

VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE

Adrian BADEA¹

Résumé. *L'article présente un "state of the art" des solutions pour la conversion thermo-chimique en énergie de la biomasse. Les processus de pyro-gazéification intégrés aux cycles thermodynamiques Brayton ou moteurs thermiques en utilisant le gaz de synthèse ensemble avec les piles de combustion à hydrogène représente des alternatives à la production d'énergie avec une efficacité supérieure au couplage classique combustion – cycle Rankine Hirn. L'analyse qualitative des solutions au stade pilote semi industriel est complétée par l'étude expérimental sur la cinétique de réaction de dévolatilisation de la biomasse, étape commune au processus de combustion ainsi qu'au processus de gazéification. Le travail présente une image globale des variantes possibles pour la valorisation énergétique de la biomasse et dans une acception plus large des combustibles « de surface » dans le contexte européen de développement soutenable des ressources énergétiques par l'utilisation des sources renouvelables.*

Mot clés: biomasse, pyrolyse, gazéification, cinétique de réaction, énergie.

1. Introduction

L'évolution du marché d'énergie est au cœur des débats politiques et culturels. Pendant de nombreuses années, l'unique voie thermique conventionnelle pour la production d'énergie était la conversion des combustibles fossiles: charbon ou hydrocarbures. Au raison de pollution excessive avec impact immédiat sur l'effet de serre, doublé par la forte diminution des réserves naturelles des carburants les technologies classiques utilisant les cycles Rankine Hirn à vapeurs, cycles Brayton à turbines à gaz ou moteurs thermiques sont en traîne d'être adaptés au combustibles alternatives nommés combustibles de surface. Cette nouvelle classe de combustibles couvre un large spectre de sources comme: la biomasse, les déchets industriels non dangereux, les déchets de l'agriculture etc. Parmi les sources combustibles de surface la biomasse représente plus de 72% et réunisse toutes les matériaux organiques à basse de ligne cellulose. Par extension on peut associe à la biomasse les déchets zootechniques et municipaux. L'utilisation de la biomasse offre des avantages majeurs sur la protection de l'environnement par la réduction de l'effet de serre. Les cultures „énergétique” absorbent de l'atmosphère la quantité de dioxyde de carbone équivalente à la production du CO₂ dégagé par leur combustion. En plus on bénéficie de la diminution importante de l'émission du SO₂ issu par la combustion des combustibles fossiles. Au niveau de l'année 1990 la consommation mondiale d'énergie provenant par la conversion thermique

¹Prof. univ., Faculté d'Énergétique, Université « Politehnica » de Bucarest, 313 Splaiul Independentei, Roumanie. Membre titulaire de l'Academie des Scientifiques de Roumanie.

classique de la biomasse été d'approximatif 6,7% de la consommation globale. Pour l'année 2000, les données de l'Agence International pour l'Énergie (A.I.E.), issu par un sondage sur 133 pays, montre que cette cote a augmentée à 10,5%.

L'objectif de la stratégie de l'Union Européenne proposé par la Carte Blanche est de doubler jusqu'en 2010 la cote d'énergie à base des sources renouvelables de 6% en 2001, à 12% en 2010, respective de 74,3 mil. tonnes équivalent pétrole (t.e.p.) à 182 mil. t.e.p. Par mis les sources renouvelables la biomasse sera majoritaire avec un équivalent énergétique de 56 mil. t.e.p.

En Roumanie le potentiel énergétique de biomasse est utilisé, le bois et les résidus agricoles étant transformés en énergie thermique par procédés avec une efficience très faible classiques – combustion dans des centrales thermiques industrielles plus ou moins dépassé physique et morale.

La stratégie gouvernementale pour la valorisation énergétique de la biomasse a comme objective pour l'année 2010 l'installation des nouvelles unités équivalentes à 3250 t.e.p. pour la production d'énergie thermique et 190 MW pour la production d'énergie électrique. Au présent seulement 11-12% du total d'énergie est produite en unités modernes de conversion. En Roumanie existe approximative 560 chaudières à base de bois ou résidus de l'industrie du bois. Néanmoins la biomasse, dans le plus large sens représente un déchet avec un impact important sur l'environnement. A l'heure où la tendance est au « zéro déchet », de nouveaux procédés alternatifs à la combustion se développent peu à peu, apportant de nouvelles perspectives à la génération d'énergie. Parallèlement, pour répondre aux normes de pollution, les procédés thermiques continuent de se développer, notamment en intégrant des systèmes d'épuration et de valorisation énergétique avancé en utilisant des nouveaux vecteurs d'énergie comme l'hydrogène.

