

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

Thème

Etude préliminaire du traitement thermique des déchets organiques (biomasse) par processus de gazéification

Soutenu le : 09/06/2015

Présenté par : M^{elle} Salem Fethya

Encadré par : Mr. Kalloum Slimane

Université Ahmed Draïa. Adrar

Président : Mr. Younsi Maamer

Université Ahmed Draïa. Adrar

Examinatrice : Mme Djedid Kheira

Université Ahmed Draïa. Adrar

Résumé

Il existe à présent différentes technologies de traitements permettant de gérer les déchets organiques (biomasse) tout en les valorisant sous forme d'énergie propre dont on cite le traitement thermique, ce dernier permet tout d'abord une réduction optimale des déchets traités. Il permet ensuite une valorisation efficace de l'énergie produite à l'issue du traitement, en une énergie renouvelable.

La gazéification de la biomasse est l'une des principales options pour la production d'une énergie renouvelable appelée « gaz de synthèse » composé essentiellement de gaz combustibles comme le méthane et hydrogène.

Le but de notre travail est la conception et l'expérimentation d'un gazéificateur de type « **Up draft** » pour le traitement des déchets organiques et la valorisation de l'énergie produite par la suite.

Les menuiseries de la commune d'Adrar génèrent d'importantes quantités de sciure de bois qui n'est ni traitée ni valorisée, de ce fait il est choisi comme substrat pour notre étude. En plus qu'il présente des caractéristiques énergétiques intéressantes (**PCI =4779.17 KWh/tonne**) et ne participe pas à l'augmentation de la teneur du CO₂ atmosphérique.

Le prototype de gazéification réalisé au cours de cette étude a permis une production d'un gaz inflammable d'une température qui a atteint **390°C**, avec un taux de réduction en masse de plus de **87%**.

Mots clés: Déchets, sciure de bois, énergie renouvelable, traitement thermique, gazéification, gaz de synthèse

Abstract

There are now various treatment technologies for managing organic waste (biomass) while promoting them as clean energy, the thermal treatment is mentioned, it allows first an optimal reduction of the treated waste. It then allows efficient recovery of energy produced at the end of treatment, renewable energy.

The gasification of biomass is one of the main options for the production of a renewable energy called "synthesis gas" consisting mainly of combustible gases such as methane and hydrogen.

The aim of our work is the design and testing of a type gasifier "**Up draft**" for the treatment of organic waste and reclamation of the energy produced thereafter.

The woodwork of the town of Adrar generate large amounts of sawdust that is neither treated nor valued, thus it is chosen as the substrate for this study.

In addition it has interesting energy characteristics (**LHV = 4779.17 kWh / ton**) and does not participate in the increase in atmospheric CO₂ content.

The gasification prototype produced during this study production of a flammable gas to a temperature of **390 ° C** with a reduction ratio by mass of more than **87%**.

Keywords: waste, sawdust, renewable energy, thermal treatment, gasification, synthesis gas,

توجد حالياً تقنيات معالجة مختلفة تسمح بإدارة النفايات العضوية (الكتلة الحيوية) مع تثمينها على شكل طاقة نظيفة، من بين هذه التقنيات نذكر المعالجة الحرارية، هذه الأخيرة تسمح أولاً بالتقليص الامثل للنفايات المعالجة. ثم تسمح بالتثمين الفعال للطاقة المنتجة في نهاية المعالجة إلى طاقة متجددة.

تغوية الكتلة الحيوية (التحويل إلى غاز) يعد أحد الخيارات الرئيسية لإنتاج طاقة متجددة تسمى 'الغاز الاصطناعي' يتألف أساساً من الغازات القابلة للاحتراق، مثل غاز الميثان والهيدروجين.

الهدف من هذه الدراسة هو تصميم و تجريب محول غاز من نوع تيار صاعد (up draft) لمعالجة النفايات العضوية وتثمين الطاقة المنتجة.

معامل النجارة لبلدية ادرار تولد كميات كبيرة من نشارة الخشب التي لا تعالج ولا تثمن، لذلك تم اختياره ككتلة حيوية في دراستنا هذه. بالإضافة إلى ذلك لديه خصائص طاغوية مهمة وفعالة (القيمة الحرارية الدنيا (PCI) = 4779.17 (كيلواط ساعة / طن) كما أنه لا يشارك في زيادة نسبة CO₂ في الغلاف الجوي

.النموذج الأولي المنجز خلال هذه الدراسة يسمح بإنتاج غاز قابل للاشتعال درجة حرارته بلغت

390 درجة مئوية، بمعدل انخفاض في الكتلة لأكثر من 87 %.

كلمات مفتاحية : نفايات، نشارة الخشب ، طاقة متجددة ، معالجة حرارية ، التغوية، الغاز الاصطناعي.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- © *Mes adorables parents pour leur amour, leur encouragement et leur soutien*
- © *Ma douce sœur FRIEL et mon adorable frère SALIM*
- © *A la mémoire de ma grand-mère qui a tant prié pour moi*
- © *Toute ma famille*
- © *Mes collègues qui m'ont encouragé*
- © *Mes amis ILHEM, SALIM, Yacine et Sarah*
- © *Tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin*
- © *Tous ceux que j'aime et j'admire vraiment*



Fethya♥♥♥

Remerciement

En premier lieu, je remercie Dieu pour m'avoir donné le courage et la patience pour compléter ce modeste travail,

Je remercie **mes parents**, pour leur soutien, leurs prières et leurs encouragements dans les moments de force et de faiblesse

Mes plus vifs remerciements à :

- Mon encadreur **Mr. Kalloum S.** pour son suivie et ses conseils
- **Mr. Younsi M.** qui m'a honoré en acceptant de présider le jury
- **Mme. Djdid K.** qui a gentiment accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Je tiens aussi à remercier et exprimer ma profonde gratitude à :

- **Mr. Mongar Houcine** (attaché de recherche à l'URERMS)
- **Mr. Saadi Zine** (attaché de recherche à l'URERMS)
- **Mr. Haida Abdelkrim** (ingénieur d'état à l'URERMS)
- **Mr. Akidi Salem** (technicien supérieur à l'URERMS)
- **Mr. Fanni Abderrahmane** (technicien supérieur à l'URERMS)

Pour leurs précieux conseils, leur aimable collaboration et leur aide inestimable.

Aussi je remercie **Mr. Rahmani Abdallah** (TS à l'URERMS) et **Mr. Oussama** (ingénieur d'état à l'URERMS) pour leur collaboration.

Tous les membres de l'équipe Bioconversion, spécialement **Mme Bahiani M.**, ainsi que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire

Merci...

SOMMAIRE

Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux	ii
Liste des abréviations	iii
Introduction générale	1

Partie théorique

Chapitre 1: Généralités sur les traitements thermiques de la biomasse

I. Historique.....	3
II. Le traitement thermique de la biomasse	4
II.1. Processus d'oxydation	4
II.2. Processus de pyrolyse des déchets.....	9
II.3. Processus de gazéification des déchets.....	13
III. Les principales motivations de marché envers le traitement thermique	15
IV. Avantages et inconvénients des traitements thermiques.....	17

Chapitre 2: Gazéification de la biomasse

I. Introduction.....	18
II. Historique	19
III. Définition et principes de la gazéification	20
IV. Les étapes de la gazéification.....	20
VI. Propriétés de la biomasse affectant la gazéification.....	23
VI.1. Le type, la taille et forme des particules.....	24
VI.2. Densité	24
VI.3. Fluidité	25
VII. Gazéification de la biomasse.....	25
VII.1. Réactions importantes impliquées dans un procédé de gazéification	25
VIII. Les différents procédés de gazéification.....	26
VIII.1. Classification selon la conception du réacteur	26
IX. Les principales variables opératoires de gazéification.....	31
IX.1. La température	31
IX.2. La pression	32
IX.3. Les agents de gazéification	32
IX.4. Alimentation et conditionnement de la biomasse	32
X. Les produits de la gazéification	33
XI. Les applications de gazéification	34

XII. Composition du gaz de synthèse :	35
a. Les composants valorisables	36
b. Les composants à abattre	36
XIII. Les facteurs influençant sur la qualité du gaz de synthèse	37
XIV. Technique de purification du gaz de synthèse	37
XIV.1. Elimination des particules	37
XIV.2. Elimination des goudrons	38
XIV.3. Abattage/neutralisation des fumées	38
XIV 4. Techniques complémentaires en épuration des fumées	39
XV. Comparaison entre la gazéification et la combustion	40
XVI. Les différents modes de valorisation possibles du gaz de synthèse	41

Partie expérimentale

Chapitre 3: Matériel et méthodes

I.Choix du processus de traitement thermique	42
II.Choix du substrat	42
III.Caractérisation du substrat	43
III.1. Composition chimique du bois	43
III.2. Granulométrie	43
III.3. Humidité	44
III.4. Teneur en cendres	46
III.5. Matière volatile	47
III.6. Carbone fixe	48
III.7. La densité ou la masse volumique	49
III.8. Pouvoir calorifiques	50
IV.Prototype de gazéification réalisé	52
V.Taux de conversion de la biomasse	56

Chapitre 4: Résultats et discussions

I. Présentation des résultats	57
1. Caractérisation du substrat	57
2. Suivi de l'évolution de la température	57
3. Gaz de synthèse produit	59
4. Taux de conversion de la biomasse :	60
II. Discussion des résultats	61
Conclusion	63

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure 1. schéma de principe d'un four de combustion de déchets.....	5
Figure 2. Schéma général d'une oxydation régénérative par oxydes métalliques	8
Figure 3. Schéma de principe des procédés OVH	9
Figure 4. Schéma de principe d'un four de pyrolyse	10
Figure 5. Les différents types de produits obtenus par la pyrolyse	11
Figure 6. Principe de l'étagement réactionnel en gazéification	14
Figure 7. les étapes de la gazéification	23
Figure 8. les différents types de gazéificateurs à lit fixe	27
Figure 9. Schéma de principe de réacteurs de gazéification à lit fluidisé.....	29
Figure 10. Réacteur à flux entraînée	30
Figure 11. Sciure de bois	43
Figure 20. Prise de pesée et séchage de la sciure de bois	45
Figure 22. Détermination du taux de cendre	47
Figure 21. Détermination de la matière volatile	48
Figure 12. Procédures d'analyses approximatives de la biomasse	49
Figure 13. Evolution du PCI sur brut en fonction du pourcentage d'humidité sur brut	52
Figure 14. Prototype de gazéification (coupe verticale).....	53
Figure 15. Compresseur d'air	54
Figure 16. Dispositif de gazéification.....	54
Figure 17. Alimentation du gazéificateur	55
Figure 18. Mesure du débit.....	55
Figure 19. Acquisition de donnée utilisée pour le suivi de la température.....	56
Figure 23. Composition moyenne du substrat	57
Figure 24. Evolution de la température cours de la gazéification (essai 1).....	58
Figure 25. Evolution de la température cours de la gazéification (essai 2).....	58
Figure 26. Evolution de la température cours de la gazéification (essai 3).....	59
Figure 27. Test de l'inflammabilité du gaz produit	59
Figure 28. Goudron produit lors de la gazéification.....	60
Figure 29. Volume avant (a) et après (b) gazéification	60

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques principales des biohuiles	12
Tableau 2. Caractéristiques principales des processus chimiques pour le traitement thermique des déchets solides	15
Tableau 3. Avantages et inconvénients des traitements thermique	17
Tableau 4. les différents types de pyrolyse	22
Tableau 5. Les principaux types d'oxydant.....	22
Tableau 6. Caractéristiques des gazéificateurs à lit fixe.....	27
Tableau 7. Les avantages et les inconvénients entre les deux types de procédés.....	30
Tableau 8. Composition moyenne du gaz en fonction du type de procédé	35
Tableau 9 contaminants et les problèmes pour le processus de gazéification	36
Tableau 10 Tableau comparative entre le procédé de gazéification et la combustion	40
Tableau 11 exemple de granulométrie.....	44
Tableau 12 Les correspondances entre les différentes unités d'énergie	51
Tableau 14. Tableau récapitulatif des caractéristiques et composition moyenne du substrat	57

LISTE DES ABREVIATIONS

Liste des abréviations

OVH : Oxydation en voie humide

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PCS : Pouvoir calorifique supérieur

CET : Centre d'enfouissement technique

FFOM: Fraction fermentescible des ordures ménagères

HCG: Hot gas cleaning

COV: Composés organiques volatiles

ASTEM: American Society for Testing and Materials

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énorme augmentation de la quantité des déchets et leur diversité ainsi que leurs effets potentiellement néfastes sur l'environnement et la santé publique, ont conduit à une prise de conscience croissante au sujet d'un besoin urgent d'adopter des méthodes scientifiques pour l'élimination sûre des déchets.

Plusieurs stratégies et techniques de gestion des déchets sont mis en place afin de valoriser et limiter la production des déchets.

Il existe deux voies de valorisation possible :

1. La valorisation matière : L'élaboration de nouveaux produits à partir des déchets , comme l'utilisation de la matière organique pour améliorer la fertilisation des sols.
2. La valorisation énergétique : La production d'énergie électrique et/ou thermique. [1]

Bien qu'il existe un besoin évident de réduire au minimum la production de déchets et de les réutiliser et les recycler, les technologies de récupération d'énergie à partir de déchets peuvent jouer un rôle essentiel dans l'atténuation des problèmes. Ces technologies peuvent conduire à une réduction substantielle des quantités de déchets globaux nécessitant l'élimination finale, qui peut être mieux gérée pour l'élimination sans danger tout en respectant les normes de contrôle de la pollution.

Cependant, le choix de la technologie de traitement de déchet dépend souvent du type de déchet et de la nature de sa destination ultérieure.

Parmi les diverses technologies de traitement et valorisation des déchets existantes on a le **traitement thermique** , comme son nom l'indique, cette technologie se base sur la destruction thermique des déchets .

Le traitement thermique est souvent décrit en tant que technologie « mûre » avec peu de place pour l'amélioration, du fait qu'il a été utilisé par l'humanité depuis des millénaires, le feu pour la chaleur, la cuisson, et la production du charbon de bois étaient les premières transformations thermiques de la biomasse commandées par des humains.

Le traitement thermique est une technique dont les résultats sont rapides et l'élimination des déchets est presque définitive.

Le présent travail est une étude préliminaire sur l'un des traitements thermiques qui est « **la gazéification** » .

Le mémoire est subdivisé en deux grandes parties, une partie théorique et une partie expérimentale :

La partie théorique est composée de deux chapitres, le premier chapitre est un aperçu général sur les différents traitements thermique, historique, principes et caractéristiques, voies de valorisation tout en déterminant les avantages et inconvénients générale et spécifique ainsi que les principales motivations du marché visées ce type de traitement.

En commençant avec un petit aperçu sur la biomasse et ses voies de conversion, le deuxième chapitre sera consacré à l'une des voies de conversion thermique vue dans le premier chapitre qui est la gazéification. Principe, étapes de déroulement, les principaux types de processus connus, domaine d'application ainsi que les avantages et les inconvénients de la gazéification.

La dernière partie de ce chapitre sera basée sur les composants valorisables et non valorisable de la gazéification avec un bref aperçu sur les techniques de traitement des polluants et des composants indésirables formés lors de la gazéification.

La deuxième partie de ce mémoire est une étude expérimentale préliminaire de la gazéification, elle est composée de deux chapitres,

Le premier chapitre englobe le matériel et les méthodes de travail, en commençant par le choix et la caractérisation de notre substrat d'étude, puis la conception et la réalisation d'un mini gazéificateur.

Le deuxième chapitre comprend les résultats obtenus au cours des expériences ainsi qu'une discussion de ses résultats.

On clôture le travail par une conclusion générale.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE 1
GENERALITES SUR LES
TRAITEMENTS THERMIQUES DE LA
BIOMASSE

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

I. Historique

L'activité humaine a, de tout temps, été génératrice de déchets et chaque époque a eu son mode de traitement et ses problèmes spécifiques.

Bien sûr, ce qui subsiste des déchets de nos ancêtres préhistoriques fait aujourd'hui le bonheur des archéologues, mais le peuplement humain était alors peu important et l'incidence sur l'environnement probablement très mineure.

Le vrai problème s'est posé un peu plus tard, dans les civilisations antiques. Les Romains, par exemple, mirent en place dans la plupart de leurs villes des systèmes d'égouts, comme le *Cloaca Maxima* de Rome, qui étaient un embryon de traitement des déchets, au moins pour la rue puisque l'ensemble était finalement déversé dans le Tibre.

Or, malgré cette évolution dont les populations ultérieures auraient pu hériter, les ordures ménagères du moyen-âge étaient simplement jetées hors des maisons, dans la rue, éventuellement dans la rivière. À cette époque elles étaient, dans leur immense majorité, biodégradables, mais elles attiraient en ville toutes sortes de vermines et un cortège de maladies.

Depuis un passé récent, l'époque industrielle a générée des déchets de plus en plus nombreux et présentant une problématique nouvelle ; leur volume considérable, la non-biodégradabilité ou la toxicité de certains d'entre eux, leur durée de vie et leur impact sur l'environnement.

La mise en décharge a été la solution qui a d'abord paru être la plus pratique, passant, au fil du temps, des décharges sauvages aux décharges contrôlées, ces dernières recevant en vrac des déchets de tous types et finissant ainsi par être elles-mêmes une menace pour l'environnement.

Aujourd'hui, les nécessités de réduction de la pollution, d'économies d'énergie et de gestion des ressources naturelles ont transformé le traitement des déchets en une donnée incontournable pour la survie de la planète.

Le problème du devenir des déchets se pose donc désormais d'une façon aiguë. Or la plupart des déchets sont des produits qui peuvent être valorisés et devenir de véritables matières premières secondaires. [2]

Le traitement thermique se présente comme l'une des différentes techniques de traitement et valorisation des déchets surtout la biomasse, ce type de traitement existe depuis des siècles mais

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

avec les nouvelles technologies il demeure aujourd'hui plus efficace, moins polluant et permet une valorisation énergétique importante.

II. Le traitement thermique de la biomasse

Le traitement thermique est basé sur différents processus de transformation thermo-chimique de la matière et de l'énergie.

Dans la conversion thermo-chimique, la biomasse entière est convertie en gaz synthétique, qui peut être utilisé pour la production d'énergie électrique (turbine à gaz, piles à combustibles), de bio-carburants, ou de composés chimiques, notamment l'ammoniac et le méthanol.

Il existe plusieurs modes de traitement thermique, leur choix est généralement basé sur la nature du déchet à traiter ainsi que le mode de valorisation énergétique espéré.

Les processus de traitement thermique les plus connus sont :

II.1. Processus d'oxydation

La destruction thermique d'un effluent ou d'un déchet peut être obtenue par des réactions d'oxydation entre la matière (gazeuse, liquide ou solide) du déchet et un agent oxydant.

Si les réactions d'oxydation ont lieu dans un thermophore gazeux, l'agent oxydant étant l'air, l'oxygène ou des oxydes métalliques solides, en général à la pression atmosphérique, c'est-à-dire l'eau incluse ou formée étant vaporisée, on parle alors de **combustion** ou d'**incinération**.

Si les réactions d'oxydation ont lieu dans un thermophore liquide, sous pression, c'est-à-dire sans départ d'eau, l'agent oxydant étant de l'oxygène, de l'air, de l'ozone dissous ou du peroxyde d'hydrogène, on parle d'**oxydation en voie humide**. [3]

II.1.a. Processus de combustion à l'air (incinération)

La combustion représente le moyen le plus ancien de valorisation de la biomasse, étant donné que la civilisation a commencé par la découverte du feu. La combustion du bois des forêts a enseigné aux humains comment faire cuire et comment se maintenir chauds.

