier qu'on a une feuille de suivi de manip
- Vérifier l'étanchéité du système (raccordements bien vissés) :
 1. Mettre le bouton power sur ON
 2. Ouvrir la vanne de la torchère et fermer la vanne du moteur
 3. Fermer l'entrée d'air atmosphérique
 4. Mettre le ventilateur du syngaz sur 11
 5. Fermer la vanne de la torchère et éteindre le ventilateur du syngaz
 6. Vérifier les critères suivants

Critère numéro 1

Lorsque sur le tableau de bord Preac et Pcomb cessent d'augmenter :

- a. Vérifier que la pression est supérieure ou égale à 90
- b. si oui passer à la vérification du critère numéro 2
- c. Sinon si la pression est inférieure à 90 il y a une fuite ou la batterie n'est pas suffisamment chargée (résoudre ce problème avant de continuer)

Critère numéro 2

- d. Après la fermeture de la vanne de la torchère, la pression commencera à baisser.
 - e. Mettre le chronomètre pour vérifier que la pression baisse jusqu'à atteindre la valeur 0 en un temps supérieur à 60 secondes (dans ce cas pas de fuite continuer la procédure)
 - f. Sinon si la pression baisse pour atteindre la valeur 0 en un temps inférieur à 30 secondes (dans ce cas le réacteur ne doit pas être mis en marche ; il y a une fuite).
7. Vérifier via le PCU ; NB appuyer sur Next 1fois ; ADV pour défiler
 - La grille « Grate shaker »
 - La vise « Ash auger » d'évacuation des cendres.,
 - Mettre en fonctionnement ces équipements puis les remettre sur AUTO.
 - Vérifier que la vis d'alimentation du bois soit bien branchée.
 8. Vérifier le niveau de bois (3/4 de la trémie suffisant).
 9. Vérifier le niveau d'huile

10. Vérifier que les vannes ont été nettoyé lors de la maintenance entre manip (à l'acétone)
11. Vérifier le branchement électrique des vannes

Procédure de mise en route :

1. Mettre le ventilateur du syngaz sur 6.
2. Fermer l'arrivée d'air
3. . Amener la flamme propane
4. Quand la température T_{rst} atteint $50-60^{\circ}\text{C}$, mettre le ventilateur du syngaz sur 11.
5. Arrêter la flamme quand la température T_{rst} dépasse 80°C .
6. Fermer l'arrivée de la flamme
7. Ouvrir l'entrée d'air (vérifier que le clapet n'est pas bloqué) et le ventilo d'air de la torchère.
8. Quand la température T_{red} atteint 300°C , démarrer le moteur
9. Mettre le ventilateur d'air et celui de gaz sur 0.
10. Fermer la vanne de la torchère et ouvrir celle du moteur.
11. Démarrer le moteur, la richesse doit être de l'ordre de 1-1,05.
12. Attendre une minute que le moteur se stabilise avant de mettre les charges (passer sur les aérothermes)

NB: La montée en charge du moteur doit se faire progressivement.

Procédure d'arrêt :

- 1) Arrêt du moteur :
 - a. Décharger le moteur
 - b. Tourner la clé
 - c. Fermer la vanne moteur et ouvrir la vanne de la torchère
 - d. Mettre le ventilateur du syngaz sur 6 puis sur 11
- 2) Arrêt du système
 - a. Mettre le ventilateur d'air à 0 et celui du syngaz à 0
 - b. Fermer l'entrée d'air

Remarques :

- Le ventilateur d'air au maximum permet de descendre la flamme et de nettoyer les imbrûlés présents dans la torchère.
- Mettre le ventilateur d'air sur 11 lors du remplissage de la trémie en fonctionnement afin d'éviter d'avoir la flamme trop haute.
- Il est préférable de fonctionner avec la trémie toujours remplie à moitié (environ 3h de fonctionnement) pour un fonctionnement stable.
- Le démarrage peut s'effectuer sans flamme lorsque la température Trst est supérieure à 100°C et celle de Tred supérieure à 70°C.
- Trst : température de restriction, correspond à la zone d'oxydation
- Tred : température de réduction, correspond à la zone de réduction
- Si la température devient trop élevée (Trst sup à 1020 °C)
 - o Fermer l'arrivée d'air, mais à cette température cela peut créer une dépression dans le réacteur.
 - o Faire fonctionner l'extraction des cendres et forcer l'alimentation de bois frais pour abaisser la température.
 - o La charge peut ensuite être diminuée
 - o Dans le pire des cas, la sortie des gaz d'échappement peut être connectée à l'entrée d'air
- Pour changer le filtre à charbon, le charbon doit être tamisé avec le filtre fourni.

QUELQUES PARAMETRES DU GEK

Granulométrie	(12-40) mm
Taux d'humidité	(12-30) % base sèche
Taux de cendre	Moins de 5%
Biomasse approuvée et testée	Rafle de maïs, cabosse noix de coco et noix de palmier
Biomasse non approuvée et à ne pas utilisée	Charbon, pneu, plastique, et déchets municipaux
Consommation de biomasse	1,2 kg biomasse = 3 m ³ gaz= 1 kWhe

CARACTERISATION PARAMETRIQUE DU GASIFIER EXPERIMENTERS' KIT

Débit max de gaz	60 m ³ /h~20kWe
Débit min de gaz	10 m ³ /h~3kWe
Densité énergétique du gaz	6,5 MJ/m ³
Composition de gaz	CO : 22% ; CO ₂ :10% ; H ₂ :20% ; N ₂ :45% ; CH ₄ :3%
Temps d'opération maximal	~12 heures
Temps de démarrage	5-20 min
Cycle de maintenance	~12 heures
Température zone de pyrolyse	400-600°C
Température gaz sortie réacteur	700-800°C
Température gaz d'échappement	400-600°C
P _{com} pression de combustion	Max 300
P _{filt} pression du filtre	Inférieur à 300 pendant le fonctionnement
P _{ratio}	20-60
Tr _{st}	Supérieur à 800(°C) ; Inferieur à 1020(°C)
T _{red}	Supérieur à 650 °C