2. Procèdes de conversion thermique de la biomasse

2.1. Systèmes pour la production de l'énergie

Les systèmes standards pour la production d'énergie électrique par combustion qui ont opéré avec succès jusqu'au présent sont menacés par de nouvelles technologies et concepts déjà disponibles (pyrolyse et gazéification), mais qui n'ont pas été encore validées sur une assez longue période. A ce moment, deux solutions se présentent fiables à l'échelle industrielle:

- La combustion directe (ou co-combustion avec des combustibles fossiles) de la biomasse et production de vapeur suivie d'une détente dans une turbine à vapeur (rendement énergétique global généralement inférieur à 25%);

- La combustion de combustibles issus du traitement des déchets (gazéification ou thermolyse – pyrolyse) dans un moteur ou dans un turboréacteur (rendements d'approximatif 30%).

On ajoute ici la troisième solution représenté par les piles combustibles, mais l'échelle réduite d'applicabilité ne la recommande pas à ce moment pour la production d'énergie électrique haute puissance malgré l'efficacité énergétique élevée au-dessous 60% (la valeur ne comprend pas le rendement de production d'hydrogène à partir de la biomasse).

Les développements futurs dans conversion thermique en énergie de la biomasse doivent envisager la meilleure technologie pour un coût minimal, ça veut dire des systèmes compatibles environnementaux et avec une efficacité économique élevée. Dans la dernière période la pyrolyse suivie par la gazéification du coke résultant lors de ce processus est envisagée comme une nouvelle et révolutionnaire méthode. Par rapport aux ces technologies, la combustion couvre en présent 75–80% de la marché d'énergie. Le reste est partagé entre les technologies de pyro-gazéification avec ou sans combustion. Alors, les principales filières de conversion en énergie électrique de la biomasse peuvent être définis par trois processus physico-chimiques qu'on va les détailler ci après.

Les technologies existantes sont très diversifiées et les paramètres ci-dessous sont donnés à titre indicatif. Comme procédés de base on distingue :

Pyrolyse: la désintégration thermique de la matière organique en coke, huile et gaz de pyrolyse dans une atmosphère réductrice, faible en oxygène ($O_2 < 2\%$) à températures de 450–1000°C.

Gazéification: la conversion partielle de la partie organique à l'aide d'un agent de gazéification (oxygène ou vapeur d'eau) en gaz de synthèse, à une température 800–1600°C et une pression variable entre 1 à 45 bars.

Combustion: la conversion complète en chaleur CO_2 et H_2O de la partie organique en présence d'oxygène à températures entre 850–1200°C.

Les technologies nouvelles pour la conversion en énergie de la biomasse et produits associés on été redéveloppé à partir des années 80, malgré leur utilisation intense pendant les années '40 en spécial par Wehrmacht, l'armée allemande, à la raison du déficit des combustibles pour l'effort de guerre.

L'innovation qu'ils ont introduit sur la marché des procédés de conversion en énergie a été les étages distinctifs de pyrolyse et gazéification dans le processus pour:

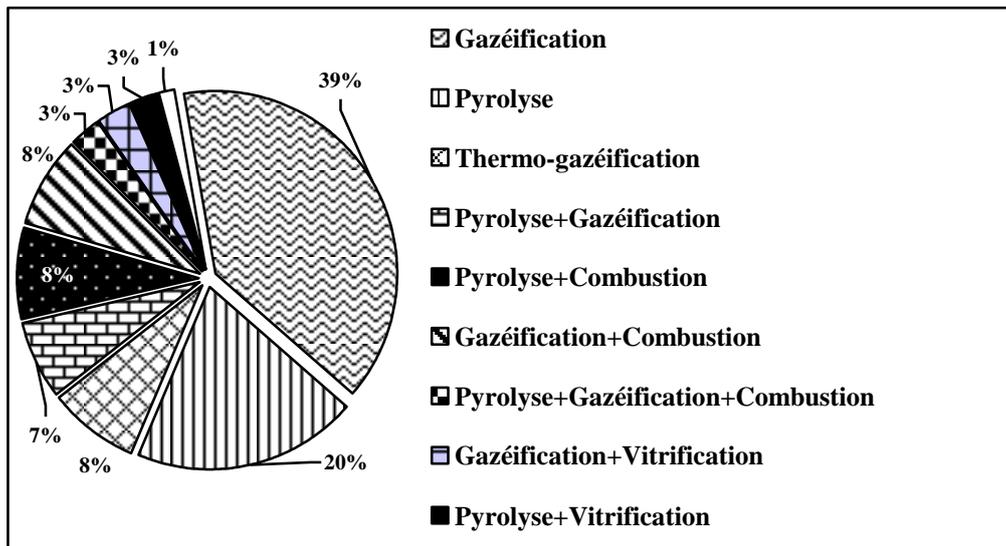
- la conversion des déchets en gaz de synthèse avec un PCI élevé;
- réduire les émissions par la minimisation du débit des fumées.