Chimiquement, la combustion est une réaction exothermique entre l'oxygène et l'hydrocarbure dans la biomasse. Ici, la biomasse est oxydée dans deux composés stables importants, H₂O et CO₂. La chaleur de réaction libérée est actuellement la plus grande source de consommation d'énergie humaine, représentant plus de **90%** de l'énergie de la biomasse. [4]

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

Les réactions de combustion nécessitent en général, pour être complètes, un excès d'air par rapport à la demande stoechiométrique en oxygène et, ce, particulièrement pour les solides. Les produits de combustion gazeux (fumées) ou solides (mâchefers, cendres) sont alors incombustibles si les réactions d'oxydation ont été complètes. Pour atteindre cet objectif, la combustion à l'air d'un déchet est, en général, organisée dans deux enceintes thermiques successives, à savoir, une chambre primaire de combustion, assimilable à un réacteur mélangé, suivie d'une chambre secondaire, assimilable à un réacteur piston, destinée à la post-combustion des gaz issus de la chambre primaire.

[3]

Les

CO₂,

produits gazeux de combustion sont alors

H₂O, N₂, SO₂.

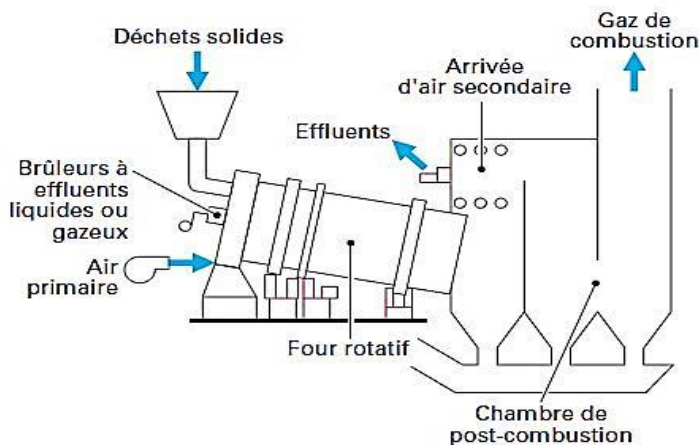


Figure 1. Schéma de principe d'un four de combustion de déchets [3]

Avantages et inconvénients de l'incinération

a. avantages

- Réduction des volumes de déchets de 90% ;
- Rapidité de traitement ;
- Pas de prétraitements (dans le cas des incinérateurs équipés de fours à grilles) ;
- Adaptation aux gros gisements ;
- Possibilité de récupérer et valoriser l'énergie ;
- Possibilité de récupérer les métaux ;
- Garantie de long terme.

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

b. inconvénients

- Formation de cendres, de résidus polluants ;
- Problème des seuils de rentabilité pour les petites unités ;
- Production d'énergie électrique peu efficace dans la plupart des cas ;
- Investissements élevés ;
- Coûts de fonctionnement en forte croissance ;
- Empêche toute inflexion de la politique des déchets ;
- Oppositions sociales croissantes. [5]

II.1.b. Processus d'oxycombustion

L'oxycombustion est un procédé d'incinération basé sur l'utilisation d'air enrichi ($O_2 < 21\%$) ou bien d'oxygène pur en tant que gaz comburant. La suppression ou la diminution de l'azote du ballast du gaz comburant permet la diminution du volume spécifique des fumées générées par la combustion d'un déchet. Cela a pour conséquence directe la réduction du volume des enceintes nécessaire au traitement thermique d'un déchet pendant un temps de séjour donné, ainsi que de celui des dispositifs de traitement des fumées en aval de la combustion.

a. Avantages de l'oxycombustion

- Ce procédé présente l'avantage d'augmenter la température de combustion et donc l'énergie dégagée, et de produire des fumées constituées de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone concentré (à plus de 80 % du volume).
- L'oxycombustion facilite donc la séparation puis la capture du CO_2 et la production de gaz carbonique concentré, en vue d'utilisations industrielles ou de stockage géologique.
- Ce procédé de capture de CO_2 est encore à l'état de démonstration dans des projets pilotes, comme celui de Lacq en France. [6]

II.1.c. Processus d'oxydation haute température par plasma

Dans ce cas, l'oxydation des déchets a lieu avec un apport externe d'énergie calorifique, celle-ci étant fournie à l'enceinte de traitement par une torche à plasma (plasma d'arc non transféré), fonctionnant en alimentation électrique de puissance et permettant d'atteindre des températures très élevées ($> 4\ 000\ C^\circ$). Le générateur de plasma peut fonctionner avec des gaz oxydants comme l'air, ou bien celui-ci est introduit séparément, permettant le maintien d'une atmosphère oxydante dans l'enceinte de traitement.

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

L'utilisation de plasma est adaptée au traitement de déchets très résistants, par exemple organochlorés, à faibles pouvoirs calorifiques et/ou à teneurs en fraction minérale élevées, la haute température imposée par le plasma et sa réactivité, permettant d'atteindre des cinétiques rapides de destruction de leur fraction organique, tout en conduisant à la fusion de sa fraction minérale. [3]

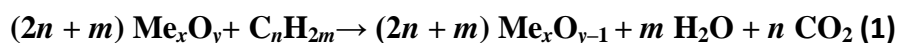
a. Avantages et inconvénients de l'oxydation haute température par plasma

Les avantages du procédé résident dans les fortes densités de puissance mises en jeu, la faible inertie thermique des installations, les temps de traitement courts et les taux élevés de destruction thermique obtenus.

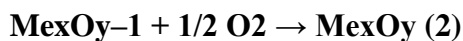
Les inconvénients du procédé, indépendamment de son coût d'investissement élevé, sont liés aux forts taux d'envols particulaires, du fait des turbulences générées dans le four, à la vaporisation d'une partie de la charge, à la durée de vie faible des électrodes et réfractaires du fait de leur usure/corrosion, aux consommations et coûts en gaz plasmagène et électricité, aux pertes énergétiques du four lui-même et celles imposées par le refroidissement nécessaire des électrodes. [7]

III.d.Processus d'oxydation par des oxydes métalliques

La combustion d'un composé gazeux ou d'une vapeur organique, peut être réalisée par utilisation d'oxydes métalliques finement divisés, agissant en donneurs d'oxygène pour l'oxydation du composé. L'oxyde métallique est alors réduit, et le composé oxydé dans une première enceinte suivant une réaction thermochimique, en général endothermique, du type



Le métal réduit peut être réoxydé à l'air ou à l'oxygène dans une deuxième enceinte, suivant la réaction exothermique :



L'avantage de ce mode d'oxydation en boucle régénérative (*Chemical Looping Combustion*) est que le dioxyde de carbone, produit dans la réaction d'oxydation, n'est pas dilué dans l'azote de l'air, et qu'il peut aisément être récupéré après condensation des produits gazeux de la réaction, ouvrant ainsi la voie à sa séquestration. [3]

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

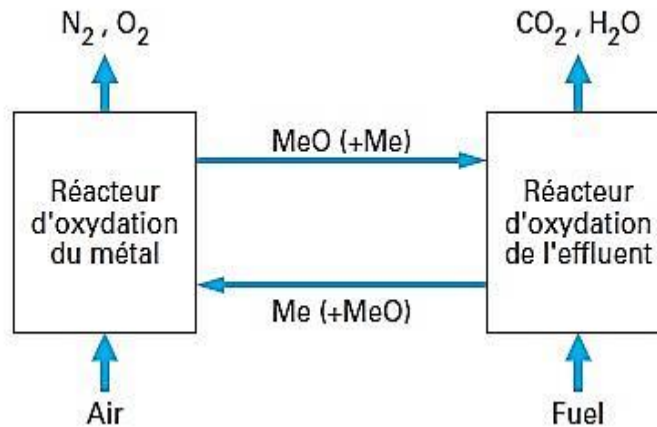


Figure 2. Schéma général d'une oxydation régénérative par oxydes métalliques [3]

II.1.e. Processus d'OVH (oxydation en voie humide)

Ce processus vise à l'oxydation de la fraction organique d'un effluent aqueux ou d'une suspension, sans élimination préalable de l'eau, par mise en contact, au sein d'un réacteur, avec un agent oxydant (air, oxygène, peroxyde d'hydrogène), dans des conditions de pression et de température permettant non seulement des cinétiques acceptables de dégradation de cette fraction organique en CO_2 et H_2O , mais aussi l'absence de vaporisation de l'eau, processus éminemment coûteux en énergie. La limite inférieure de pression utilisée est la pression de vapeur saturante à la température de fonctionnement, de façon à rester constamment en milieu liquide. Le degré d'oxydation de la fraction organique dépend alors du couple température/pression, du taux d'agent oxydant et de temps de séjour au sein du réacteur. [3]

Ce type de procédé est applicable pour des **déchets liquides pompables**, ayant un taux de matières sèches compris entre 1 et 15 %, avec une fraction minérale inerte comprise entre 1 et 40 g/L, la taille des particules incluses n'excédant pas **500 μm** .

Les déchets liquides visés sont :

- Les déchets aqueux de synthèse chimique ;
- Les effluents de lessivage chimique ;
- Les déchets liquides huileux ;
- Les solvants en phase aqueuse ;
- Les déchets de peinture ;

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

- Les boues résiduaires, etc. [7]

Deux types de procédés peuvent être mis en œuvre :

- **les procédés en conditions sous-critiques** : la pression reste inférieure à **150 bars** et la température est limitée à **300°C**. Dans ce cas, le milieu réactionnel consiste en un mélange diphasique gaz-liquide, l'oxygène et la fraction organique étant peu solubles, dans ces conditions, dans le milieu réactionnel. On parle alors quelquefois de **procédé diphasique**. Dans ces conditions, les temps de séjour nécessaires sont de l'ordre de **15 à 60 min** dans la pratique, pour un taux de conversion de la charge organique de **99 %**.
- **les procédés en conditions supercritiques** : la pression est voisine de **250 bars** et la température est comprise entre **375 et 600 °C**. Dans ce cas, le mélange eau-oxygène est homogène. On parle alors quelquefois de **procédé d'oxydation monophasique**. Dans ces conditions les temps de séjour sont inférieurs à la minute pour une conversion à **99 %** de la charge organique totale du déchet. [7], [3]

L'oxydation en voie humide est, bien entendu, exothermique. La chaleur produite par l'oxydation est, en général, utilisée pour préchauffer l'effluent à traiter.

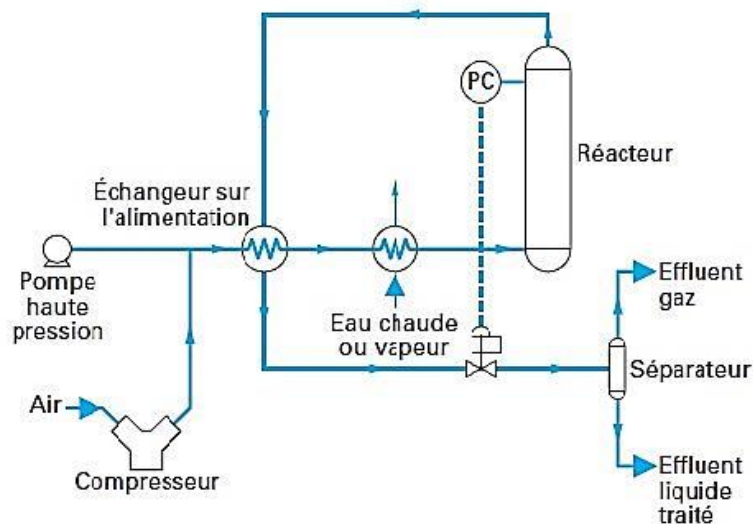


Figure 3. Schéma de principe des procédés OVH [3]

II.2. Processus de pyrolyse des déchets

Contrairement à la combustion, la pyrolyse a lieu en absence totale d'oxygène, sauf dans les cas où on permet à la combustion partielle de fournir l'énergie thermique requise pour ce processus.

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

Ce processus décompose thermiquement la biomasse en gaz, liquide, et solide en chauffant rapidement la biomasse au-dessus de **300 – 400°C**.

Dans la pyrolyse, les grandes molécules d'hydrocarbure de biomasse sont décomposées en plus petites molécules. La pyrolyse rapide produit principalement le combustible liquide, connu sous le nom de **biohuile**, tandis que la pyrolyse lente produit du gaz et du charbon de bois plein (un des carburants les plus antiques, utilisé pour l'extraction de chauffage et en métal avant la découverte du charbon).

La pyrolyse est prometteuse pour la conversion de la biomasse de rebut dans les combustibles liquides utiles. À la différence de la combustion, elle n'est pas exothermique. [4]

La pyrolyse est un processus **endothermique** de décomposition de déchet, il se limite donc à la destruction thermo-chimique du déchet, sans dégagement de chaleur susceptible d'entretenir la réaction. Il est donc nécessaire de fournir de l'énergie au système, soit par un apport externe, en chauffage indirect, soit par combustion partielle ménagée d'une partie de la charge.

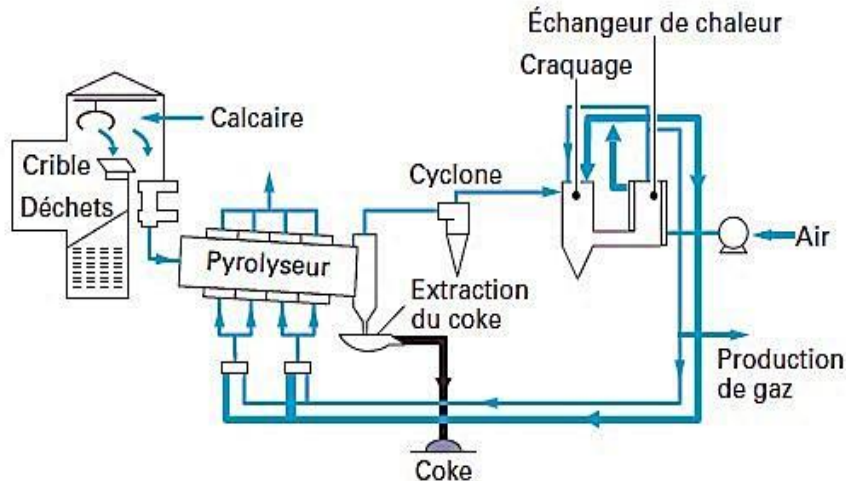


Figure 4. Schéma de principe d'un four de pyrolyse [3]

Pendant la pyrolyse, le matériau se décompose en trois éléments principaux, à savoir :

- Un résidu carboné (coke) renfermant les matières minérales initiales;
- Des gaz condensables contenant eux-mêmes des dérivés aqueux et des hydrocarbures lourds. Ces derniers sont partiellement craqués (réaction endothermique) pour donner des

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

hydrocarbures légers et des résidus carbonés. La fraction résiduelle est donc composée de goudrons et de dérivés aqueux acides ;

- Des gaz incondensables (CO, CO₂, H₂, C₂H₂, CH₄.....etc.). [3]

Le mélange gazeux produit peut être craqué thermiquement pour produire un gaz plus ou moins exempt de fraction condensable (goudrons) directement utilisable, après épuration, en moteur à gaz voire éventuellement en turbine à gaz. L'énergie produite par combustion peut être autoconsommée pour chauffer les parois du four ou sécher les déchets ou valorisée pour fournir de la chaleur ou de l'électricité à l'extérieur. [8]

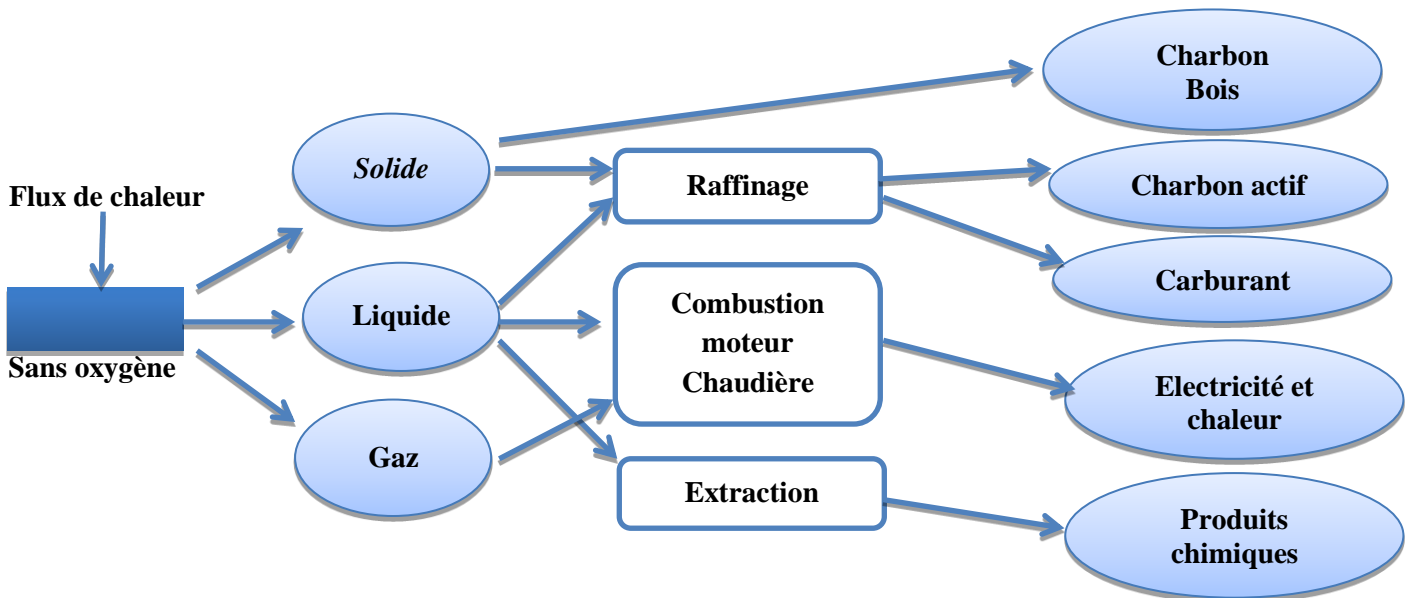


Figure 5. Les différents types de produits obtenus par la pyrolyse [9]

La pyrolyse peut être conduite sous vide ou sous pression réduite. Cela permet de minimiser les réactions secondaires telles que repolymérisation, recondensation... et conduit à maximiser la production d'huile pyrolytique au détriment du résidu solide.

Deux modes de conduite de la pyrolyse peuvent être appliqués au traitement pyrolytique des déchets :

- **la pyrolyse lente, ou carbonisation :** Temps de séjour élevé (~ 60 min)
Vitesse de chauffe lente 10-20 °C/min
Température modérée 400-600 °C

Les masses produites par pyrolyse : m_s (en solide) **augmente**, m_g (en gaz) **diminue**.

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

- **la pyrolyse rapide ou flash :** Temps de séjour faible (~ **1-10 m in**)
Vitesse de chauffe élevée **300-800 °C/min**
Température é levée **650-850 °C**

Les masses produites par pyrolyse : m_s (en solide) **diminue**, m_g (en gaz) **augmente**. [7]

II.2.a. Les huiles de pyrolyse ou biohuiles

Pendant la pyrolyse dite "**flash**", la vitesse de chauffe est très élevée (+ **100°C/s**). Elle permet d'obtenir un gaz riche en hydrocarbures. Il est ensuite refroidi rapidement pour produire un liquide brun foncé (**biohuile**) dont le pouvoir calorifique est environ la moitié de celui du mazout classique. Cette biohuile n'est pas une huile à proprement parler mais plutôt une soupe de composés chimiques (alcools, acides, aldéhydes, phénols, etc...).

Certains de ces composants sont des produits chimiques de grande valeur et si ces produits peuvent être séparés ou extraits, ils peuvent générer d'importants revenus.