Tableau 1. Caractéristiques générales des processus de valorisation thermique de la biomasse

Paramètres		Pyrolyse	Gazéification	Combustion
Température [°C]		450-1000	800-1600	850-1200
Pression [bar]		1	1-45	1
Atmosphère		Inerte (N ₂)	Agent de gazéification (O ₂ , H ₂ O)	Air
Conditions stœchiométriques		0	< 1	> 1
Produits processus	Gazeux	H ₂ , CO, N ₂ , Hydrocarbures	H ₂ , CO, N ₂ , CH ₄ , C _m H _n ,	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂
	Solides ¹	cendre, coke	scories	cendre, scories

Source : Antonini, G. & Gislais, P., 1995

La figure 1 présente la distribution des technologies de valorisation énergétique par voie thermique non – oxydante de la biomasse et produits assimilés dans le monde au niveau 2003 en fonction du processus utilisé.

**Fig. 1.** Technologies non oxydantes au niveau 2003 en fonction du processus utilisé. Source: Dario, M., 2004

On observe que la pyrolyse comme procédé indépendant couvre 20% sur ce marché. La gazéification est majoritaire avec 40%, le reste étant des méthodes combinées adaptées aux différents types des déchets. Le pourcentage élevé de la gazéification s'explique par la finalité au niveau du produit résultant lors de ce processus. Le gaz de synthèse a une large plage d'utilisation et très bonnes caractéristiques énergétiques. Les produits de la pyrolyse, par contre, ont une destination de valorisation énergétique précise à cause de leurs caractéristiques que les empêchent d'être utilisés dans domaines variés.

¹La pyrolyse de basse température (jusqu'à 650 °C) fournit comme sous-produit aussi de l'huile.

Pour une image technique en ce qui concerne ces technologies combinées on fait un point sur les installations utilisées:

Pour la **pyrolyse – incinération**

La pyrolyse dans le four rotatif, séparation du coke et matière inorganique et l'incinération du gaz lors de la pyrolyse;

La pyrolyse dans le four rotatif, la séparation des inertes et la combustion de la partie riche en charbon solide et du gaz de pyrolyse;

La pyrolyse dans le four rotatif, la condensation des composants du gaz résulté et l'incinération de l'huile et coke.

Pour la **gazéification**

Réacteur à lit fixe – pour des matériaux divisés, le prétraitement est requis;

Réacteur avec bain des scories – est comparable avec le réacteur à lit fixe mais il décharge les scories fondues;

Le processus éco-gaz – c'est le réacteur à lits fluidisée circulant pour la biomasse, les déchets urbains prétraités.

Existe aussi la co-gazéification des déchets ensemble avec des combustibles fournissant une meilleure PCI, par exemple le charbon (réacteur pour la gazéification du mélange charbon – biomasse dont le charbon 25%, SVZ Schwarze Pumpe).

Pour la **pyro – gazéification**

Processus de conversion – pyrolyse dans un four tournant, le traitement de la phase solide, la condensation de la phase gazeuse et l'introduction dans un réacteur du gaz de pyrolyse, huile et coke pour la gazéification.

Ces technologies ont comme point de départ le processus de pyrolyse, dont les réactions existent même dans la phase préliminaire de la combustion. Le choix pour une des ces technologies basées sur la pyrolyse c'est une question d'optimisation économique au niveau de l'unité énergétique et politique nationale.

2.2. La combustion

Les principes théoriques à respecter pour réaliser une combustion complète des déchets se résument au contrôle de trois facteurs: température de combustion, temps de séjour et turbulence. C'est la règle d'or de 3 T, chère aux thermiciens.

Température de combustion

La quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité d'un corps considéré ne dépend que de la composition chimique du combustible. La

connaissance du PCI est un paramètre important de la conduite d'un incinérateur. Dans la pratique, on peut considérer que des produits de PCI supérieur à 14 000 kJ/kg sont auto - combustible, parce que leur réaction d'oxydation est suffisamment exothermique. Le PCI de la biomasse varie entre 17 000 kJ/kg et 20 000 kJ/kg.

Temps de séjour

En pratique, on détermine le temps de séjour moyen par la formule suivante: $T=V/Q$, V étant le volume de la chambre de combustion et Q le débit, en volume, de gaz produit par la charge oxydée. Le volume de la chambre étant fixé par construction, le temps de séjour des gaz est inversement proportionnel à la charge incinérée. Cette dernière est prédéterminée par la charge thermique admissible dans la chambre, soit 100 à 200 mth/m³ de chambre¹.

Turbulence

La turbulence permet le mélange intime des combustibles et de l'air comburant. Elle peut être réalisée:

- soit directement dans les brûleurs;
- soit dans les fours par différents aménagements tels que des changements de vitesse par des restrictions ou des nids d'abeilles jouant également le rôle d'accumulateurs de chaleur, des inversions de parcours de fumées par des parois de cracking, des dispositions judicieuses d'injection d'air et de produits.

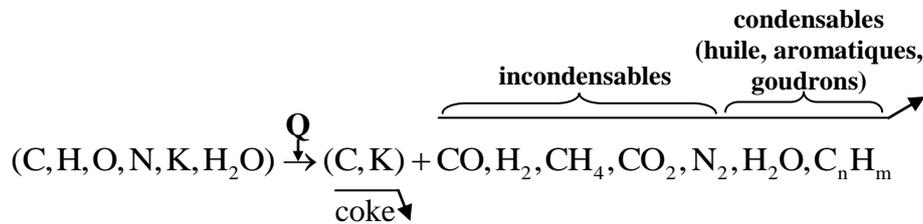
On peut dire que 1 tonne de biomasse se transforme en 850 kg de gaz et abandonne 150 kg de résidus solides, par incinération [1]. Si la combustion est effectuée avec une quantité d'air suffisante, le carbone réagit, pour une température des gaz inférieure à 1500 °C, en quasi-totalité avec l'oxygène de l'air.

2.3. La pyrolyse

Cette dernière décennie a été caractérisée, au plan des techniques de conversion thermo-chimique des produits solides combustibles, par le développement conséquent de la pyrolyse, une technologie déjà ancienne mais techniquement bien actualisée. La pyrolyse représente la décomposition, en l'absence d'air (condition réductrice) et une température moyenne (450 à 800°C), de la matière organique. Le produit est d'abord fragilisé puis, à mesure que la température augmente, décomposée en matières volatiles d'une part, et en un résidu carboné, d'autre part. Le terme générique de « matières volatiles » recouvre tout un ensemble d'espèces chimiques, comprenant essentiellement deux grandes catégories: des espèces chimiques condensables à température et pression

¹La thermie, unité tolérée pour la chaleur - 1 mth = 4.1855·10³ J.

ambiantes et dénommés goudrons, et des gaz légers (H_2 , CO , CO_2 et hydrocarbures légères en C_1 , C_2 , C_3 , C_4). A ces composés s'ajoute de l'eau et quelques autres constituants tels que des benzols, des acides (formique, acétique), des alcools et des espèces azotées tels que NH_3 et HCN . Les goudrons sont à leur tour craqués en gaz combustible légers à plus haute température ($>500^\circ C$). Comme le précisent GARCIA [2] ou Li [3], ces réactions sont favorisées par des vitesses de chauffe importantes et de longs temps de séjour des produits primaires de pyrolyse à ces températures, car les goudrons formés pendant la première étape n'ont ainsi pas le temps de diffuser hors du solide et y sont craqués. Les goudrons sont généralement les composés majoritaires des réactions primaires de pyrolyse [4]. Alors, la réaction de pyrolyse, qu'on présente schématiquement ci-dessous, est le départ pour la combustion aussi que pour la gazéification des déchets.