L'huile produite contient un pourcentage d'humidité de **20 à 25 %**. Elle est très riche en acide et ne peut être utilisée directement que dans les systèmes qui peuvent fonctionner avec des carburants à faible densité énergétique (**16-17 MJ/kg**) et un pH de **2,5**. Certains procédés ont été développés pour éliminer les difficultés liées à l'utilisation de la biohuile comme carburant qui est plus visqueuse que le diesel courant, plus difficile à brûler, fortement acide et d'une valeur calorifique moindre. [9]

Tableau 1. Caractéristiques principales des biohuiles [9]

Propriétés	Biohuile	Fuel lourd
Taux d'humidité %	15-30	10
pH	2.5	-
Masse volumique à 15°C kg/l	1.20	1.03
Analyse élémentaire après séchage		
C%	56.4	87.9
H%	6.2	10.5
O%	37.3	0.2
S/N%	0.1	0.4<1
Cendres %	0.1	0.02
PCI (dépend du taux d'humidité) MJ/kg	16-19	42.66
Viscosité (à 40°C et 25% d'eau) cs	40-100	1500
Solide (charbon) %	0.5	-

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

II.3. Processus de gazéification des déchets

La gazéification est un procédé pour convertir les matériaux solide carbonés en gaz combustible (par exemple, un mélange de H_2 , de CO , de CH_4 et de CO_2). L'objectif global est de convertir ces gaz en carburants qui peuvent être facilement intégrés dans des technologies d'énergie courantes. Généralement la gazéification implique la réaction d'un combustible solide avec un co-réactif à des températures dans la gamme de **550-1000°C**. [10]

Si l'on veut obtenir un gaz à pouvoir calorifique élevé, donc riche en hydrocarbures, dont le méthane, on doit travailler à une pression élevée et à une température relativement faible qui doit être toutefois compatible avec la cinétique des réactions thermochimiques.

Par contre, si l'on s'intéresse à l'obtention d'un gaz riche en **CO** et **H₂** en vue d'une valorisation énergétique, on a intérêt à opérer à basse pression et à température élevée.

Les procédés actuels de gazéification des déchets visent essentiellement, non pas la production de gaz de synthèse, considérés comme matière première pour l'industrie chimique, mais la destruction thermique de ces déchets, avec valorisation du contenu énergétique des gaz combustibles produits.

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

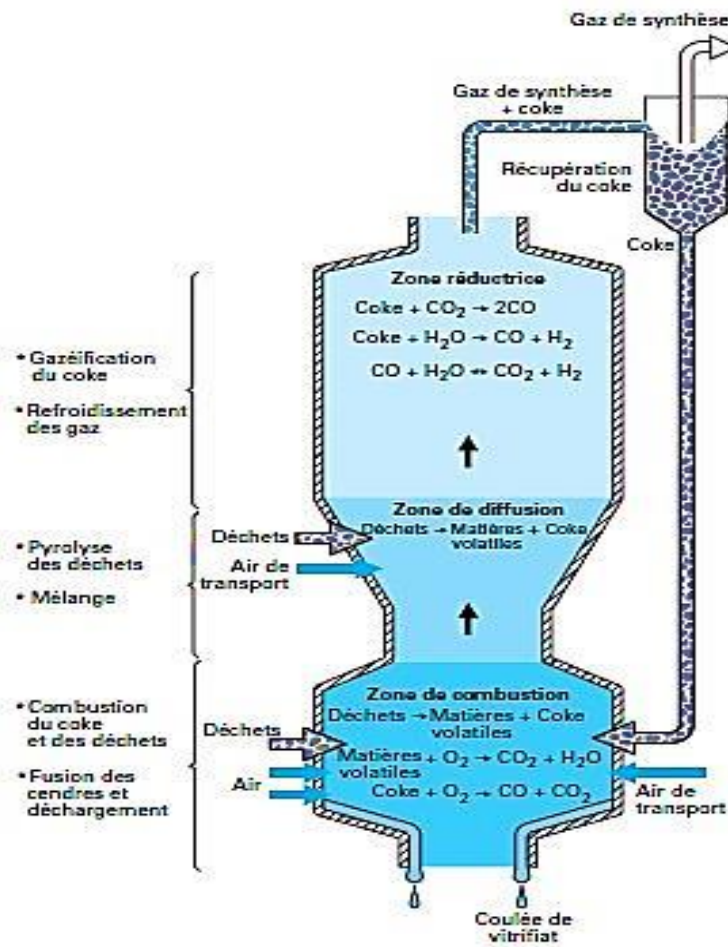


Figure 6. Principe de l'étagement réactionnel en gazéification [3]

Plusieurs types de gazéificateurs ont été développés, bien qu'il existe plusieurs façons de classer ces gazéificateurs (selon la manière dont l'énergie est fournie pour le processeur, selon le phénomène de transport,...etc.). Parmi ces différents types de gazéificateurs on peut citer : le gazéificateur à lit fixe, à lit entraîné,...etc.

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

Tableau 2. Caractéristiques principales des processus chimiques pour le traitement thermique des déchets solides [11]

	Combustion	Gazéification	Pyrolyse
But du processus	maximiser la conversion de rebut en fumées, principalement CO ₂ et H ₂ O à hautes températures	maximiser la conversion de rebut en gaz de carburant de valeur calorifique élevée, principalement CO, H ₂ et CH ₄	maximiser la décomposition thermique des déchets solides en gaz et en phases condensées
Conditions de fonctionnement Environnement de réaction	Oxydation (quantité d'oxydant plus grande que celle exigée par la combustion stœchiométrique)	Réduction (quantité d'oxydant plus bas que celle exigée par la combustion stœchiométrique)	Absence totale de tout oxydant
Gaz réactif	Air	Air, oxygène pur, air enrichi d'oxygène, vapeur	Aucun
Température	Entre 850 °C et 1200 °C	Entre 550-900 °C (dans la gazéification d'air) et 1000-1600 °C	Entre 500 °C et 800 °C
Pression	Généralement atmosphérique	Généralement atmosphérique	Légère surpression
Rendement de processus			
Gaz produits	CO ₂ , H ₂ O	CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O, CH ₄	CO, H ₂ , CH ₄ et d'autres hydrocarbures
Polluants	SO ₂ , NO _x , HCl, PCDD/F, particule	H ₂ S, HCl, COS, NH ₃ , HCN, goudron, alcalin, particule	H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, goudron, particule
Cendre	Les cendres résiduelles peuvent être traitées pour récupérer les métaux ferreux (fer, acier), des métaux non ferreux (aluminium, cuivre et zinc) et des matériaux inertes (pour être utilisé comme matériau de construction). Les résidus de la pollution atmosphérique sont généralement traités et éliminés comme des déchets industriels.	Comme pour le procédé de combustion. Les cendres résiduelles sont souvent produites comme résidu vitreux qui peut être utilisé comme matériau de remblayage pour la construction routière	Souvent ayant une teneur en carbone non négligeable. Traités et éliminés comme des déchets industriels spéciaux
Purification du gaz	Traitées dans les unités de traitement de la pollution de l'air à respecter les limites d'émission, puis envoyé à la cheminée	Il est possible de nettoyer les gaz de synthèse pour répondre aux normes de substances chimiques produites ou celles des dispositifs de conversion d'énergie à haut rendement	Il est possible de nettoyer les gaz de synthèse pour répondre aux normes de substances chimiques produit ou celles des dispositifs de conversion d'énergie à haut rendement

III. Les principales motivations de marché envers le traitement thermique

- a. Réduction de volume des matières résiduelles;
- b. Rend la matière résiduelle sécuritaire et inerte;

Chapitre 1 **Généralités sur les traitements thermique de la biomasse**

- c.** Récupère une valeur économique de la matière résiduelle (principalement sous forme d'électricité);
- d.** Motivation envers le développement durable conduisant à des initiatives en réutilisation et en recyclage;
- e.** La filière énergétique de la matière résiduelle est complémentaire au recyclage;
- f.** Méthode pratique en gestion des quantités croissantes de matières résiduelles;
- g.** Détournement de matière résiduelle de l'enfouissement;
- h.** Manque chronique d'espace d'enfouissement dans certains pays et manque appréhendé à court terme dans d'autres;
- i.** Instruments économiques et fiscaux (par exemple, tarifs d'accueil au site d'enfouissement; subventions pour énergie alternative). [12]

Chapitre 1 Généralités sur les traitements thermique de la biomasse

IV. Avantages et inconvénients des traitements thermique

Tableau 3. Avantages et inconvénients des traitements thermique [13]

Critère		Avantage	Inconvénient
Réglementaires	Destruction des polluants	<ul style="list-style-type: none"> - Oxydation des composés organiques - Rejets gazeux et liquides Contrôlés - Métaux lourds concentrés dans les cendres volantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Refiom à stocker en CET - Rejets gazeux et éventuellement liquides
	Action sur microorganismes pathogènes	<ul style="list-style-type: none"> - Effluents et sous-produits exempts de risque pathogène 	<ul style="list-style-type: none"> - Risques sanitaires lors de la collecte et du transport
Techniques	Facilité de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie mature 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipement industriel de plus en plus complexe - Séchage préalable éventuellement nécessaire
Sociaux			<ul style="list-style-type: none"> - Acceptation par les populations - Transport de déchet brut non inerte
Coûts			<ul style="list-style-type: none"> - Coût significatif
Développement Durable		<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la masse des déchets - Valorisation énergétique - Valorisation possible des mâchefers 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de pouvoir fertilisant

CHAPITRE 2

GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

I. Introduction

La biomasse désigne l'ensemble de la matière organique qu'elle soit d'origine végétale ou animale ainsi que ses produits de transformation (**déchets organiques**). D'après l'échelle établie par **Hoogwijk et al**, la production de la biomasse est devisée en huit catégories:

1. Biomasse produite par le surplus des terres agricoles, non utilisées pour l'alimentation humaines ou animale : cultures énergétiques ;
2. Biomasse produite par le déboisement (entretien des forêts) ou le nettoyage de terre agricole ;
3. Résidus agricoles issu des cultures des céréales, vignes, vergers, oliviers fruits et légumes,... ; résidus de l'agroalimentaire ;
4. Résidus forestiers issu de la sylviculture et de la transformation du bois ;
5. Résidus agricoles issu de l'élevage (lisier, fumier, litières...) ;
6. Déchets organiques des ménages (fraction fermentescibles des ordures ménagères (**FFOM**), papiers, cartons, déchets verts) ;
7. Biomasse directement utilisée à des fins non alimentaires (bois pour le papier) ;
8. Déchets organiques des déchets industriels banals (papiers, cartons, bois, déchets putrescibles). [14]

Malgré que la biomasse est considérée comme la source d'énergie renouvelable avec le potentiel le plus élevé, seul **3,5 %** des **170 milliards de tonnes** (Gt) de la biomasse totale disponible sur la planète est utilisée (on estime que seuls **10 %** de cette biomasse sont accessibles, c'est-à-dire physiquement et économiquement exploitables).

Sur un plan purement chimique, la biomasse enferme toute la richesse moléculaire nécessaire à l'industrie pour développer de nouvelles voies de production d'intermédiaires qui sont aujourd'hui issus de ressources fossiles, notamment oléfiniques ou alcooliques. [15]

Trois types de combustibles primaires pourraient être produits à partir de biomasse, qui est :

1. Les combustibles liquides (éthanol, le biodiesel, du méthanol, l'huile végétale et l'huile de pyrolyse).
2. Les combustibles gazeux (biogaz (**CH₄**, **CO₂**), gaz (**CO**, **H₂**, **CH₄**, **CO₂**, **H₂**), gaz de synthèse (**CO**, **H₂**), gaz naturel de substitution (**CH₄**).

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

3. les combustibles solides (charbon de bois, la biomasse torréfiée, ...etc.) [4]

Les carburants et les résidus de biomasse peuvent être convertis en énergie par l'intermédiaire des processus thermochimiques et biologiques. Parmi les technologies thermochimiques de conversion existants, la gazéification de biomasse a attiré le plus d'intérêt du fait qu'elle offre des rendements plus élevés par rapport à la combustion tandis que la pyrolyse instantanée est toujours dans l'étape de développement.

L'avantage de la conversion énergétique de la biomasse, par rapport aux autres sources énergétiques renouvelables, réside dans le fait qu'en plus de la production d'énergie, elle participe activement au traitement des déchets organiques contribuant ainsi à la réduction de l'impact de nos activités sur l'environnement.

Les ressources de biomasse se répartissent en deux catégories: la biomasse humide ou mouillable (mélasse, les amidons et les engrais) et de la biomasse sèche (matériaux et résidus boisés et agricoles) processus biologiques nécessitent biomasse humide et fonctionnent à ou près de la température ambiante

Les procédés thermiques fonctionnent le mieux en utilisant des matières premières de la biomasse avec moins de **50%** d'humidité [16]

II. Historique

Historiquement, les procédés de carbonisation datent de la Haute Antiquité. Le premier gaz de synthèse a été produit par pyrolyse du charbon à la fin du XVIII^e siècle. Le procédé de gazéification fut appliqué dès le milieu du XIX^e siècle à partir du charbon pour la production du gaz d'éclairage puis en production de chaleur. Électricité et gaz naturel remplacèrent ensuite ce gaz de ville pour les usages domestiques. Lors de la Première Guerre mondiale, les industriels utilisèrent à nouveau la gazéification pour la synthèse chimique et la production d'hydrocarbures, à partir de l'invention du procédé **Fischer** et **Tropsch**. L'arrivée des carburants bon marché entraînera l'abandon du procédé qui renaîtra avec le premier choc pétrolier.

Aujourd'hui dans un contexte de plus en plus favorable aux énergies renouvelables (prise de conscience collective, incitations économiques,...), on observe un regain d'intérêt pour cette technologie. La gazéification représente l'un des moyens les plus efficaces pour produire de

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

l'électricité (rendement de **35%** pour une production conventionnelle et de **45%** pour la gazéification).

Le développement de ce procédé s'intensifie principalement avec la gazéification de la biomasse mais également des déchets, solution qui se positionne en alternative aux techniques traditionnelles d'incinération mises à mal par une image publique négative. [17]

III. Définition et principe de la gazéification

La gazéification est définie comme étant la conversion thermique d'un matériau organique à un gaz combustibles.

Grâce à la gazéification de la biomasse, un matériau solide hétérogène est converti en un combustible gazeux intermédiaire d'une qualité constante qui peut être utilisé de manière fiable pour le chauffage, les applications de processus industriels, la production d'électricité et la production de carburants liquides. [16]

Le gaz de synthèse obtenu à la fin, appelé « **syngas** » (**pour « synthetic gas »**), est un mélange composé principalement de deux gaz combustibles : le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H₂). [18]

Le gaz de synthèse est utilisé principalement :

- comme source de production de chaleur ;
- comme source de production d'électricité par l'action du gaz sur des turbines ;
- comme source de production d'hydrogène, de méthanol et de méthane par traitement chimique ;
- comme source de production de carburant de synthèse par le procédé Fischer-Tropsch [18]

IV. Les étapes de la gazéification

Pour parvenir à la production du syngas, plusieurs réactions préalables sont nécessaires. L'ensemble de ce processus est appelé gazéification. Il nécessite, à partir d'une matière organique, d'obtenir au préalable dans le réacteur de la vapeur d'eau (H₂O), du carbone (C) et de produire une chaleur suffisante pour la réaction finale de gazéification. Quatre étapes successives, fortement couplées, sont nécessaires, la troisième produisant la chaleur requise par les trois autres.

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

1ère étape : séchage de la matière pour produire de la vapeur d'eau

Le Chauffage et le séchage est la première étape de gazéification, la biomasse dont la teneur en humidité peut varier de **20** à **50%** est transformé en matière sèche à une température qui peut atteindre jusqu'à **300°C**.

Une fois la biomasse chauffée, l'humidité contenue dans cette dernière est transformée en vapeur d'eau qui peut réagir avec la biomasse et des produits volatils libérés pendant la combustion [16]

Dans le cas de produits non homogènes, une phase préalable (tri, broyage) est nécessaire avant d'introduire cet intrant dans le gazéificateur.

2e étape : pyrolyse des intrants pour obtenir du coke (résidus de carbone) et des gaz de pyrolyse

La décomposition thermique rapide de la biomasse, en l'absence d'oxygène est appelée la pyrolyse. Elle est encore appelée **carbonisation**, lorsque l'objectif est la production du charbon de bois, ou **dévolatilisation** lorsqu'elle est considérée comme première étape de la combustion [19], [16].

Bien que certaines réactions commencent à des températures aussi basses que **225°C**, le processus devient de plus en plus rapide et complet une fois que les températures atteignent **400-500°C** [16]

Cette étape est dite « **autothermique** » car elle ne produit ni ne consomme d'énergie.

Le procédé est accompagnée par la formation de :

- l'eau produite (provenant de la décomposition chimique de la biomasse),
- les gaz permanents (ceux qui ne se condensent pas lors du refroidissement), qui sont CO, CO₂, H₂ et des hydrocarbures légers, en particulier du méthane. ces gaz sont appelés aussi gaz de pyrolyse
- goudrons et des matières volatiles condensables issues de vapeurs de composés organiques (acides acétiques, aldéhydes), ainsi que la formation d'un solide carboné poreux connu en tant que coke.

La pyrolyse peut convertir jusqu'à **80%** en poids de la biomasse dans des vapeurs et des gaz, en fonction de la nature de la biomasse et de processus [16], [18]

Chapitre 2 Gazéification de la biomasse

En fonction de la gamme de températures et de la vitesse de chauffe, on peut distinguer trois types de pyrolyse différents (voir **tableau n°04**)

Tableau 4. Les différents types de pyrolyse [19]

Type	Niveaux de température	Vitesse de chauffe	Produits majoritaires
Pyrolyse lente	400-600°C	1-10°C/min	Volatiles (60-70%) Coke (30-40%)
Pyrolyse rapide	600-800°C	10-50°C/min	Volatiles (75-80%) Coke (20-25%)
Pyrolyse flash	600-900°C	>50°C/min	Volatiles (80-90%) Coke (10-20%)

3e étape : oxydation des gaz de pyrolyse pour générer une chaleur suffisante à la gazéification

La pyrolyse est suivie par les réactions solide-gaz entre le produit de carbonisation, l'oxygène résiduel et la vapeur d'eau admis dans le gazéificateur ainsi que les gaz et les vapeurs dégagés lors de la pyrolyse. [16]

Cette étape se déroule **en présence d'oxygène** à des températures comprises entre **1 200°C** et **1500°C** [18]

Elle consiste à brûler une partie des gaz de pyrolyse de façon à fournir :

- La chaleur nécessaire aux trois autres phases.
- Des produits de réaction, type CO_2 et $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$, qui vont réagir ensuite avec le coke lors de la phase de réduction.

Le choix de l'oxydant est fondamental pour la conception du gazéificateur et dépend de l'utilisation finale du gaz. C'est essentiellement lui qui fixe le pouvoir calorifique du gaz final à la sortie du gazéificateur.