Le gaz issu de la pyrolyse est traité afin d'en séparer ses composantes (méthane, vapeur d'eau, hydrogène, ...). L'opération de « reforming » des gaz de pyrolyse permet d'éliminer les goudrons et de produire un gaz compatible avec le gaz naturel. Une partie de ce gaz épuré sert à chauffer les parois du four, le reste peut être valorisé par la production d'électricité ou de chaleur.

Types de procédés de pyrolyse

Les procédés de destruction pyrolytique peuvent être distingués principalement en fonction de leur niveau de température:

- ✓ Pyrolyse à basse température $400 - 600^\circ C$.
- ✓ Pyrolyse à moyenne température $600 - 1000^\circ C$.
- ✓ Pyrolyse à haute température $1000 - 2000^\circ C$.

Les principes techniques pour la pyrolyse de bas et moyenne température sont les mêmes à cause de la cinétique de réaction similaire. Les sous produits formés sont en général:

- Des poussières, composées principalement de noir de carbone. Ces poussières sont les plus faciles à traiter qu'en incinération car elles sont moins fines (à cause des températures modérées) et plus concentrées (volume gazeux limités).
- Des gaz: constitués essentiellement de H_2 , CH_4 , CO et CO_2 . Ces gaz sont combustibles et leur pouvoir calorifique se situe entre 3000 kcal/Nm^3 et

5000 kcal/Nm³. Il ne contient pas d'oxyde d'azote du fait des températures modérées et l'atmosphère fortement réductrice des conduites en pyrolyse. Une composition typique en conduite de dégazage serait par exemple : H₂=54%, CO=10%, CH₄=10%, C_nH_m=2%, CO₂=23%, N₂=1%.

- Un résidu huileux, composé principalement de produits organiques partiellement oxydés (acides, alcools, esters...). Ce résidu appelé « huile pyrolytique », est combustible, mais doit subir un traitement d'épuration pour le débarrasser des produits corrosifs soufrés et chlorés qu'il contient. Il peut être utilisé pour réaliser l'apport endothermique de la réaction de pyrolyse, ou valorisé séparément.
- Un résidu solide – coke de pyrolyse. Ce résidu contient un substrat minéral issu de la partie non organique des déchets et une fraction organique carbonée. Ce résidu peut être utilisé comme combustible solide, après épuration ou transformé en charbon actif.

En fonction du niveau de température de la pyrolyse on pourra déplacer la répartition pondérale de produits de pyrolyse, voir tableau 2.

On a observé que le temps de séjour du produit dans l'installation, la température et la vitesse de chauffe influencent le rapport entre la fraction gazeuse et la fraction solide des produits de pyrolyse:

Tableau 2. La répartition pondérale de produits de pyrolyse

Température de traitement	Gaz [%]	Liquides [%]	Solides [%]
480°C	12,35	61,08	24,71
920°C	24,35	58,07	17,67

Source: Antonini, G. & Gislais, P.

- Temps de séjour faible, vitesse de chauffe et température importante (jusqu'à 650°C) réduisent la fraction du coke et augmentent la phase gazeuse.
- Temps de séjour élevé, vitesse de chauffe et température faibles (450°C) augmente la fraction solide et diminuent la quantité des gaz dégagés.

La pyrolyse basse température peut être conduite aussi sous vide [5]. Dans ce cas, l'extraction continue des gaz par une pompe à vide permet de minimiser les réactions secondaires telles que: repolymérisation, recondensations, oxydations etc.

Ceci conduit alors à maximiser la production en huile pyrolytique au détriment des résidus solides.

L'intérêt de ce type de procédé est de produire un combustible stockable et transportable. De plus, l'absence d'oxygène limite la formation de NO_x, de dioxines et de furanes.

2.4. La gazéification

La gazéification a été découverte indépendamment en France et en Angleterre en 1798 et à partir de 1850 la technologie a été développée dans la manière que l'éclairage public à Londres est devenue possible (en utilisant le « town gas » provenant du charbon). La technologie a traversé l'Atlantique et en 1920 la plus part des villes américaines ont été approvisionnées avec du gaz pour le cuisiné et l'éclairage des rues à l'aide des réseaux locaux « gas-works ».