Les principaux types d'oxydants sont décrits dans le **tableau n°05**

Tableau 5. Les principaux types d'oxydant [19]

Oxydant	PCI _{syngaz}	Commentaires
Air	$\cong 4 \text{ à } 6 \text{ MJ.Nm}^{-3}$	Procédé autothermique
Vapeur d'eau	$\cong 12 \text{ à } 18 \text{ MJ.Nm}^{-3}$	Procédé globalement endothermique
O ₂ pur	$12 \text{ à } 18 \text{ MJ.Nm}^{-3}$	Procédé autothermique mais coût de production de l'oxygène prohibitif pour une utilisation commerciale
H ₂	40 MJ.Nm^{-3}	Procédé globalement très endothermique

Chapitre 2 Gazéification de la biomasse

De par sa simplicité d'utilisation, l'air est de très loin le plus employé en pratique, notamment dans le cas des gazéificateurs à lit fixe. La vapeur d'eau est parfois employée comme additif pour améliorer le PCI du syngaz, mais est peu utilisée comme unique oxydant dans les installations de faible puissance. [19]

4e étape : la réduction ou « gazéification » du carbone pour produire le syngas

Cette étape se déroule à des températures comprises entre **800 °C** et **1200° C**. En l'absence d'oxygène, le coke obtenu lors de la phase de pyrolyse réduit la vapeur d'eau et le gaz carbonique obtenus dans l'étape précédente respectivement en hydrogène et en oxyde de carbone pour former du syngas, combustible mélangeant en proportions variables CO et H₂. [18] ; On l'absence d'oxygène seulement deux réactions hétérogènes endothermiques sont présent en compte :



Ces deux réactions, notamment celle de la gazéification à la vapeur d'eau sont prépondérantes pour la production du gaz combustible et méritent une attention particulière. [19]

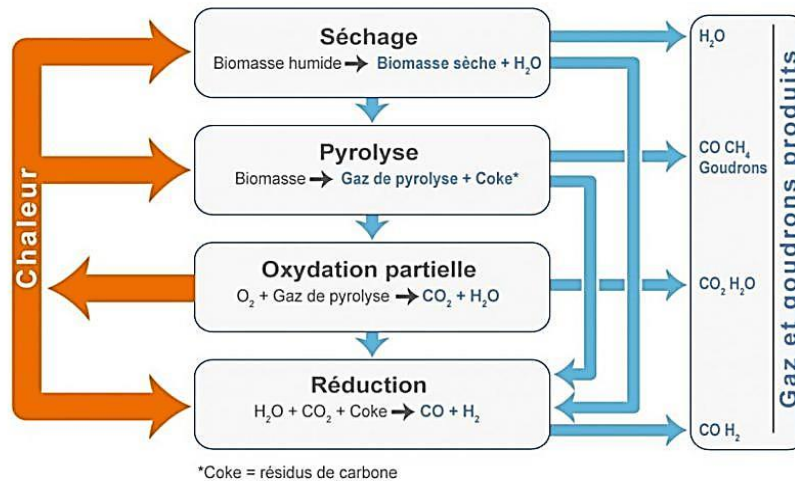


Figure 7. Les étapes de la gazéification [18]

VI. Propriétés de la biomasse affectant la gazéification

Les propriétés primaire de la biomasse affectant la gazéification de la biomasse comprennent le type, la taille et la forme des particules, la densité, l'angle de repos et de fluidité, les analyses immédiates et ultimes, ainsi que le contenu énergétique.

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

VI.1. Le type, la taille et forme des particules

Les propriétés physiques et chimiques de la biomasse varient selon le type de biomasse comme le bois, les résidus de culture et les herbes. La littérature montre les effets de gazéification de plusieurs types de biomasse, comme le bois, coque d'arachide, paille de blé, la balle de riz, la sciure de bois, des coquilles d'amandes, et le panic raide, sur le rendement de gazéification.

La taille des particules des matières de la biomasse joue un rôle essentiel dans le processus de gazéification. Une particule inférieure fournit une plus grande surface de transfert de chaleur et de masse, ce qui conduit à une libération plus rapide des matières volatiles provenant de la biomasse. La forme des particules est décrite en utilisant la sphéricité, qui est le rapport de la surface d'une particule sphérique de la surface d'une particule donnée avec le même volume. Une particule de biomasse à faible sphéricité a un rapport surface sur volume élevé qui offre un meilleur transfert de chaleur et de masse qu'une particule avec une sphéricité élevée.

VI.2. Densité

La matière première de biomasse est caractérisée en utilisant deux densités: densité des particules (densité réelle) et la densité apparente.

La densité réelle des particules est le rapport de la masse des particules sur le volume de la particule, sans tenir compte du volume poreux interne au sein de la particule.

La densité apparente des particules est le rapport de la masse des particules sur le volume des particules dont le volume poreux interne à l'intérieur de la particule, à l'exclusion du volume des vides entre les particules.

Une densité apparente élevée offre une meilleure aptitude à l'écoulement de la biomasse afin de faciliter l'écoulement de la biomasse à travers la trémie, dispositif d'alimentation, et le réacteur de gazéification. Au contraire, la forte densité apparente présente une faible porosité interne, ce qui limite les interactions gaz-solide au cours de la gazéification. La densité apparente est le rapport de la masse de la biomasse et le volume total de la biomasse, y compris les espaces vides à l'intérieur et entre les particules de biomasse.

La densité apparente de la biomasse est influencée par la taille, la forme et le type de la biomasse.

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

VI.3. Fluidité

La fluidité est la capacité de la biomasse à l'écoulement, elle dépend de la taille, la forme, la densité, et l'angle de repos de la biomasse. [20]

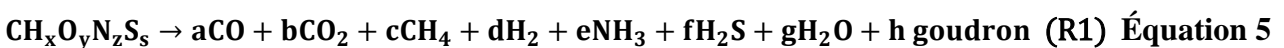
VII. Gazéification de la biomasse

Lorsque la biomasse est gazéifiée, le gaz de gazogène est dénommé biogaz. L'objectif de la gazéification de la biomasse est de concentrer la teneur en énergie de la biomasse et la convertir en une substance énergétique utilisable dans une grande variété d'applications. Etant donné que la charge est le plus souvent basée sur les matières premières agricoles, la gazéification peut être considérée comme une **technologie d'énergie renouvelable**.

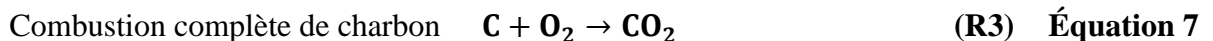
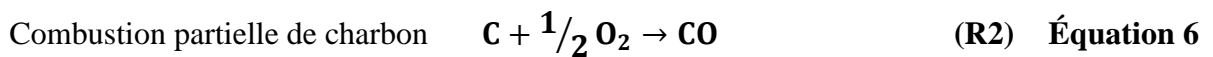
Les gazéificateurs de biomasse ont le potentiel pour être jusqu'à deux fois plus efficace que les chaudières classiques pour produire de l'électricité et peuvent utiliser environ 1500 tonnes de biomasse par jour pour générer jusqu'à 120 mégawatts d'électricité, assez pour environ 120.000 ménages. Parce que c'est une technologie propre qui utilise les cultures agricoles renouvelables ou les déchets de fabrication comme source d'énergie, la gazéification est donc idéal pour un usage communautaire et un développement économique rural. [21]

VII.1. Réactions importantes impliquées dans un procédé de gazéification [20]

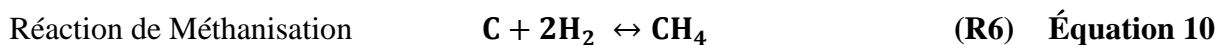
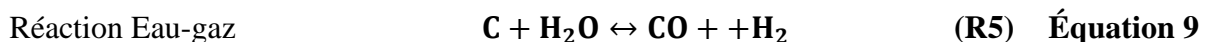
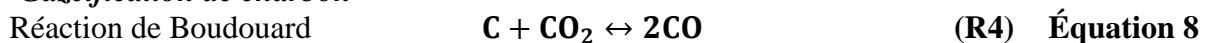
- *Décomposition de la biomasse*



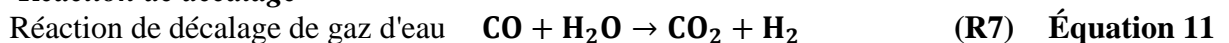
- *Combustion de charbon*



- *Gazéification de charbon*



- *Réaction de décalage*



Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

- **Réaction de Réformation**
Reformation de Méthane $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$ (R8) **Équation 12**
- **Oxydation volatile**
Oxydation du CO $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (R9) **Équation 13**
Oxydation du H₂ $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (R10) **Équation 14**
Oxydation du CH₄ $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (R11) **Équation 15**

VIII. Les différents procédés de gazéification

Différentes technologies de gazéification ont été développées dans les deux derniers des décennies et sont maintenant disponibles dans le commerce, le choix d'un type de procédé est guidé par la taille de l'installation, le solide combustible carboné utilisé, l'usage du gaz produit et le coût d'investissement.

Plusieurs types de gazéificateur existent, leurs classification diffère selon le critère de classement utilisé, tel que le mode d'approvisionnement de la chaleur, la gamme de température de fonctionnement, l'agent de gazéification utilisé,...etc. les deux critères majeurs les plus fréquents de classement sont : la conception du réacteur et l'agent de gazéification.

VIII.1. Classification selon la conception du réacteur

Selon la conception du gazéificateur il existe trois types de gazéificateur, qui, en plus de la conception, diffèrent selon le taux de goudron généré.

VIII.1.1. Procédés à lit fixe

La conception de gazéification la plus réussie à ce jour sont les gazéificateurs à lit fixe, ils sont en général de construction simple et robuste. Le nom peut être un peu trompeur ; car ce qui est effectivement "fixe" c'est la hauteur du lit et non pas la position d'une particule de charge individuelle. Le combustible biomasse forme un lit dense au sein du réacteur et se déplace verticalement.

Différentes conceptions de réacteurs en lit fixe existent, on distingue ainsi deux procédés

- à co-courant (**down draft**) ou la biomasse et l'air sont tous deux introduits en partie haute du réacteur, La teneur en goudrons du gaz produit est beaucoup plus faible que dans le cas d'un procédé à contre-courant

Chapitre 2 Gazéification de la biomasse

- à contre-courant (**up draft**) ou la matière organique est d'abord introduite à son sommet. De l'air est injecté à mi-hauteur pour amorcer la combustion et fournir de la chaleur à l'ensemble du réacteur. [16]
- à courant croisé (**Cross draft**) l'air pénètre à travers une buse et le flux de gaz est normal à l'axe du lit de combustible. Ces gazéificateurs ont une construction simple mais une faible teneur en goudron et une grande capacité de conversion et leur application est limitée la plupart du temps et jusqu'à présent à petite échelle tel la gazéification de charbon de bois pour produire de l'énergie. [22]

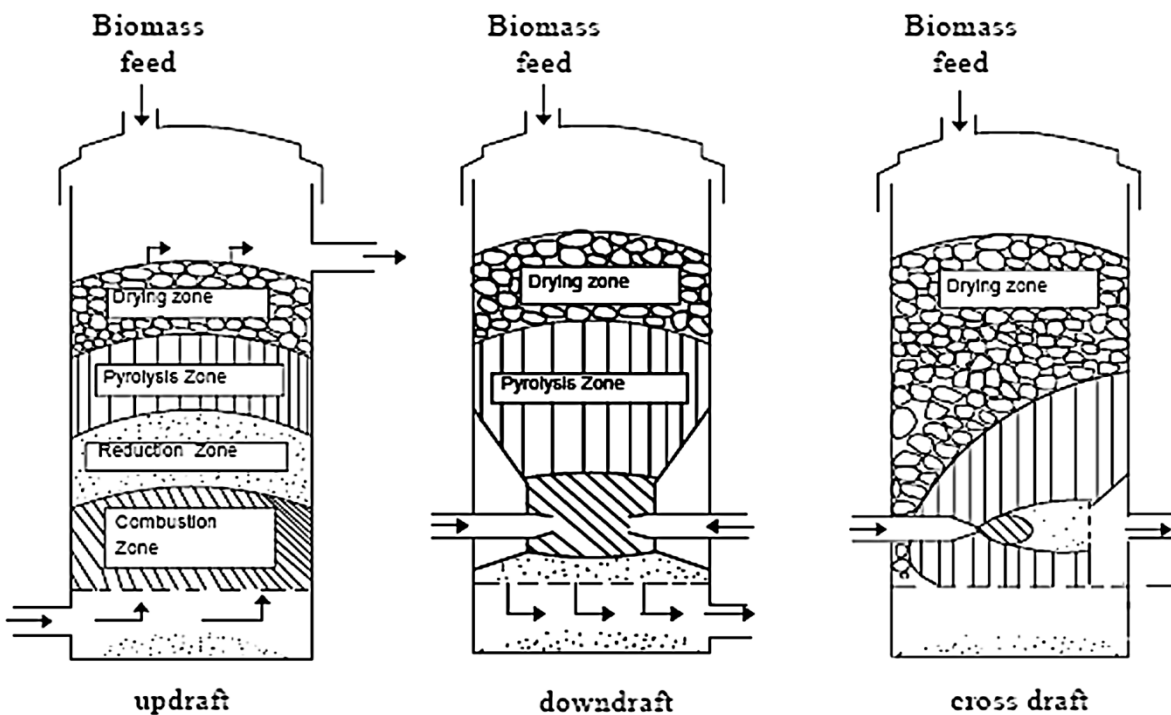


Figure 8. Les différents types de gazéificateurs à lit fixe [22]

Tableau 6. Caractéristiques des gazéificateurs à lit fixe [23]

Carburant (bois)	Up draft	Dawn draft	Cross draft
Humidité sur poids brut (%)	60 max	25 max	10-20
Cendre sur poids sec (%)	25 max	6 max	0.5 – 1.0
Température de fusion des cendres (°C)	>1000	>1250	
Taille (mm)	5-100	20-100	5-20
Domaine d'application (MW)	2-30	1-2	
Température du gaz sorti (°C)	200-400	700	1250
Goudron (g/Nm ³)	30-150	0.015-3.0	0.01-0.1
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/Nm ³)	5-6	4.5-5.0	4.0-4.5
L'efficacité de gaz chaud(%)	90-95	85-90	75-90

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

VIII.1.2. Les procédés à lit fluidisé

Dans les gazéificateurs à lit fluidisé, un mélange vapeur d'eau et d'oxygène (ou air) est coupée en deux jets. La majeure partie du gaz est alimentée sous la grille. Ce gaz fluidisent et réagissent avec le lit plein. Le mélange / oxygène de vapeur (ou air) non seulement fluidifie les particules de substrat, mais aussi réagit avec le substrat en même temps. La fluidisation du lit permet un excellent mélange et mise en contact des gaz réagissant avec les particules solide. Le mélange contribue également à maintenir la température du lit uniforme. [24]

Cependant, le gaz produit est fortement chargé en particules, exigeant la mise en œuvre de traitements avant sa valorisation. On distingue deux types de procédés à lit fluidisé :

➤ *Les procédés à lit fluidisé dense ou "Bubbling Fluidized Bed"*

Fonctionne aux températures en-dessous de **900°C** pour éviter la cendre fondante et agglomérante qui peut entraîner une détérioration de la qualité de fluidification et dans certains cas de défluidisation du lit [25]. La vitesse de fluidisation est relativement faible (**1-2 m.s⁻¹**), pour permettre le brassage des particules sans les entraîner hors du lit. Ce procédé n'est pas très souple d'exploitation, en particulier au niveau du contrôle du niveau du lit lors des variations de charge. De plus, son fonctionnement est optimal si les particules sont de taille calibrée.

➤ *Les procédés à lit fluidisé circulant ou "Circulating Fluidized Bed"*

La vitesse de fluidisation est plus élevée (**4-6 m.s⁻¹**), si bien qu'une partie des particules du lit est entraînée hors du réacteur. Un cyclone permet de séparer la phase solide, pour la faire ensuite recirculer dans le lit. La phase solide est donc continuellement en mouvement dans le réacteur.

Comparé au procédé à lit fluidisé dense, le procédé à lit fluidisé circulant dispose d'une plus grande tolérance vis-à-vis du combustible. La plupart des procédés développés actuellement à l'état de démonstration sont basés sur le principe du lit fluidisé circulant.

Chapitre 2 Gazéification de la biomasse

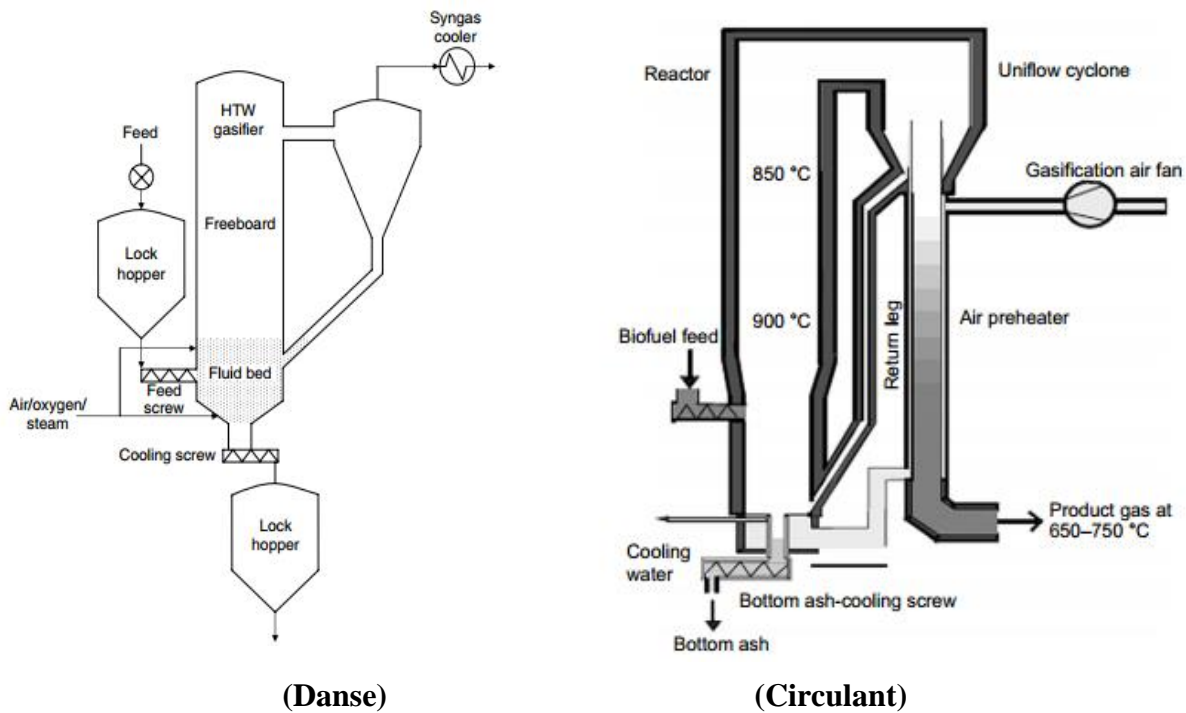


Figure 9. Schéma de principe de réacteurs de gazéification à lit fluidisé [23]

VIII.1.3. Les procédés à lit entraîné

Les gazéificateurs à flux entraîné fonctionnent en entraînant les particules solides dans un courant de vapeur, de l'oxygène, ou les deux. La réussite de l'opération nécessite une tailles de particules très fines, typiquement de l'ordre de **75 mm** les gazéificateurs à lit produisent moins de méthane que les autres unités (un avantage si l'intention est de produire du gaz de synthèse pour fabriquer de l'hydrogène ou des combustibles liquides); et ils produisent le plus bas ratio de $\text{H}_2:\text{CO}$, ce qui implique la nécessité d'une plus grande quantité de conversion de gaz en aval si le méthane ou l'hydrogène est le produit désiré de l'usine. [24]

Cependant, le temps de séjour du solide dans le réacteur est très faible et ne permet pas la conversion totale du solide. Par ailleurs, la faible granulométrie du combustible implique des coûts de préparation importants et la complexité de la technologie la rend coûteuse et difficile à mettre en œuvre. [19]