Les réacteurs de gazéification sont des équipements relatifs simples. La partie mécanique de leur opération et l'alimentation et l'évacuation du gaz produit est aussi simple. Mais l'opération des gazéificateurs ce n'est pas très simple. Ils n'existent pas des règles bien définies parce que la thermodynamique d'opération des réacteurs n'est pas bien connue. Encore des principales thermodynamiques approximatives gouvernent la température, l'alimentation d'air et autres paramètres du fonctionnement. Le procédé de gazéification convertit les déchets liquides ou solides en gaz de synthèse qui convient pour l'usage dans la production d'électricité ou à la fabrication des produits chimiques, de l'hydrogène ou de carburants. Actuellement, la gazéification est largement déployée dans le monde entier et dans beaucoup de configurations industrielles. Il existe 128 plans avec 366 gazéificateurs opérationnels.

La gazéification possède beaucoup d'attributs positifs, comparés aux autres technologies, qui ont aidé à stimuler le marché actuel. La gazéification est la seule technologie qui offre des avantages ascendants et descendants. Toutes les matières de base de carbone y compris les pertes dangereuses, les déchets solides et la boue d'épuration municipale, la biomasse etc., peuvent être aisément gazéifiées après une préparation appropriée pour produire le gaz de synthèse propre. En raison de sa capacité d'utiliser les matières de base peu coûteuses, la gazéification est la technologie choisie pour beaucoup d'applications industrielles comme dans les raffineries.

La centrale à gazéification intégrée dans des cycles combinés et le procédé de gazéification sont également la seule technologie avancée de production d'électricité capable de la coproduction d'une grande variété de produits de meilleure qualité, en plus de l'électricité, pour satisfaire de futurs besoins du marché.

La gazéification du produit procède principalement par l'intermédiaire d'un processus en deux étapes, pyrolyse suivie de la gazéification. La première étape, également connue sous le nom de devolatilisation, est endothermique et produit 75 à 90% de matières volatiles sous forme d'hydrocarbures gazeux et liquides. La température de cette étape ne dépasse pas 600°C. Dans la deuxième étape qui est la gazéification, le carbone obtenu lors de la pyrolyse réagit avec les vapeurs d'eau,

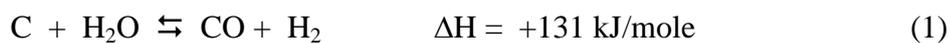
oxygène pure ou air, selon la technologie utilisé. La gazéification sous vapeurs d'eau est connue comme « reforming » et les produits résultants sont en principal l'hydrogène et le dioxyde de carbone. Dans la plus part des applications les réactions exothermiques entre le carbone et l'oxygène fournissent l'énergie (chaleur) nécessaire pour le déroulement du processus de pyrolyse et la gazéification du coke résultant. Cette méthode est nommé pyro-gazéification intégrée et possède un rendement énergétique mieux par rapport à la solution séparée de pyrolyse sur un site et la gazéification du coke résultant sur un autre site.

Il y a des technologies qui utilisent une combustion partielle en bas du réacteur. Dans ce cas, un appoint calorifique est obtenu en bas de gazéifieur par des fumées chaudes oxydantes issues d'une post combustion, ou par un chauffage par plasma, ou même par l'introduction d'un mélange métal - oxygène. Cette technologie permet une gestion des cendres en cendres fondues, permettant la vitrification en continu des résidus ultimes.

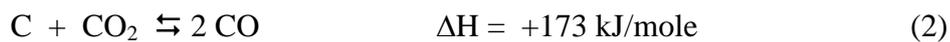
Aspects théorétiques et réactions mises en jeu

En pratique, les réactions de l'oxygène et de la vapeur d'eau sur les composés carbonés n'interviennent de façon notable qu'après que ces composés aient été décomposés par pyrolyse. Les hydrocarbures et le charbon volatils sont convertis en syngas dans la deuxième étape, gazéification. Les réactions principales impliquées dans cette étape sont énumérées ci-dessous. En général, les principales réactions de gazéification sont:

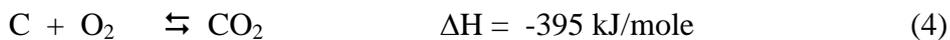
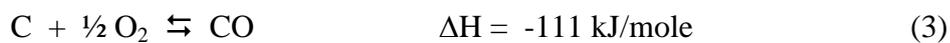
Réaction de gazéification par la vapeur d'eau