Chapitre 2 Gazéification de la biomasse

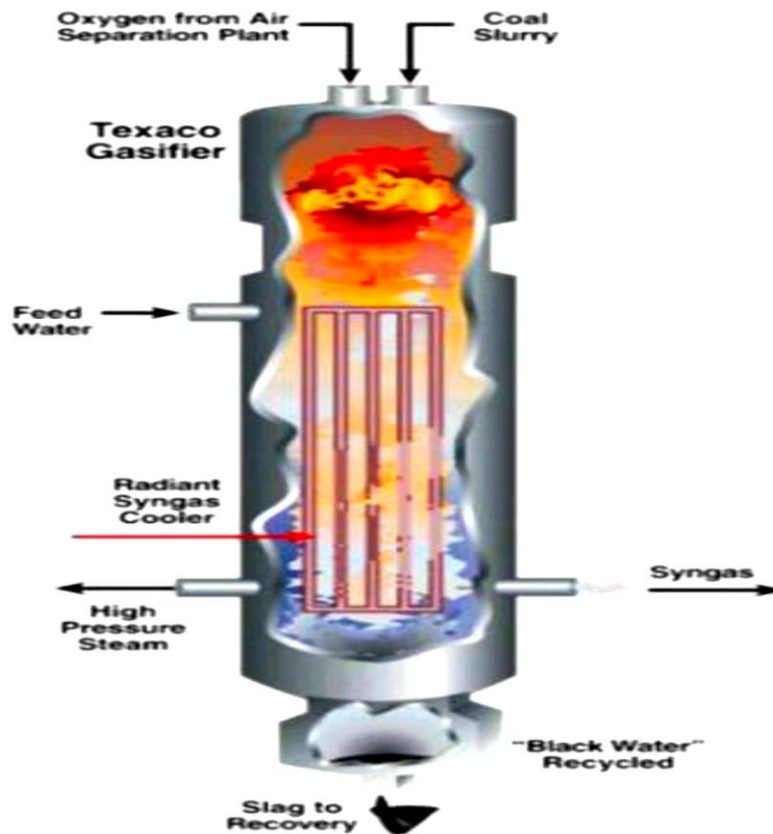


Figure 10. Réacteur à flux entraînée [26]

Tableau 7. Les avantages et les inconvénients entre les deux types de procédés [9]

Type du procédé	Avantages	Inconvénients
Lit fixe co-courant	<ul style="list-style-type: none"> • Simple de conception et éprouvé pour certains combustibles • Simple de construction • Taux de conversion élevé • Gaz relativement propre si combustible approprié 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustible homogène et de taille significative • Taille des installations très limitée (350 kW_e) • Possibilité de fusion des cendres dans la grille du réacteur avec blocage • Faible humidité des combustibles nécessaires
Lit fixe contre-courant	<ul style="list-style-type: none"> • Construction simple et robuste • Pas de limite de taille • Rendement thermique élevé • Plus grande souplesse vis à vis de l'humidité de la matière première 	<ul style="list-style-type: none"> • Température des gaz faible en sortie avec risque de condensation • Gaz très chargé en goudrons • Inadapté à la production d'électricité

Chapitre 2 Gazéification de la biomasse

<p style="text-align: center;">Lit fluidisé dense</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bon contrôle de températures • Vitesses de réaction élevées • Bon contact solide/gaz • Construction relativement simple et opérationnelle • Pas de limite de taille • Traitement catalytique possible dans le lit • Pourcentage de goudron modéré 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille minimale pour être économiquement viable (20 MW_{élec}) • Pourcentage des particules élevé dans les gaz • Pertes de carbone avec les cendres car entraînement limitant les rendements • Adapté aux particules de faible taille pour bénéfice optimal des propriétés • Humidité faible < 20 % • Sensible à la répartition granulométrique
<p style="text-align: center;">Lit fluidisé circulant</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bon contrôle de la température et de la vitesse de réaction • Grande tolérance par rapport au combustible (type, taille) • Pourcentage des goudrons dans les gaz modéré • Construction relativement simple et opérationnelle • Taux de conversion élevé • Gaz propre par rapport aux goudrons 	<ul style="list-style-type: none"> • Pourcentage des particules dans les gaz élevé • Humidité faible < 20 % • Taille minimale pour économiquement viable (20 MW_{élec})

IX. Les principales variables opératoire de gazéification

Les variables d'exploitation jouent un rôle clé dans le processus et affectent la composition, la valeur de chauffage et le rendement de gaz de synthèse, ainsi que l'efficacité de conversion. Ces variables d'exploitation doivent être optimisées pour obtenir un rendement élevé de gazéification

IX.1. La température

La performance du gazéificateur est fortement influencée par la température de gazéification. Une haute température conduit à un rendement plus élevé de gaz, une moindre teneur en goudron, et une haute conversion de carbone.

Une température élevée favorise également les réactions endothermiques **R (4)** et **R (5)** et augmente les concentrations de CO et de H₂. La littérature montre que l'augmentation de la température de **700 °C à 900 °C** augmente les concentrations en H₂ et CO et CH₄ et réduit la concentration de CO₂. [20]

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

IX.2. La pression

Un gazéificateur fonctionnant à une pression élevée affecte directement les pressions partielles des espèces participant dans le réacteur et par conséquent influence sur la composition du gaz. Une basse pression de gazéification résulte en une haute concentration de CO et H₂ et une faible concentration CO₂ et CH₄ [4]. La pression de fonctionnement a d'autant plus d'influence sur un gazéificateur à lit fluidisé du fait qu'une pression appropriée du milieu de fluidisation est nécessaire pour maintenir la fluidisation de la matière du lit et créer un gradient de pression à travers le réacteur à lit fluidisé. Cependant, un fonctionnement à haute pression peut également provoquer le reflux de gaz à partir du réacteur à lit fluidisé dans l'unité d'alimentation en biomasse.

IX.3. Les agents de gazéification

La composition du gaz et de la valeur de chauffage, la teneur en goudron du gaz, et le rendement de conversion gazéificateur varient avec le changement de l'agent de gazéification. Un agent de gazéification permet de décomposer les molécules plus lourdes de la biomasse en molécules plus légères et fournit de la chaleur nécessaire (par réactions exothermiques) pour les réactions endothermiques. L'Air, la vapeur et l'oxygène sont les différents agents classiquement utilisés pour la gazéification de biomasse.

L'utilisation de **l'air** comme agent de gazéification a été très commun parce que l'air n'a pas besoin de prétraitement; il est disponible gratuitement, et les réactions d'oxydation avec l'air fournissent de la chaleur pour d'autres réactions endothermiques. Cependant le gaz de synthèse produit a une faible valeur calorifique.

L'utilisation de **vapeur d'eau**, comme un agent de gazéification, produit un gaz de synthèse à forte concentration de H₂ et H₂. Cela rend gaz de synthèse plus approprié pour les conversions en carburants et produits chimiques.

L'utilisation de **l'oxygène**, comme un agent de gazéification, se traduit par un gaz de synthèse à forte concentrations de CO et H₂. Cependant, elle nécessite des installations de production d'oxygène, ce qui peut rendre l'opération rentable à grande échelle et ajouter une pénalité énergétique [20]

IX.4 Alimentation et conditionnement de la biomasse

Les spécifications critiques des produits à gazéifier concernent principalement la taille des particules introduites dans le réacteur, et leur humidité.

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

IX.4.1 Taille des particules

Généralement, les réacteurs fonctionnent avec des particules dont la taille est comprise entre **10** et **100 mm**, permettant le passage des gaz chauds sans générer de pertes de charges trop importantes.

Selon la nature de la biomasse, celle-ci doit donc être soit broyée, soit compactée (sciure...). Le fractionnement de la biomasse permettrait également de réduire la teneur en azote et produits alcalins (sodium, potassium...).

Plusieurs procédés sont en principe moins sensibles au paramètre granulométrique : réacteurs à lit fluidisé, procédés à étage de pyrolyse séparé...etc.

IX.4.2 Séchage

L'humidité du substrat est un point important à contrôler. Le niveau requis dépend du type de technologie :

La gazéification nécessite une humidité inférieure à **10-15 %**. La biomasse fraîche contient entre **50** et **60 %** d'humidité, et lorsqu'elle est séchée à l'air libre, elle descend généralement à environ **20 %** lorsque la durée est suffisante.

Certaines technologies de gazéification permettent une alimentation directe par de la biomasse humide :

- **40 à 50 %** avec les réacteurs à contre-courant ;
- **15 à 20 %** avec les réacteurs à co-courant ;
- **60 %** pour les lits fluidisés à circulation interne. [27]

X. Les produits de la gazéification

Les produits de la gazéification de la biomasse comprennent des **gaz de synthèse** (le produit gazeux également appelé gaz de production), du **goudron** (produit liquide accompagné avec le gaz de synthèse), et le **charbon** et les **cendres** (produits solides). Les propriétés de ces produits dépendent fortement des paramètres de fonctionnement et de gazéification de la biomasse.

Typiquement, le gaz de synthèse est le principal produit de la biomasse contenant la plus grande quantité d'énergie. Le goudron est considéré comme un contaminant qui doit être éliminé du gaz de synthèse. Le charbon et les cendres sont considérés comme des sous-produits, qui contiennent des minéraux et peuvent être utilisées comme amendement du sol.

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

Le gaz de synthèse est principalement composé de **CO**, **H₂**, **CH₄**, **CO₂**, et **N₂** (si de l'air est utilisé comme agent de gazéification). Des hydrocarbures tels que **C₂H₂**, **C₂H₄** et **C₂H₆** sont également présents dans le gaz de synthèse à faible concentration (inférieure à **5% v/v**). Les études de la gazéification se concentrent principalement sur l'augmentation des concentrations de **CO** et **H₂** dans le gaz de synthèse parce que le **CO** et **H₂** détiennent environ **75% à 95%** de l'énergie du gaz et sont les blocs de construction pour la production de nombreux combustibles liquides et produits chimiques.

Le pouvoir calorifique du gaz de synthèse est déterminé à l'aide de la composition du gaz. Le pouvoir calorifique du gaz de synthèse issus de la biomasse à l'aide de vapeur d'eau et l'oxygène comme agents de gazéification varie entre **12 et 18 MJ/Nm³**, en utilisant l'air comme un agent de gazéification il varie entre **4 et 6 MJ/N m³**.

Le gaz de synthèse contient également des impuretés inévitables, telles que les goudrons, les particules, les composés alcalins, **NH₃** et **H₂S** qui nécessitent une grande étape de nettoyage des gaz. Les goudrons, l'impureté de gaz le plus répandu, sont des composés organiques qui sont plus lourds que le benzène, se condensent à la température ambiante, et peuvent causer des bouchons dans les tuyaux et l'encrassement de l'équipement. Les particules, un mélange de charbon et de cendres, se mélangent avec le goudron et sabots pipelines, ce qui intensifie les problèmes de maintenance. Des composés alcalins, tels que **CaO**, **K₂O**, **P₂O₅** et **SiO₂**, présents dans le gaz de synthèse se condensent à une température inférieure à **650°C** et provoquent une corrosion de surface dans les unités de traitement en aval. [20]

XI. Les applications de gazéification

Un grand nombre de produits peuvent être gazéifiés, la liste ci-dessous énumère les matières qui ont fait l'objet de travaux :

Les sous-produits des industries de transformation du bois :

- plaquettes forestières
- bois de rebut
- déchets de bois des industries de seconde transformation
- sciures
- bois contaminés
- écorces

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

Les sous-produits agricoles ou agro-industriels :

- paille de riz
- paille de blé
- rafles de maïs
- coquilles de noix
- déchets de coton
- fientes de volailles

Les déchets d'origine municipale ou industrielle

- déchets municipaux solides
- fraction combustible des déchets municipaux solides (RDF : Refuse Derived Fuel)
- boues de stations d'épuration
- déchets hospitaliers
- pneumatiques usagés
- déchets d'entretien des espaces verts

Diverses ressources énergétiques

- goudrons lourds des raffineries de pétrole
- charbon
- gaz naturel
- tourbe,... etc. [27]

XII. Composition du gaz de synthèse :

Une composition moyenne des gaz produits est fournie ci-après pour les procédés les plus courants en utilisant l'air comme agent de gazéification.

Tableau 8. Composition moyenne du gaz en fonction du type de procédé [28]

Gazéification à l'air		Lit Fixe co-courant	Lit fixe contre-courant	Lit fluidisé circulant
Humidité biomasse	% m	6-20	n.d	13-20
Particules	mg/Nm ³	100-8000	100-300	8000-100000
Goudrons	mg/Nm ³	10-6000	10000 - 150000	2 000 - 30 000
PCI du gaz	MJ/Nm ³	4,0 - 5,6	3,7 - 5,1	3,6 - 5,9
H₂	% vol	15 - 21	10 - 14	15 - 22
CO	% vol	10 - 22	15 - 20	13 - 15
CO₂	% vol	11 - 13	8 - 10	13 - 15
CH₄	% vol	1- 5	2 - 3	2 - 4
C_n H_m	% vol	0,5 - 2	n.d	0,1 - 1,2
N₂	% vol	différence	Différence	différence

Chapitre 2 Gazéification de la biomasse

a. Les composants valorisables

Les gaz valorisables majoritaires présents dans le syngas sont le Monoxyde de carbone (CO), le Dihydrogène (H₂) et le Méthane (CH₄).

La richesse du syngas sera fonction de la composition en composants valorisables. Cette richesse est dépendante essentiellement de la charge combustible et de la technologie de gazéification, dont en particulier l'agent de gazéification [17]

b. Les composants à abattre

Parmi les composés issus des réactions de gazéification, le goudron, particules fines, des polluants tels que les SO_x, etc., sont des contraintes qui spécifiques présentent des défis majeurs pour la suite du processus après la gazéification de matériaux hydrocarbonés. Ces sous-produits provoquent généralement l'érosion et la corrosion des métaux.

Le gaz de synthèse doit subir une purification avant son introduction en moteurs ou turbines à gaz, que ce soit au niveau de l'abattage des poussières, des polluants gazeux acides, des alcalins et métaux lourds

Les types de contaminants et les problèmes dus aux installations en aval sont résumés dans le **tableau 9**.

Tableau 9 contaminants et les problèmes pour le processus de gazéification [29]

Contaminants indésirable	Présence	Problèmes
Goudron	Un mélange complexe d'hydrocarbures condensables	La formation du goudron cause de principaux problèmes opérationnel et d'entretien dans le processus, de la corrosion dans les lignes de branchement du carburant, dans les filtres, les becs de moteur et les turbines descendant
Particules	Produites à partir des cendres et des matériaux de lit omble si il est utilisé pour le réacteur à lit fluidisé	Provoquent le blocage des équipements en aval, telles que le dépôt sur les anodes de les piles à combustible à oxyde solide ce qui entraîne le blocage des chemins de diffusion de gaz
H ₂ S, SO _x et HCl	Dérivée des échantillons bruts originaux	Provoque la corrosion des équipements
Les métaux alcalins		Pose des problèmes tels que l'encrassement, scorification et la corrosion des composants dans les systèmes ultérieurs

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

XIII. Les facteurs influençant sur la qualité du gaz de synthèse

Il existe plusieurs facteurs qui influencent sur la qualité du gaz de synthèse on cite :

- La composition de matières premières
- La préparation et la taille des particules de matières premières
- Le taux de chauffage du réacteur
- Le temps de séjour
- Configuration de l'installation, tels que:
 - Système d'alimentation
 - Géométrie de flux matières premières-réactif
 - Système d'extraction de minéraux - cendres sèches ou scories
 - La production de chaleur et de la méthode de transfert
 - Système de nettoyage du gaz de. [21]

XIV. Technique de purification du gaz de synthèse

Le nettoyage de gaz de synthèse a deux aspects: l'élimination des impuretés indésirables et Conditionnement du gaz à fin d'obtenir un bon rapport de H₂ et de CO selon l'usage prévu.

Plusieurs techniques de nettoyage existent, le choix dépend de la nature du composant indésirable ainsi que l'usage final du gaz issu.

Parmi ces différentes techniques on cite :

XIV.1. Elimination des particules

La première étape de nettoyage des gaz issus des réacteurs de gazéification consiste à séparer les particules solides du gaz chaud.

Un traitement du gaz à l'aide de cyclones ou de filtres électrostatiques est souvent mis en œuvre. La filtration des particules (aérosols ou suie entre 0,5 µm et 100 µm) sur filtres poreux métalliques ou céramiques (en silice ou en alumine) peut être réalisée par filtration à chaud (**HGC**, Hot Gas Cleaning) par passage du gaz sur un ensemble de bougies céramiques, couplé à un lit fixe d'adsorbants minéraux, en particulier pour les composés soufrés et chlorés. [17]

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

XIV.2. Elimination des goudrons

La concentration en goudron est fortement variable en fonction du procédé retenu, de la matière première, de la disposition des entrées de l'agent gazéifiant, des valeurs allant de **10 mg/Nm³ à 150mg/Nm³** sont généralement admises. [28]

Le goudron est le plus indésirable des impuretés. Les trois options principales pour l'enlever sont :

- Lavage avec un liquide organique (par exemple, ester de méthyle)
- Le craquage catalytique de catalyseurs à base de nickel ou de sable d'olivine
- Le craquage à haute température [23]

XIV.3. Abattage/neutralisation des fumées

Différents procédés d'abattage sont actuellement disponibles

a. Epuration par voie sèche et réactif alcalin :

L'épuration des fumées par voie sèche consiste à injecter dans des fumées un réactif (chaud ou bicarbonate de soude), sous forme de solide pulvérulent sec, pour assurer la neutralisation des gaz acides (**SO₂, HCl, HF**).

b. Epuration par voie semi-humide

Le principe du procédé semi-humide consiste à neutraliser les gaz acides par injection de chaux, celle-ci étant, dans ce cas, préalablement mélangée à de l'eau, pour former un lait de chaux, à une concentration de **30-150g/l**, et pulvérisé dans un réacteur/contacteur.

Dans une première étape, l'eau est complètement évaporée, entraînant une diminution de la température des fumées jusqu'à **150 °C**, proche de l'optimum de réactivité de la chaux, ce contact gaz/liquide permettant la solubilisation de l'acide chlorhydrique et sa neutralisation par la chaux. La réaction de neutralisation se poursuit en contact gaz/solide.

Un dispositif de dépoussiérage aval permet la captation des poussières, des sels produits et du réactif en excès.

c. Épuration en voie humide

Le procédé s'apparente à un procédé de lavage de gaz, à l'eau additionnée d'un réactif basique (soude, chaux). Les gaz doivent d'abord être dépoussiérés à l'aide d'un électrofiltre ou d'un filtre à manche pour éviter les problèmes d'encrassement, suivi d'un refroidissement par quench à

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

l'eau, jusqu'à une température de **65 °C**, et d'un laveur vertical dans lequel est envoyée la solution de lavage, celle-ci étant recyclée en permanence.

Le procédé humide peut être couplé à un procédé semi-humide, placé en amont, afin de permettre le recyclage de l'effluent du procédé humide dans la tour d'atomisation du semi-humide, ce qui permet d'éviter tout rejet liquide au milieu naturel.

XIV 4. Techniques complémentaires en épuration des fumées

a. Procédés de traitement des composés organiques volatiles (COV)

Les **COV** résiduaux issus d'un procédé de traitement thermique de déchet sont, la plupart du temps, détruits à **700-800 °C**, par postcombustion, en incinération. Ils peuvent également faire l'objet d'une destruction par oxydation catalytique, à des températures comprises entre **200** et **400 °C**, en fonction des conditions opératoires et du catalyseur utilisé. Cette technique est utilisée en oxydation en voie humide. Ils peuvent, dans certains cas, être récupérés par adsorption sur charbon actif bénéficiant, en ça, d'un traitement de dé-Diox existant sur l'installation de traitement thermique

b. Procédés d'adsorption sur charbon actif et/ou sur coke de lignite

Les charbons actifs et/ou les cokes de lignite sont des médias solides poreux, à grande surface spécifique interne (**500-1 000 m²/g**). Ils peuvent être utilisés en traitement des fumées en aval d'une épuration classique (sec, semi-humide, humide). Leur fonction principale est de capter les composés organiques tels que dioxines/furannes et de finir la captation des métaux lourds, et plus particulièrement du mercure.