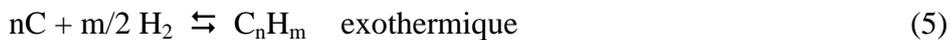
Réaction de BOUDOUARD



Réaction de gazéification par l'oxygène



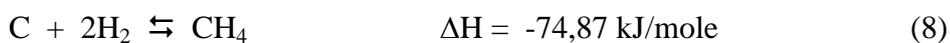
Réaction de formation d'hydrocarbures



Réaction shift



Réaction de formation du méthane



Suivant la nature de l'agent de gazéification utilisé et de son débit certaines de ces réactions prendront plus ou moins d'importance et pourront influencer sur la composition du gaz produit.

Dans le cas de la gazéification de l'oxygène ou à l'air, l'énergie nécessaire aux réactions endothermique est apportée par l'exothermicité des réactions (3) et (4). Nous constatons qu'à la pression atmosphérique et pour des températures supérieures à 800°C, la réaction de formation du méthane (8) est quasiment négligeable. Par contre, si la pression augmente, l'enrichissement en méthane devient notable au détriment des deux autres réactions.

Aspect thermodynamique

Selon le principe de LECHATELLIER, une augmentation de la pression entraîne une évolution du système dans le sens de la diminution du nombre de moles gazeuses. Ainsi, une pression élevée défavorise les réactions (1) et (2) mais favorise la production du méthane suivant les réactions (5), (6) et (8).

Conformément à la loi de VANT'HOFF, la formation des produits dans les réactions endothermiques est favorisés par l'augmentation de la température. Par contre la formation des produits dans les réactions exothermiques est défavorisée par l'augmentation de la température, c'est à dire (5), (6) et (7). Si l'on s'intéresse à l'obtention d'un gaz riche en CO et H₂ en vue de synthèse chimiques, on a intérêt à opérer à basse pression et à température élevée. Par contre, 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 chimiques

Aspect cinétique

La gazéification de la des déchets solides est la résultante de nombreuse réaction chimique faisant intervenir ou ne faisant pas intervenir le carbone. Les constantes de vitesse de chacune de ces réactions sont différentes. De plus, pour les réactions où le carbone intervient, deux phénomènes supplémentaires peuvent modifier ces constantes, l'un lié à la température, l'autre à la nature et la quantité des impuretés:

- ✓ Suivant la porosité et la taille des particules de charbon, la taille des molécules des réactifs et des produits gazeux et la température, ces réactions peuvent s'effectuer soit en régime chimique à basse température, soit en régime diffusionnel interne à température plus élevée.
- ✓ Selon la quantité et la nature des impuretés contenues dans l'échantillon charbonneux, l'effet catalytique sur les réactions sera plus ou moins élevé. En outre, pour deux réactions différentes, l'effet catalytique d'une impureté donnée peut varier dans une grande mesure.

3. Avantages et inconvénients des procédés

3.1. Les avantages / inconvénients de l'incinération

La valorisation énergétique provient du simple fait que la matière brûlée à haute température génère une chaleur qui peut être récupérée. L'équivalent énergétique d'une tonne de biomasse 300 litres de fuel ou 4600 kWh par tonne [6], [7], [8].

- Efficacité: brûler les déchets ligne - cellulosique permet de réduire leur volume de plus de 90 % et la masse d'environ 80%
- Souplesse: les unités de combustion / cycle à vapeurs s'adaptent à tous les types de biomasse;
- Possibilité d'être co-combustionné avec des combustibles fossiles.

Parmi les inconvénients majeurs on trouve [9]:

- Les capacités élevées des installations (au moins 100000 t/an) pour une efficacité économiques des unités.
- Une flexibilité réduite de fonctionnement à charge partielle.
- Les volumes importants des fumées libérées : $8000 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{biomasse}}$
- Les hautes températures de combustion ont comme résultat une granulométrie très fine des cendres qui sont entraînées dans les envols.
- Les composants chlorés et les dioxines pour les déchets contenant du chlore.