Les charbons peuvent être injectés en veine gazeuse, en amont du filtre à manches où ils sont récupérés, ou bien utilisés en lit fixe dans une plage de température d'environ **100-150°C**. La consommation spécifique en charbons actifs est de **1 à 2 kg/t** de déchets traités. [7]

Chapitre 2 Gazéification de la biomasse

XV. comparaison entre la gazéification et la combustion

Tableau 10 Tableau comparative entre le procédé de gazéification et la combustion [21]

Caractéristiques	Gazéification	Combustion
Objectif	Création de produits de valeur, produits utilisables à partir de déchets ou de matériau de valeur inférieure	Production de chaleur ou destruction des déchets
Type du processus	Conversion thermique et chimique sans oxygène ou avec des quantités limite	Combustion complète en utilisant un excès d'oxygène (air)
Composition du gaz brut (avant purification de gaz)	H₂, CO, H₂S, NH₃ et autres particules	CO₂, H₂O, SO₂, NO_x et autres particules
Purification du gaz	<ul style="list-style-type: none"> - La purification de gaz de synthèse à la pression atmosphérique à des pressions élevées dépend de la conception du gazéificateur - Le Gaz de synthèse traités est utilisés pour les produits chimiques, les carburants, ou la production d'électricité. - les espèces de soufre dans le carburant sont récupérées sous forme de soufre ou d'acide sulfurique. - Le gaz de synthèse propre se compose principalement de H₂ et CO. 	<ul style="list-style-type: none"> - Purification de la fumée à la pression atmosphérique - Fumées traitées sont rejetées dans l'atmosphère - Tout le soufre dans le carburant est converti en SO₂ qui doit être enlevé en utilisant des systèmes de nettoyage des gaz de combustion, générant des déchets qui doit être mis en décharge. - le gaz de fumée purifié se compose principalement de CO₂ et H₂O sous-produits solides / produits
Sous-produits solides / produits	Charbon ou scorie	Mâchefer
Cendres/ charbon ou traitement des scories	<ul style="list-style-type: none"> - Les procédés à basse température produisent un charbon qui peut être vendu comme carburant. - Les procédés à haute température produisent des scories, un matériau non lessivable, non dangereux appropriés pour une utilisation en tant que matériaux de construction. - Les particules fines sont recyclées dans le gazéificateur. Dans certains cas, les particules fines peuvent être traitées pour récupérer les métaux précieux. 	Mâchefers et de cendres volatiles sont collectés, traités et éliminés comme déchets dangereux dans la plupart des cas.
Température	704.4°C – 1482°C	815.6°C – 982.2°C
Pression	Atmosphérique à haute	Atmosphérique

Chapitre 2 **Gazéification de la biomasse**

XVI. Les différents modes de valorisation possibles du gaz de synthèse

La gazéification permet, par l'intermédiaire du gaz de synthèse produit, différentes voies dévalorisation chimique ou énergétique

- Production de chaleur dans une chaudière de postcombustion et d'électricité dans un groupe turboalternateur (gazéification intégrée ou procédé de 1ère génération)
- Production de gaz de synthèse en substitution de gaz naturel ou de gaz industriels, dans des installations de chauffe (sécheur, four de cuisson, ...),
- Production de gaz de synthèse épuré pour une cogénération en moteurs thermiques ou turbine à gaz, pour la production optimisée d'électricité (procédés de 2ème génération).

Dans ces deux derniers cas, le gaz de synthèse produit doit être refroidi et épuré en amont de son utilisation en alimentation de moteurs ou turbines à gaz, afin d'atteindre des caractéristiques compatibles avec les contraintes d'alimentation gaz des dispositifs à combustion interne.

Le mode de valorisation peut être le but ultime de la gazéification, comme la production de biocombustibles (liquides ou gazeux), dans ces cas précis c'est le produit de la valorisation qui influencera le choix technologique et de charge combustible.

Il est important de remarquer que dans tous ces modes de valorisation la pureté du gaz de synthèse est un paramètre majeur dans la qualité de sa valorisation. Les différents modes de valorisation rencontrent souvent les mêmes problèmes techniques comme, par exemple, l'élimination des goudrons dans les gaz. [17]

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 3

MATERIEL ET METHODES

Chapitre 3 Matériel et méthodes

I. Choix du processus de traitement thermique

Notre choix d'étude s'est porté sur le processus de la gazéification pour :

- ☞ Son efficacité et son temps de séjour très réduit (quelques heures),
- ☞ Il ne demande pas une grande installation est son mode de fonctionnement et plus ou moins facile,
- ☞ C'est une voie de traitement et de valorisation énergétique moins polluante que l'incinération mais trop peu connu dans notre pays,
- ☞ Obtention d'un gaz de grande valeur énergétique qui est le gaz de synthèse (**Syngas**).

II. Choix du substrat

Dans le cadre de notre étude sur la gazéification nous nous sommes intéressés plus spécifiquement à la biomasse ligno-cellulosique, Nous avons choisi de prendre comme référence la sciure de bois vue:

- sa disponibilité sur le territoire
 - Ses caractéristiques physico-chimiques qui en font un bon représentant de l'ensemble de la biomasse ligno-cellulosique
 - C'est un déchet organique abondent très peu réutilisable ;
 - Le bois est une biomasse combustible connu avec un pouvoir calorifique élevé ;
 - L'énergie produite par le bois est neutre du point de vue du carbone car le CO_2 émis lors de la combustion correspond à celui qui a été retiré de l'atmosphère par l'arbre au cours de sa croissance, donc il ne participe pas à l'augmentation anthropique de la teneur en CO_2 atmosphérique, [30]
 - La petite taille de la sciure de bois permet une meilleure combustion et donc un rendement plus élevé.
- 🌍 Le substrat utilisé provient d'une menuiserie locale à Adrar.

Chapitre 3 **Matériel et méthodes**



Figure 11. Sciure de bois

III. Caractérisation du substrat

Les propriétés les plus importantes de la biomasse primaire qui affectent la gazéification de la biomasse sont :

1. Le degré d'humidité ;
2. La teneur en cendres ;
3. La teneur en composés volatiles ;
4. Le carbone fixé ;
5. La composition élémentaire ;
6. Le pouvoir calorifique ;
7. La densité apparente [31].

III.1. Composition chimique du bois

Le bois est constitué de matières organiques, principalement sous forme de cellulose (environ **50%**), de lignine (**20 à 30%**) et de hémicellulose (**15 à 25%**) ainsi que d'éléments minéraux en très faible quantité (<1%) [32]; [33]; [34]

Globalement, Quatre éléments contribuent principalement à la composition chimique du bois: le carbone, l'oxygène, l'hydrogène, et l'azote, dans des proportions beaucoup plus faibles. La proportion de chaque élément varie légèrement selon l'essence du bois, en moyenne, le bois contient **50 %** de carbone, **43 %** d'oxygène, **6 %** d'hydrogène et un maximum de **1 %** d'azote. [35]

III.2. Granulométrie

Cette grandeur n'est utilisée que pour les combustibles divisés et ne s'applique pas au bois sous forme de bûches. Ainsi, la granulométrie offre une indication sur la taille des morceaux de

Chapitre 3 Matériel et méthodes

bois constituant l'assortiment de combustibles ; elle permet de sélectionner les technologies optimales d'alimentation et de combustion.

La granulométrie est caractérisée par trois grandeurs :

- Les cotes moyennes des morceaux de la fraction la plus importante ;
- Le pourcentage de fines (poussières et sciures) ;
- Le pourcentage et la longueur maximale de gros morceaux. [36]

La granulométrie type des principaux combustibles est donnée dans le **tableau11**

Tableau 11 exemple de granulométrie

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.	Classe	Cotes moyennes (mm)	Teneur en fines(%)	Gros morceaux < 1 %
Sciures	Très fin	2 x 1 x 1		10 mm maximum
Copeaux	Fin et enroulé	20x10x2		30mm maximum
Plaquettes fines	Fin et coupé	20x10x5	<5	40mm maximum
Plaquettes moyennes	Moyen coupé	40x10x10	<5	80mm maximum
Broyat et plaquettes grossières	Grossier éclaté	150x50x50	<5	200mm maximum

Dans notre cas, le substrat utilisé est **la sciure de bois**, donc ils sont classés comme éléments très fin dont les gros morceaux ne dépassent pas **10mm maximum**.

III.3. Humidité

L'humidité est un facteur déterminant dans l'utilisation du bois comme combustible. Elle influe sur la conservation du bois, sur sa masse volumique et sur son contenu énergétique.

Deux grandeurs sont usuelles pour indiquer le contenu en eau du bois.

- **L'humidité sur brut H_b** est définie comme le rapport entre la masse d'eau et la masse totale de bois humide :

$$H_b = 100 (M_h - M_0) / M_h \quad \text{Équation 16}$$

- **L'humidité sur sec H_s** désigne le rapport entre la masse d'eau et la masse de bois anhydre :

$$H_s = 100 (M_h - M_0) / M_0 \quad \text{Équation 17}$$

D'où :

M_h : la masse d'eau

M_0 : la masse totale de bois humide

Ces deux valeurs sont liées par la relation :

$$H_b = 100H_s / (100 + H_s) \quad \text{Équation 18}$$

Chapitre 3 Matériel et méthodes

Si, dans l'industrie du bois, il est usuel d'utiliser l'humidité sur sec comme référence, pour le bois « énergie », l'humidité prise en compte est l'**humidité sur brut**. [36]

☞ *Principe*

Le principe de cette méthode est basé sur la déshydratation de l'échantillon dans une étuve ventilée réglée à **105°C ± 1°C** jusqu'à masse constante.

La masse de l'échantillon est considérée comme constante lorsque la variation de masse entre deux pesées successives effectuées à une heure d'intervalle est inférieure à **1 gramme**

☞ *Mode opératoire (ASTM E871)*

Prendre un échantillon de **50 g** environ.

Peser à **0,5 g** un plateau vide, propre et sec

Remplir le plateau et étaler l'échantillon, peser l'ensemble à **0,5g**

Placer le plateau dans l'étuve à **103±2°C** pendant au moins 5 heures, effectuer une pesée. Replacer le plateau et l'échantillon pour une période d'une heure, puis peser de nouveau, recommencer l'opération jusqu'à ce que la différence de poids entre deux pesées successives soit inférieure à **1 g** ou arrêter l'opération au bout de **24 heures**. [37]



Figure 12. Prise de pesée et séchage de la sciure de bois

☞ *Expression des résultats*

Le pourcentage d'humidité est exprimé à l'aide de la formule

$$H(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Équation 19}$$

D'où :

m_1 : masse du plateau vide en grammes

Chapitre 3 **Matériel et méthodes**

m_2 : Masse du plateau et de l'échantillon avant séchage en grammes

m_3 : Masse du plateau et de l'échantillon après séchage en grammes

III.4. Teneur en cendres

☞ Définition

La cendre est le résidu inorganique laissé après que le carburant soit complètement brûlé. Ses ingrédients primaires sont la silice, l'aluminium, le fer, et le calcium; un peu de magnésium, de titane, de sodium et de potassium peuvent également être présents. La teneur en cendres est déterminée par le protocole **ASTM D-1102** [38] pour le bois et par le protocole **ASTM E-1755-01** [39] pour autre biomasse [23]. Théoriquement, le bois ne contient que **0,3% à 0,8%** de minéraux. [34]

☞ Principe

L'échantillon est incinéré à l'air, suivant un régime de chauffage spécifié, jusqu'à une température de **580-600 °C ± 10°C** et maintenu à cette température jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

Le pourcentage des cendres est calculé à partir de la masse du résidu après incinération.

☞ Appareillage

L'incinération est obtenue dans un four à moufle permettant d'obtenir des températures supérieures à **580°C**. L'échantillon est pesé avec une balance précise à **0.1mg** et placé dans une nacelle en silice, porcelaine ou platine.

Certains laboratoires réalisent une première incinération dans un creuset chauffé par un bec maker avant d'utiliser le four à moufle

☞ Mode opératoire (ASTM D1102)

L'échantillon séché [37] est d'abord broyé avec une granulométrie inférieure à **0.5mm** puis pesé une masse de **2 gr**.

L'échantillon est alors chauffé par paliers jusqu'à **580-600°C** pendant **4 heures** jusqu'à l'obtention de cendres sans présence de points noirs (imbrûlés).

Après refroidissement dans un dessiccateur, l'échantillon est de nouveau pesé.

Chapitre 3 Matériel et méthodes



Figure 13. Détermination du taux de cendre

☞ Expression des résultats

Le taux de cendres A, de l'échantillon analysé, exprimé en pourcentage en masse est donné par la formule :

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Équation 20}$$

m_1 est la masse de la nacelle en grammes

m_2 est la masse de la nacelle et de l'échantillon sec en grammes

m_3 est la masse de la nacelle et des cendres en grammes

Le résultat doit être exprimé à **0.1** points près.

III.5. Matière volatile

Les substances volatiles d'un carburant sont la vapeur condensable et non condensable libérée quand le carburant est chauffé. Sa quantité dépend du taux de chauffage et de la température auquel il est chauffé. Pour la détermination de la matière volatile, le carburant est chauffé à une température standard et à un taux forfaitaire dans un environnement commandé

La norme applicable d'**ASTM** pour la détermination de la matière volatile est **E-872** pour les carburants en bois.

☞ Mode opératoire (ASTM E872)

1 g est pris de l'échantillon séché [38] et rectifié à une taille ≤ 1 mm, est mis dans un creuset couvert afin d'éviter le contact avec de l'air pendant la volatilisation.

Chapitre 3 Matériel et méthodes

Le creuset couvert est placé dans un four à **950°C** et chauffé pendant **7min**. Après sept minutes, le creuset est sorti, refroidi dans un dessiccateur, puis pesé pour déterminer la perte de poids due à la volatilisation [40]

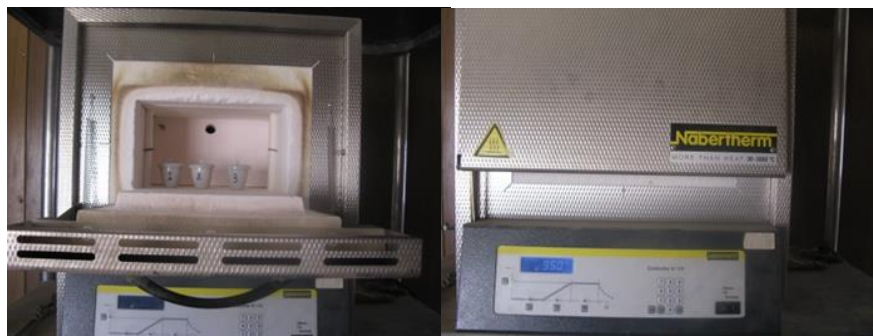


Figure 14. Détermination de la matière volatile

Expression des résultats

Le taux de cendres A, de l'échantillon analysé, exprimé en pourcentage en masse est donné par la formule :

$$MV(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Équation 21}$$

D'où :

m₁ : masse du creuset vide en grammes

m₂ : Masse du creuset et de l'échantillon avant chauffage en grammes

m₃ : Masse du creuset et de l'échantillon après chauffage en grammes

III.6. Carbone fixe

Pour l'analyse de gazéification, le Carbone fixe est un paramètre important parce que dans la plupart des gazéificateurs, la conversion du carbone fixe en gaz détermine le taux de gazéification ainsi que le rendement. Cette réaction de conversion, étant la plus lente, est employée pour déterminer la taille du gazéificateur.

Le carbone fixe (**FC**) dans un carburant est déterminé par l'équation suivante :

$$FC\% = 100 - (VM - ASH)\% \quad \text{Équation 22}$$

Où **VM**, et **ASH** représentent respectivement la matière volatile et les cendres [41]

Chapitre 3 Matériel et méthodes

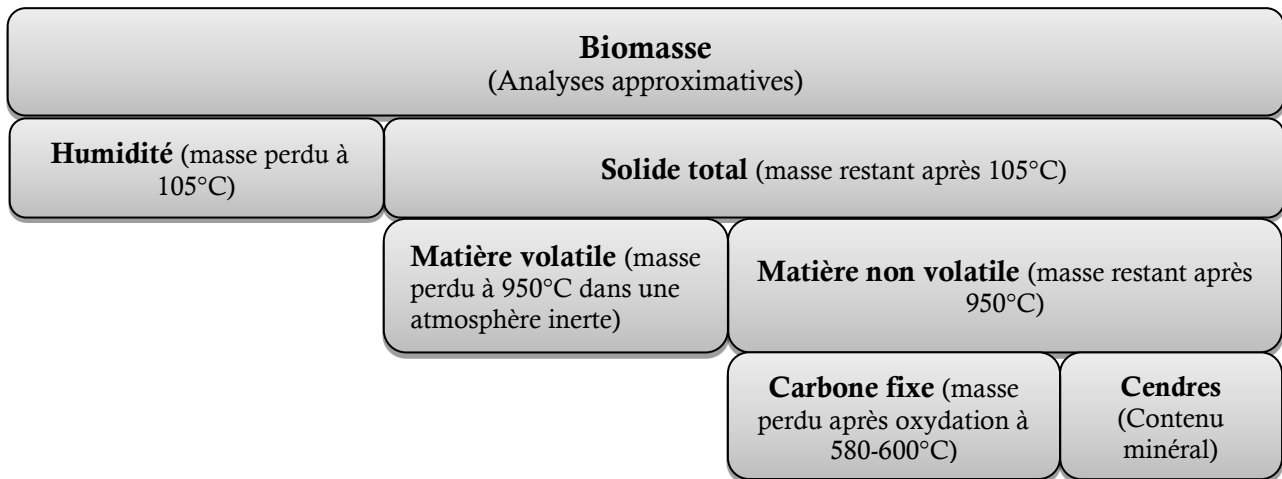


Figure 15. Procédures d'analyses approximatives de la biomasse

III.7. La densité ou la masse volumique

La « *densité* » du bois, que l'on devrait plutôt appeler *masse volumique*, est le rapport entre la masse du bois et son volume.

$$\rho = \frac{m}{V} [kg/m^3] \quad \text{Équation 23}$$

On distingue :

- ☞ La « *densité absolue* », peu utilisée, qui est la densité de la masse ligneuse anhydre (bois réduit en poudre et aggloméré), indépendante de l'essence,
- ☞ La densité du bois sec à l'air, que l'on appelle « *densité du bois* »,
- ☞ L'« *infradensité du bois* », rapport entre la masse et le volume saturé en eau ou « volume vert » de l'échantillon.

La densité est plus élevée dans les bois feuillus que dans les résineux. [35]

La masse volumique ρ du bois varie fortement en fonction des paramètres suivant :

- La teneur en eau w
- L'essence ;
- Et au sein d'une même essence, selon, les caractéristiques de croissance.

La masse volumique du bois doit donc être donnée avec sa référence de teneur en eau

La masse volumique à sec, ρ_0 , pour un bois desséché au four à $103^\circ\text{C}(w=0\%)$ est défini par :

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} [kg/m^3] \quad \text{Équation 24}$$

Chapitre 3 Matériel et méthodes

Avec :

m_0 : Masse à l'état anhydre (kg)

V_0 : Volume à l'état anhydre (m^3)

La masse volumique à l'état humide ρ_w pour un bois avec une teneur en eau w déterminée, est définie par :

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg/m^3] \quad \text{Équation 25}$$

Avec

m_w : Masse à l'état humide [kg]

V_w : Volume à l'état humide [m^3] [42]

III.8. Pouvoir calorifiques

☞ Définition :

Par définition, le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité de chaleur libérée par la combustion complète de ce combustible, le combustible et le comburant (en général l'air) étant pris à une température et une pression de référence, et les produits de la combustion ramenés à la même température.

La valeur du pouvoir calorifique est en général rapportée aux conditions normales, à savoir à **273 K** (soit **0°C**) et sous la pression atmosphérique, c'est-à-dire 1atm. (Soit **101325 Pa = 1,013 bar.**) [43].

On distingue le PCS (Pouvoir calorifique supérieur) et le PCI (Pouvoir calorifique Inférieur).

- PCS :

Il s'agit de l'énergie dégagée par la combustion du bois en récupérant la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion. Toutes les mesures existantes déterminent cette énergie.

Elle reste néanmoins une valeur théorique pour le bois énergie dans la mesure où il faudrait récupérer la chaleur latente de l'eau via la condensation de la vapeur d'eau des fumées.

- PCI :

Il s'agit de l'énergie dégagée par la combustion du bois sans récupérer la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion.

Les mesures existantes ne peuvent déterminer directement cette énergie : il faut la calculer à partir du PCS.

Chapitre 3 Matériel et méthodes

Cette énergie est l'énergie théoriquement récupérable par l'utilisateur (dans le cas d'une combustion parfaite). Il s'agit donc de la donnée la plus intéressante à utiliser dans le cas du bois énergie.

☞ Unités :

Le pouvoir calorifique donne une valeur d'énergie contenue dans une unité de masse du combustible. L'unité SI est le J/g, l'unité la plus généralement utilisée dans la littérature est le kcal/kg et pour le bois énergie le kWh/tonne.

Pour mémoire, les correspondances entre ces différentes unités sont :

Tableau 12. Les correspondances entre les différentes unités d'énergie. [44]

	J/g	Kcal/kg	KWh/tonne
J/g	1	0.24	0.278
Kcal/kg	4.18	1	1.161
kWh/tonne	3.6	0.86	1

Le pouvoir calorifique est donc une donnée intrinsèque du bois qui dépend de sa composition propre. Les valeurs rencontrées dans la littérature sont généralement données à l'état anhydre.

☞ Méthodes de mesure

Il existe deux méthodes de détermination du PCI : l'une par mesure directe réalisée dans une bombe calorimétrique en présence d'oxygène (cette méthode est décrite par la norme **NF M 03-005** « Détermination du pouvoir calorifique supérieur et calcul du pouvoir calorifique inférieur »), l'autre par détermination de l'humidité. [44]

☞ Détermination du PCI à partir de l'humidité

La valeur de l'énergie d'une unité de poids de biomasse est inversement proportionnelle à la quantité d'eau qu'il contient. Pour obtenir le poids réel de la biomasse, il est donc nécessaire de calculer la teneur en humidité. [45]

La formule de la variation du PCI en fonction du taux d'humidité est la suivante :

$$\text{PCI sur brut} = \text{PCI sur anhydre} \times (100 - E)/(100 - 6 E) \quad \text{Équation 26}$$

Chapitre 3 Matériel et méthodes

On obtient ainsi un graphique (**figure 16**) qui permet de déterminer le PCI (brute) [44].

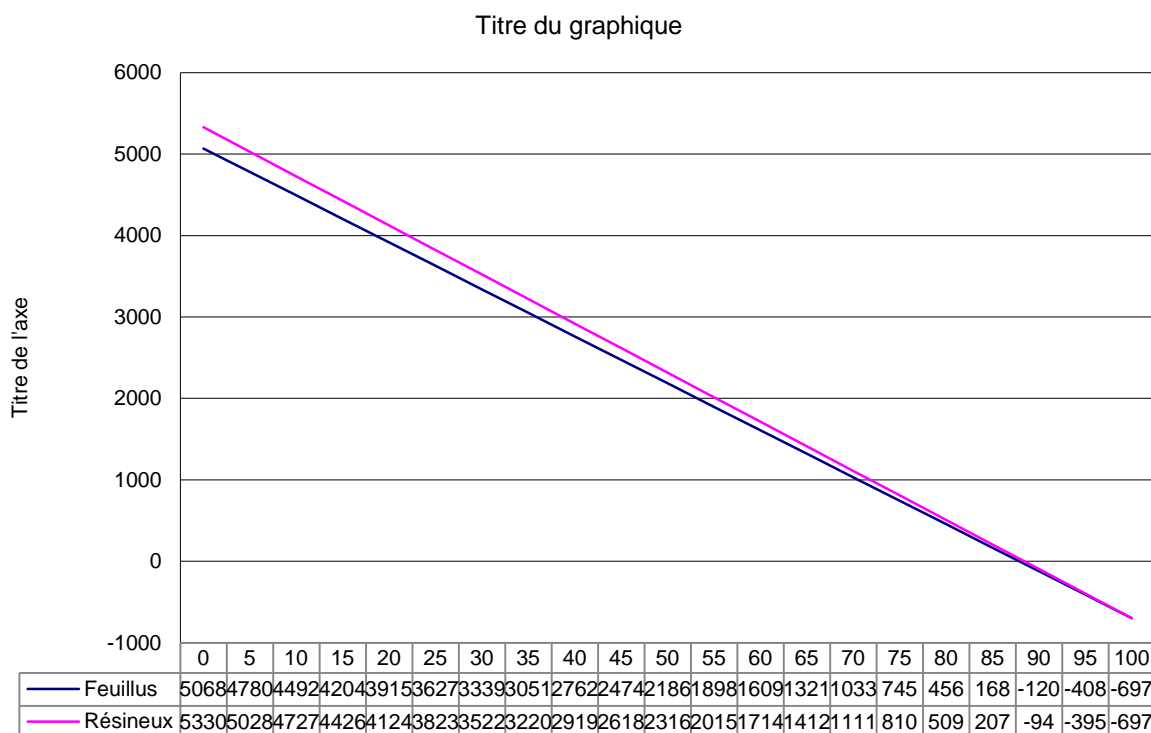


Figure 16. Evolution du PCI sur brut en fonction du pourcentage d’humidité sur brut

(Source [44] et [43])

On peut ainsi déterminer le PCI d’un combustible par la détermination du type d’essence composant majoritairement le combustible (feuillu ou résineux) employé et par une mesure d’humidité. [44]

La valeur de l’énergie d’une unité de poids de biomasse est inversement proportionnelle à la quantité d’eau qu’il contient. Pour obtenir le poids réel de la biomasse, il est donc nécessaire de calculer la teneur en humidité

IV. Prototype de gazéification réalisé

Le prototype de gazéification (gazéificateur) a été réalisé au sein de l’unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien (URER.MS Adrar).

Chapitre 3 Matériel et méthodes

Le corps principal de notre prototype est construit à base d'un extincteur à poudre **récupéré**, d'une hauteur total d'environ **90cm** et d'un **diamètre intérieur $\varnothing_{int} \sim 29\text{ cm}$** et un volume d'environ **0.06m^3** , les conduites d'air sont faites à l'aide de tuyaux en cuivre.

L'entrée de l'oxydant est fixée dans la partie inférieure du corps de gazéification à **12 cm** du fond, avec un lit pour le substrat situé à **9cm** au-dessus de l'entrée de l'oxydant.

La sortie du **Syngas** se situe dans la partie supérieure du corps principal ainsi que l'entrée du substrat.

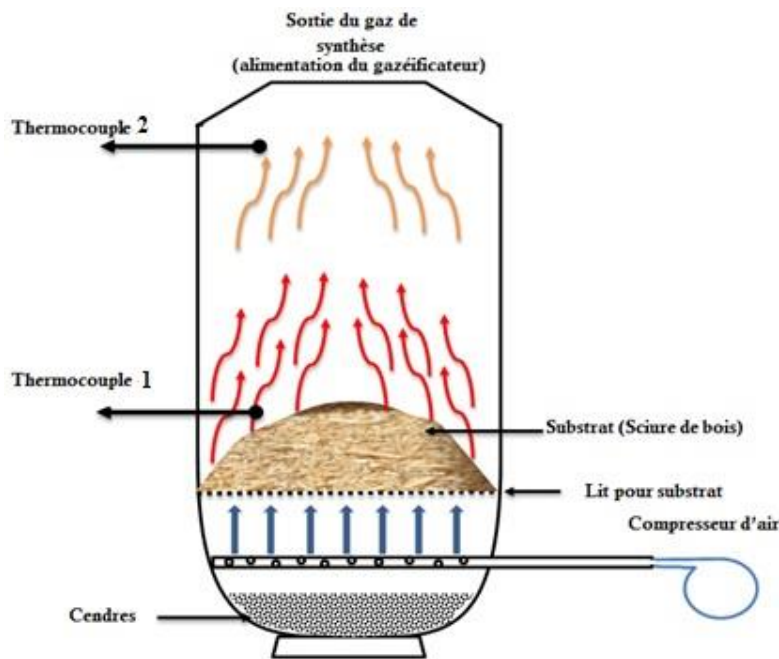


Figure 17. Prototype de gazéification (coupe longitudinale)

L'oxydant utilisé est l'air issu d'un compresseur de taille moyenne (**25 litres**), le choix de l'oxydant a été fait par rapport à la disponibilité et le coût.

Chapitre 3 Matériel et méthodes



Figure 18. Compresseur d'air



Figure 19. Dispositif de gazéification

Le gazéificateur est alimenté par une ouverture située dans la partie supérieure comme il est montré sur la **figure 20**.

Chapitre 3 Matériel et méthodes



Figure 20 Alimentation du gazéificateur

L'air est injecté du bas vers le haut via des trous de **3mm** de diamètre avec un débit de **0.2m³/h**. le débit d'air est mesuré à l'aide d'un anémomètre **testo 435** (voir **figure 21**)



Figure 21. Mesure du débit

Le substrat est allumé manuellement à l'aide d'un briquet. Une petite quantité de solution inflammable est ajoutée afin de faciliter la tâche.

Durant les expériences, la température du gaz de synthèse produit a été suivi à l'aide d'un thermocouple céramique haute température (**+1260°C**) type **k** (situé à quelques centimètre près de l'ouverture) et la température de gazéification à l'aide d'un thermocouple à aiguille de type **k** (**1100°** en continu), les deux thermocouples sont lié à une acquisition de données **Fluck Hydra série II**

Chapitre 3 Matériel et méthodes



Figure 22. Acquisition de donnée utilisée pour le suivi de la température

V. Taux de conversion de la biomasse

Le taux de conversion de la biomasse est calculé directement par l'équation suivante :

$$t(\%) = \frac{(w_0 - w)}{w_0} \times 100 \quad \text{Équation 27}$$

Avec :

w_0 : poids de la matière première

w : poids du résidu solide après la réaction

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 4 Résultats et discussion

I. Présentation des résultats

1. Caractérisation du substrat

Les résultats de caractérisation du substrat obtenu au cours des manipulations sont regroupés dans le **tableau 13**

Tableau 13. Tableau récapitulatif des caractéristiques et composition moyenne du substrat

	<i>Echantillon 1</i>	<i>Echantillon 2</i>	<i>Echantillon 3</i>	<i>Moyenne</i>
Humidité (%)	5.6	6	6	5,87± 0,13%
M.S (%)	94.4	94	94	94,13± 0,13%
M. V (%)	89.981	86.899	88.684	88,52±0,401
Cendres_{sec} (%)	0.29	0.418	0.7	0,47±0,12
C.F (%)	9,729	12,683	10,616	11,009±0,875
$\rho_{initial}$ (kg/m³)	83	84.52	80.23	82,61±1,26
Taux de conversion (%)	85.93	87.34	89.25	87,51±0,96
PCI (kWh /tonne)	4763.12	4787.2	4787.2	4779,17±8,03

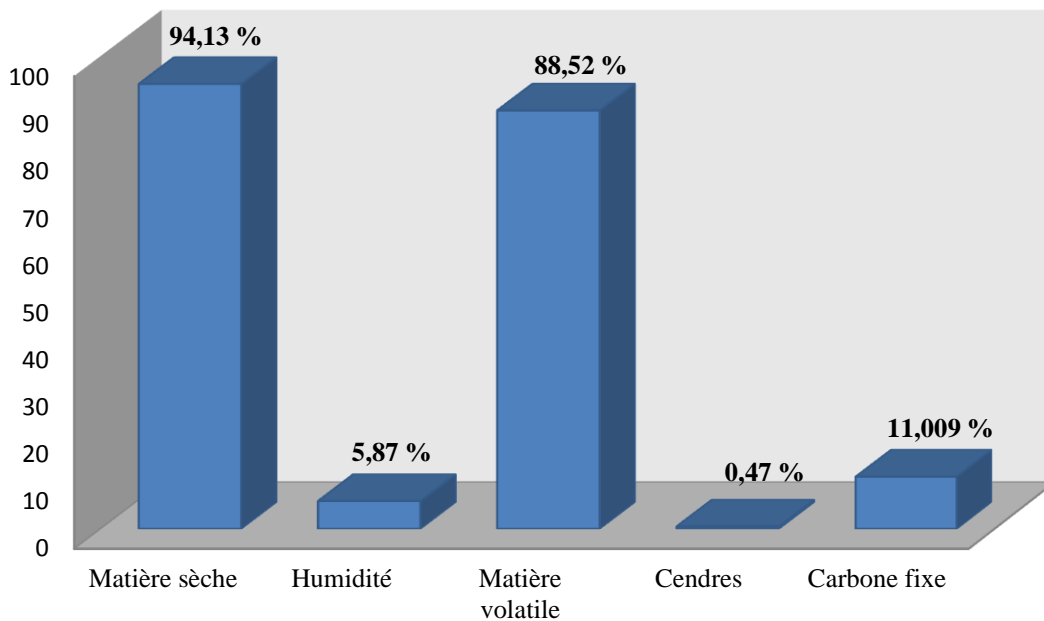


Figure 23. Composition du substrat

2. Suivi de l'évolution de la température

Après caractérisation du substrat, plusieurs essais de gazéifications ont été effectués. Le profil de la température du substrat, à **20cm** du lit, (**T1**) et celle du gaz produit (**T2**) sont représentés dans les figures **24**, **25** et **26**.

Chapitre 4 Résultats et discussion

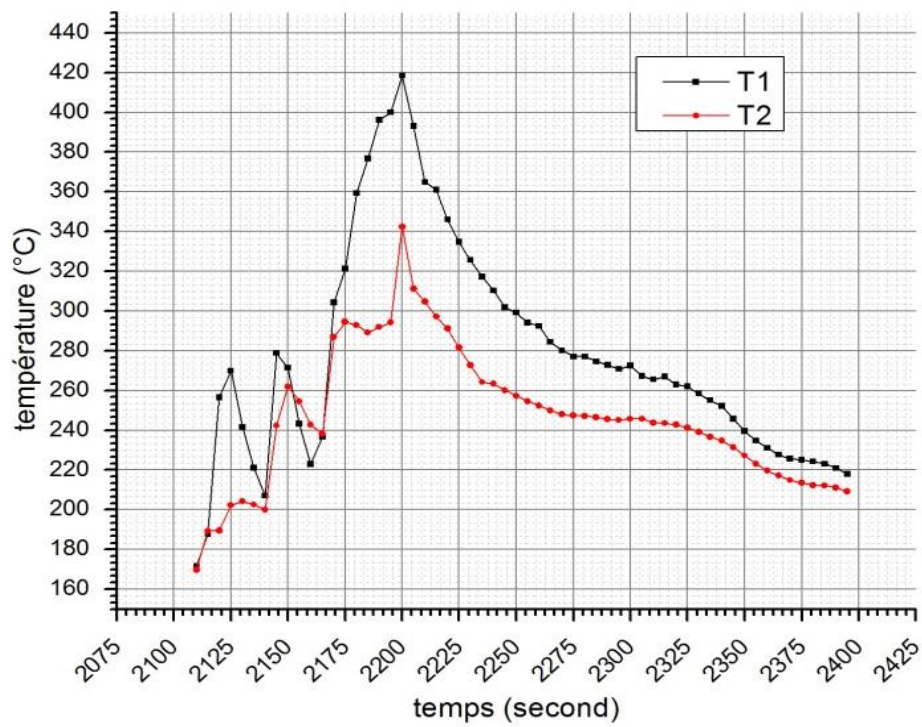


Figure 24. Evolution de la température cours de la gazéification (essai 1)

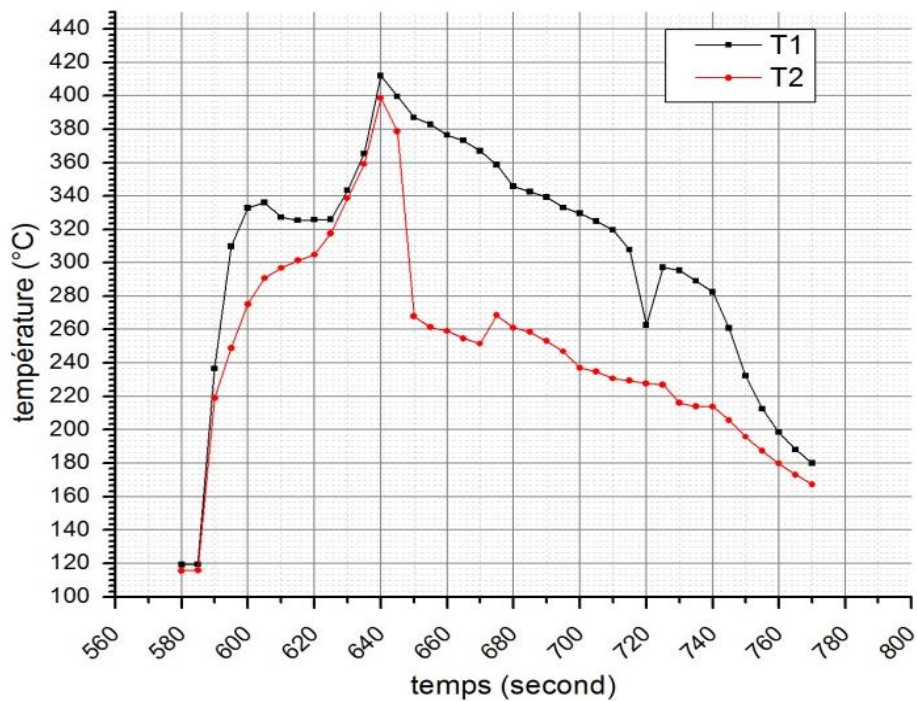


Figure 25. Evolution de la température cours de la gazéification (essai 2)

Chapitre 4 Résultats et discussion

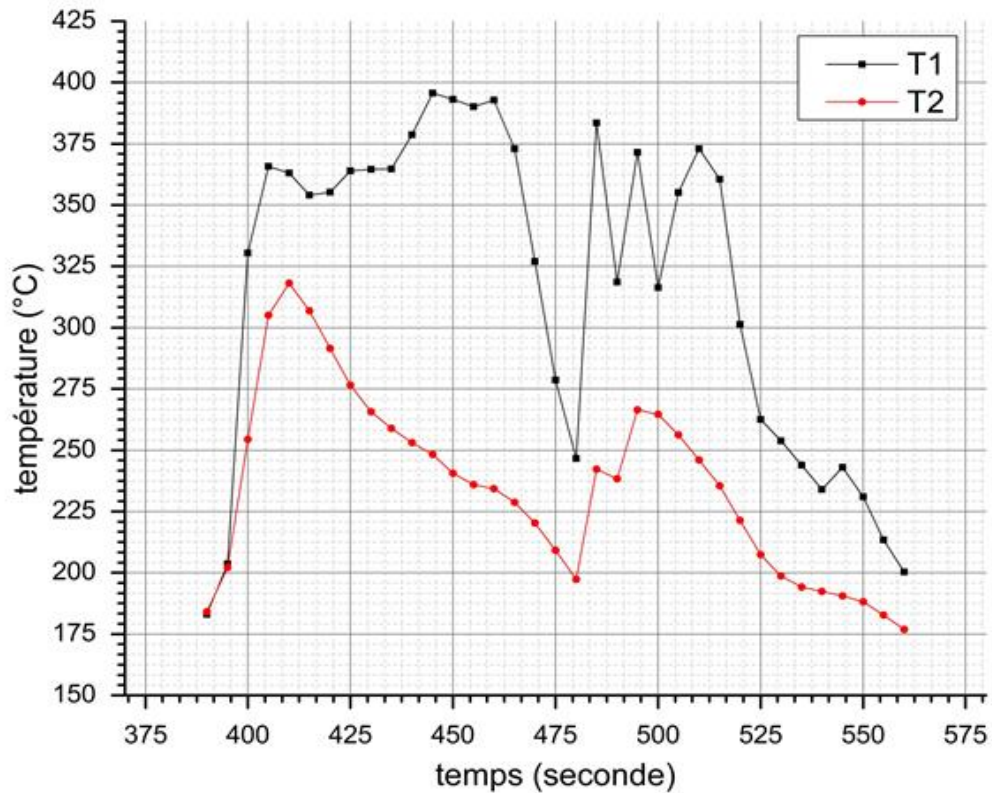


Figure 26. Evolution de la température cours de la gazéification (essai 3)

Nous remarquons que l'évolution de la température du solide est toujours supérieure à celle du gaz produit.

3. Gaz de synthèse produit

Le gaz produit est un gaz inflammable (voir figure 24) chargé en particules, avec la présence du goudron dans le flux gazeux (voir figure 25) et un débit de $1.26\text{m}^3/\text{h}$



Figure 27. Test de l'inflammabilité du gaz produit

Chapitre 4 Résultats et discussion



Figure 28. Goudron produit lors de la gazéification

4. Taux de conversion de la biomasse :

Le processus de gazéification a permis une réduction de plus de **87%** de volume total de notre substrat, comme on peut le voir nettement dans la **figure n°29**



Figure 29. Volume avant (a) et après (b) gazéification

Chapitre 4 Résultats et discussion

II. Discussion des résultats

La biomasse ligno-cellulosique choisie pour l'étude est **la sciure de bois** provenant d'une menuiserie locale. C'est un déchet très abondant et non valorisé ;

Tout combustible contient une part d'eau qui se dégage lors de la combustion sous forme de vapeur, cette humidité joue un rôle majeur sur le contenu énergétique du combustible. Le taux d'humidité moyen qu'on a obtenue est de **$5,87 \pm 0,13\%$** , une valeur faible mais satisfaisante du point de vue énergétiques du fait que l'humidité est inversement proportionnelle au pouvoir calorifique. [46].

La caractérisation du substrat a montré un taux de cendre faible de l'ordre de **$0,47 \pm 0,12\%$** sur poids sec, une valeur qui correspond à l'intervalle [**0,5-8 %**] donné par la littérature [36] avec une marge d'erreur. Une teneur aussi conforme à celle du bois propre (**0,5%**). [46]

La matière volatile est évaluée de **88,562%** sur poids sec, une valeur proche de celle trouvée par Wander, et al (2004) [47]

Le carbone fixe calculé par différence est de **$11,009 \pm 0,875\%$** , comparée aux résultats trouvés par Wander et al (2004) [47] **12,93%**, on peut conclure que notre résultat est cohérent.

Par interpolation des valeurs de l'humidité obtenue sur les abaques du pouvoir calorifique inférieur on obtient un **PCI de 4779,17 KWh/tonne** l'équivalent de **17205,02 j/g**, une valeur qu'on peut juger intéressante du point de vue **énergétique** Cette valeur est lue directement sur le graphe du bois résineux du fait que le bois utilisé par les menuisiers est que l'on appelle commercialement **le bois dur**, est un **bois résineux**.

Le prototype de gazéification réalisé a été modifié à plusieurs reprises à fin de le rendre plus performant et facile à utiliser ; le modèle final réalisé est un gazéificateur à lit fixe du type **Up draft** ou notre substrat est introduit du sommet du prototype et l'air est injecté par la partie basse.

L'air est utilisé comme agent de gazéification abondant et de faible coût; il est introduit directement à l'aide d'un compresseur d'air.

Le profil de la température interne du gazéificateur ainsi que celui du gaz produit, pour les trois essais effectués, ont la même allure. La température interne de gazéification a dépassé les **418°C**, une valeur proche de l'intervalle [**500 -1000°C**]. [48]

Chapitre 4 **Résultats et discussion**

Pour le troisième essai, l'allure est un peu différente des deux premiers essais effectués, cela peut être dû à la granulométrie du substrat du dernier essai qui était trop fine par rapport à celle utilisée pour les deux premiers essais.

La température du gaz de synthèse produit varie dans un intervalle de **200-400°C**, ce qui est conforme à la théorie de gazéificateur à lit fixe avec l'air comme agent de gazéification. [23]

Le gaz de synthèse produit est chargé de particules et contient du goudron ; deux composants indésirables qu'on doit envisager d'éliminer avant l'utilisation du gaz pour la production d'énergie. Le mode de purification choisi dépendra du mode de valorisation prévu.

Après achèvement du processus, le substrat a diminué de volume à raison de plus de **85%** du volume initial introduit ; un résultat intéressant pour un processus de traitement de biomasse rapide et efficace. Les cendres issues de la gazéification sont riches en minéraux et peuvent être utilisées comme fertilisant pour les sols.

CONCLUSION

Conclusion

Le manque de source énergétique aggrave la pauvreté des pays en développement. Les technologies de développement durable et renouvelable peuvent être considérées comme des outils efficaces pour pallier à ce manque tout en résolvant le problème de déchets. Les études effectuées par différents chercheurs et spécialiste sont montrés que les énergies renouvelables sont le meilleur choix particulièrement dans les sites isolés. Parmi l'éventail des possibilités, la biomasse offre des voies intéressantes grâce à ses nombreux avantages et son potentiel élevé pour répondre aux exigences en matière de technologies d'approvisionnement en énergie.

La gazéification, de la biomasse est l'une des principales options de court terme pour la production d'une énergie renouvelable appelée « **gaz de synthèse** ».

Le gaz de synthèse est principalement utilisé dans des unités de cogénération de chaleur et d'électricité, mais d'autres voies de valorisation, sont également possibles : les biocarburants de deuxième génération (méthanol, le diméthyléther, procédé Fischer-Tropsch...) [49], la production renouvelable d'hydrogène [50], les piles à combustible [51].

Durant ce travail on a pu concevoir un petit gazéificateur à lit fixe contre-courant (**up draft**), qui fonctionne en utilisant l'air comme agent de gazéification et qui permet de produire un gaz de synthèse inflammable, tout en réduisant de **87%** le volume de la biomasse gazéifiée.

La biomasse choisie pour l'expérience est la sciure de bois du fait qu'elle ne participe pas à l'augmentation de la teneur du CO₂ atmosphérique et qu'elle offre un pouvoir calorifique élevé.

Les résultats de la caractérisation ont montré une teneur en eau de **5.87%**, **11,009** de carbone fixe, **0.47%** de cendre et **88.52%** de matière volatile, le **PCI** est estimé à **4779.17 KWh/tonne** en utilisant les abaques.

La température de gazéification a atteint les **418°C** et celle du gaz produit a dépassé **390°C** ce qui est conforme à la théorie.

Le gaz produit est chargé en particules, et contient du goudron ainsi que d'autres composants indésirables ce qui nécessite un prétraitement afin de purifier le gaz produit et l'utiliser par la suite selon le besoin.

Le présent travail est un essai expérimental préliminaire dont les résultats sont prometteurs et réalisables sur terrain, surtout pour les zones isolées et privées de chauffage et d'électricité, c'est un moyen de traiter la biomasse inutile et produire une énergie rapide et directement utilisable.

En perspective, nous suggérons une continuité de ce travail à fin d'optimiser notre gazéificateur en tenant compte de tous les paramètres influençant le procédé de conversion et prévoir une chaîne de traitement du gaz de synthèse pour éliminer les composants indésirables.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Z. Salman, «Gasification of municipal solid waste,» juin 2009. [En ligne]. Available: http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue_number=09.06.01&article=zafar. [Accès le mai 2014].
- [2] J.-M. Balet, Aide mémoire Gestion des déchets, Paris: DUNOD, 2008.
- [3] G. Antonini, traitement thermique des déchets- processus thermochimiques, Paris : Technique de l'Ingénieur, 2003.
- [4] P. Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory, United States of America: Elsevier, 2013.
- [5] G. Miquel et. S. Poignant, «les nouvelles technologies de recyclage et de Valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals,» office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Paris, 1999.
- [6] «futura environnement,» futura science, [En ligne]. Available: <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/developpement-durable-oxycombustion-7033/>. [Accès le 22 avril 2014].
- [7] G. Antonini, Traitements thermiques des déchets - Procédés et technologies associées, paris: Technique de l'ingénieur, 2005.
- [8] F. Pigaux et C. Vittoz, «Inventaire des situations réglementaires atypiques liées au développement de procédés de traitement thermique des déchets autre que l'incinération: étude comparée des procédures d'autorisation des installations classées à l'international,» RECORD, 2011.
- [9] Université de Perpignan, «Les énergies renouvelables : état des lieux et perspectives,» [En ligne]. Available: <http://uved.univ-perp.fr/module2/co/3-biohuile.html>. [Accès le juin 2014].
- [10] N. Castaldi, B. Klinghoffer et J. Marco. Waste to energy conversion technology, UK: Woodhead Publishing, 2013.
- [11] U. Arena, «Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review,» *Waste Management*, vol. 32, 2012.
- [12] F. Lafortune et S. Léger, «pyrolyse et gazéification des pneus hors d'usage,» Société québécoise de récupération et de recyclage, Québec, 2001.

- [13] B. Jacquinet, «Les Traitements thermiques pour la valorisation des boues,» Bertin Technologies, Tarnos, France, 2008.
- [14] M. Hookwijk, R. Van Den Broek, G. Berndes, D. Gielen et W. Turkenburg, «Exploitation of the ranges of the global potentiel of biomass for energy,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, pp. 119-133, 2003.
- [15] F. Alario et F. Castagna, mai 2012. [En ligne]. Available: <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Tous-les-Zooms/Petrochimie-et-chimie-ex-biomasse-demande-prix-production-quelles-evolutions>. [Accès le 20 juin 2014].
- [16] R. C. Brown, *Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*, USA: wiley, 2011.
- [17] O. Megret et L. Bequet, «Polluants et techniques d'abattage des gaz de synthèse issus de procédés de,» RECORD, 2011.
- [18] «Gazéification,» 2011. [En ligne]. Available: <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>. [Accès le 20 juin 2014].
- [19] «Gazification.info,» [En ligne]. Available: <http://www.gazeification.info/>. [Accès le 20 juin 2014].
- [20] A. Kumar, A. Sharma et P. Bhandari, «Biomass gasification and Syngas utilization,» chez *Sustainable Bioenergy Production*, Boca Raton, Taylor and Francis, 2014, pp. 341-357.
- [21] J. Rezaiyan et P. Nicholas Cheremisinoff, *Gasification technologies: A primer for engineers and scientists*, Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.
- [22] S. Bhattacharya, «A Review of Biomass Gasification,» chez *A Review of Selected Biomass Energy Technologies: Gasification, Combustion, Carbonization and Densification*, Thailand, ARRPEEC; Sida, 2006, pp. 1-53.
- [23] B. Prabir, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, Burlington: Academic Press, 2010.
- [24] H. Harold, *Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels*, Cambridge: Cambridge University Press., 2013.
- [25] U. Arena, «Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review,» *Waste Management*, vol. 32, pp. 625-639, 2012.
- [26] S. Oh, «Slag penetration into oxide refractories,» *Am. Ceram. Soc. Bull*, vol. 56, n° 17, pp. 649-650, 1977.

- [27] C. Couturier, «Techniques de production de l'électricité à partir de biogaz et gaz de synthèse,» Record, 2009.
- [28] A. DEJEAN, «Tests technico-économiques sur la plateforme gazeuse: de l'étude de la ressource à l'utilisation du gaz dans un moteur pour la production d'électricité,» Burkina-Faso, 2013.
- [29] W. Chunfei et T. William Paul, «Advanced thermal treatment of wastes for fuels, chemicals and materials recovery,» chez *Waste as a Resource*, UK, RSC, 2013, pp. 1-43.
- [30] T. Marie-Christine et P. Trouy-Triboulot, *Matériau bois - Structure et caractéristiques*, Paris: Techniques de l'Ingénieur, 2012.
- [31] W. Jean-Luc, «Bioraffineries de deuxième génération utilisant la voie thermochimique,» ValBiom, 2013.
- [32] c. Hazard, J.-P. Barette et J. t Mayer, *Mémotech : bois et matériaux associés*, Paris: Editions Casteilla, 1996, p. 455.
- [33] S. Collet, «Facteurs d'émission. Emissions de dioxines, de furanes et d'autres polluants liées à la combustion du bois naturel et adjuvanté,» 2000.
- [34] Y. Rogume, *La combustion du bois et de la biomasse*, Paris: Technique de l'ingénieur, 2009, pp. 66-80.
- [35] E. B. Marie, B. Edouard, D. Xavier et V.-G. Carlos, «Bois,» 2014. [En ligne]. Available: <http://www.universalis.fr/encyclopedie/bois/>. [Accès le 06 juin 2014].
- [36] Y. Rogaume, *Production de la chaleur à partir du bois - Combustible et appareillage*, Paris: Technique de l'Ingénieur, 2005.
- [37] ASTM E871 - 82(2013), *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*, West Conshohocken: ASTM International. www.astm.org, 2013.
- [38] ASTM D1102 - 84(2013), *Standard Test Method for Ash in Wood*, West Conshohocken: ASTM International. www.astm.org, 2013.
- [39] ASTM E1755 - 01(2007), *Standard Test Method for Ash in Biomass*, West Conshohocken: ASTM International. www.astm.org, 2007.
- [40] ASTM E872 - 82(2013), *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels*, West Conshohocken: ASTM International. www.astm.org, 2013.
- [41] A. Adekiigbe, «Determination of Heating Value of Five Economic Trees Residue as a Fuel for Biomass Heating System,» *Nature and Science*, vol. 10, n°10, pp. 26-29, 2012.

- [42] D. Pflug, P-A. Dupraz et M. Mooser, Dimensionnement des structures en bois: aide au calcul basé sur la SIA 265 "Construction en bois", Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009.
- [43] S. Jean-Pierre, «La combustion du bois et ses impacts sur la qualité de l'air,» n°81, 2012.
- [44] ADEM, «Mesure des caractéristiques des combustibles bois,» ADEM, 2001.
- [45] R.-C. Frank, P. d. Groot, L. H. t Sarah et J. Woods, The Biomass Assessment Handbook, Bioenergy for a Sustainable Environment, London: Earthscan, 2007.
- [46] Laboratoire de recherche en diversification énergétique de CANMET et SGA Energy Limited, «Les petites installations de chauffage à la biomasse: guide de l'acheteur,» Sa Majesté du Chef du, Canada, 2000.
- [47] P. R. Wander, C. R. Altafini et R. M. Barreto, «Assesement of small sawdust gasification unit,» *Biomasse and Bioenergy*, vol. 27, pp. 467-476, 2004.
- [48] I. Carlesi, «Etude d'un procédé de gazéification de la biomasse en ambiance plasma sur bain de verre,» UNIVERSITE DE LIMOGES, LIMOGES, 2012.
- [49] G. Rossum, B. Potic, S.R.A. Kersten et W.P.M. VanSwaaij «Catalytic gasification of dry and wet biomass,» *Catalysis Today*, vol. 145, n°1-2, pp. 10-18, 2009.
- [50] N. H. Florin et A. T. Harris, «Hydrogen production from biomass coupled with carbon dioxide capture: The implications of thermodynamic equilibrium,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, n°17, pp. 4119-4134, 2007.
- [51] J. Xuan, M. K. Leung, K.H., Michael, D. Leung et N. Meng, «A review of biomass-derived fuel processors for fuel cell systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 6-7, pp. 1301-1313, 2009.

Résumé

Il existe à présent différentes technologies de traitements permettant de gérer les déchets organiques (biomasse) tout en les valorisant sous forme d'énergie propre dont on cite le traitement thermique, ce dernier permet tout d'abord une réduction optimale des déchets traités. Il permet ensuite une valorisation efficace de l'énergie produite à l'issue du traitement, en une énergie renouvelable.

La gazéification de la biomasse est l'une des principales options pour la production d'une énergie renouvelable appelée « gaz de synthèse » composé essentiellement des gaz combustibles comme le méthane et hydrogène.

Le but de notre travail est la conception et l'expérimentation d'un gazéificateur de type « **Up draft** » pour le traitement des déchets organiques et la valorisation de l'énergie produite par la suite.

Les menuiseries de la commune d'Adrar génèrent d'importantes quantités de sciure de bois qui n'est ni traité ni valorisé, de ce fait il est choisi comme substrat pour notre étude. En plus qu'il présente des caractéristiques énergétiques intéressantes (**PCI =4779.17 KWh/tonne**) et ne participe pas à l'augmentation de la teneur du CO₂ atmosphérique.

Le prototype de gazéification réalisé au cours de cette étude a permis une production d'un gaz inflammable d'une température qui a atteint **390°C**, avec un taux de réduction en masse de plus de **87%**.

Mots clés : Déchets, sciure de bois, énergie renouvelable, traitement thermique, gazéification, gaz de synthèse

Abstract

There are now various treatment technologies for managing organic waste (biomass) while promoting them as clean energy, the thermal treatment is mentioned, it allows first an optimal reduction of the treated waste. It then allows efficient recovery of energy produced at the end of treatment, renewable energy.

The gasification of biomass is one of the main options for the production of a renewable energy called "synthesis gas" consisting mainly of combustible gases such as methane and hydrogen. The aim of our work is the design and testing of a type gasifier "**Up draft**" for the treatment of organic waste and reclamation of the energy produced thereafter.

The woodwork of the town of Adrar generate large amounts of sawdust that is neither treated nor valued, thus it is chosen as the substrate for this study. In addition it has interesting energy characteristics (**LHV = 4779.17 kWh / ton**) and does not participate in the increase in atmospheric CO₂ content.

The gasification prototype produced during this study production of a flammable gas to a temperature of **390 ° C** with a reduction ratio by mass of more than **87%**.

Keywords: waste, sawdust, renewable energy, thermal treatment, gasification, synthesis gas,

ملخص

توجد حاليا تقنيات معالجة مختلفة تسمح بإدارة النفايات العضوية (الكتلة الحيوية) مع تجميعها على شكل طاقة نظيفة، من بين هذه التقنيات نذكر المعالجة الحرارية، هذه الأخيرة تسمح أولاً بالتقليص الأمثل للنفايات المعالجة. ثم تسمح بالتجميع الفعال للطاقة المنتجة في نهاية المعالجة إلى طاقة متجددة.

تغويز الكتلة الحيوية (التحويل إلى غاز) يعد أحد الخيارات الرئيسية لإنتاج طاقة متجددة تسمى 'الغاز الاصطناعي' يتألف أساساً من الغازات القابلة للاحتراق، مثل غاز الميثان والهيدروجين.

الهدف من هذه الدراسة هو تصميم و تجريب محول غاز من نوع تيار صاعد (**up draft**) لمعالجة النفايات العضوية وتجميع الطاقة المنتجة.

معامل النجارة لبلدية ادرار تولد كميات كبيرة من نشارة الخشب التي لا تعالج ولا تجم، لذلك تم اختياره ككتلة حيوية في دراستنا هذه. بالإضافة إلى ذلك لديه خصائص طاقوية مهمة وفعالة (القيمة الحرارية الدنيا **(PCI) = 4779.17 كيلواط ساعة / طن**) كما أنه لا يشارك في زيادة نسبة CO₂ في الغلاف الجوي

النموذج الأولي المنجز خلال هذه الدراسة يسمح بإنتاج غاز قابل للاشتعال درجة حرارته بلغت 390 درجة مئوية، بمعدل انخفاض في الكتلة لأكثر من 87%.

كلمات مفتاحية : نفايات، نشارة الخشب ، طاقة متجددة ، معالجة حرارية ، التغويز، الغاز الاصطناعي.