3.2. Les avantages / inconvénients de l'incinération

Le volume des effluents gazeux issus des procédés de pyrolyse est nettement inférieur à celui d'une opération d'incinération conventionnelle [9]:

- Pyrolyse – $3000 - 4000 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{déchet}}$
- Incinération – $8000 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{déchet}}$
- Le taux d'envols est très inférieur par rapport à l'incinération. Par exemple un simple multi - cyclone permet d'atteindre des teneurs en cendres volantes de $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, ce qui ne peut normalement être atteint que par filtration électrostatique dans l'incinération. Ça s'explique par la granulométrie supérieure des particules entraînées en pyrolyse.
- émission de gaz carbonique (principal responsable de l'effet de serre) réduite,
- les dioxines sont totalement éliminées (absence d'oxygène, captage du chlore) [3],
- rejet atmosphérique largement inférieur aux limites des directives Européennes.

Les avantages techniques concernent la:

- diversité des déchets admis,
- souplesse d'exploitation, supporte des variations de charge de 25 à 125 %,

- unités de pyrolyse modulables, elles peuvent être adaptées pour valoriser des quantités de 10.000 à 50.000 tonnes par an,
- possibilité de combiner plusieurs unités de pyrolyse simple avec une unité de pyrolyse intégrée. Cette dernière valorisera la masse carbonée des unités de pyrolyse simple si cette valorisation n'est pas réalisable dans l'industrie.

Coût d'une unité de pyrolyse simple est le tiers du prix d'un incinérateur classique.

Coût d'une unité de pyrolyse intégrée à la gazéification est à peu près identique à celui d'un incinérateur.

Leurs avantages environnementaux incontestables par rapport à l'incinération concernant les émissions gazeuses, les dioxines et les métaux lourds (pour les déchets urbains) et aussi le rendement plus élevés de conversion en électricité (quand sont couplés avec un cycle thermodynamique) d'environ 30% (par rapport à 20% en incinération) sont les promoteurs pour le secteur énergétique de valorisation de la biomasse et déchets assimilés.

Les inconvénients de la pyrolyse concernent:

- L'utilisation des résidus carbonés. La pyrolyse ne constitue pas un traitement total des déchets, mais un traitement partiel qui débouche sur un combustible solide. La pyrolyse doit donc être conçue en amont d'une unité industrielle existante capable d'utiliser ce combustible.
- L'aspect juridique. Les installations qui brûlent le résidu carboné provenant des déchets urbains ou industriels doivent donc respecter les normes des installations qui traitent les déchets, et les cendres provenant de sa combustion seraient aujourd'hui stockées en décharges de classe I ce qui ajoute au coût.

Une solution sera l'implémentation de la technologie intégrée pyrolyse – gazéification pour la conversion en gaz de synthèse du résidu solide.

Ce gaz peut être après utilisé sans aucune restriction soit dans des installations pour la production d'énergie électrique soit dans le secteur du transport pour l'alimentation des moteurs.

3.3. Avantages / inconvénients de la gazéification

En principe les avantages de la pyrolyse on les trouve aussi en gazéification [9, 10].

- Concernant les types de biomasse susceptibles d'être traités par ce processus - tous les déchets organiques sont traitables en gazéification.

- La possibilité d'atteindre des températures élevées permet une bonne efficacité de destruction.
- En plus, contrairement à la pyrolyse, la fraction solide résiduelle est minimisée en gazéification.
- La plupart des procédés de pyrolyse / gazéification sont basés sur des fours verticaux. Au coté du type de réacteur, le mode de conduite en gazéification présente l'avantage de minimiser les résidus solides, avec possibilité de fusion complète, sous forme d'un laitier. Ce laitier ne représente que 5% en volume seulement de la quantité de déchets traités.
- Le traitement des effluents est en général conventionnel à part la nécessité de traiter des volumes plus importants de fumées, souvent fortement chargées (le cas des lits fluidisés), par rapport à la situation rencontrée en pyrolyse.
- Par exemple, les volumes fumigènes typiques sont ici d'environ 5000 Nm³/t_{déchet}, à comparer aux 2000 – 3000 Nm³/t_{déchet} en pyrolyse [19]. Ces volumes restent cependant inférieurs aux volumes dégagés par incinération classique – 6000 Nm³/t_{déchet}. Ces effluents gazeux peuvent aisément être traités par post-combustion. Ils peuvent également être épurés pour fournir une source d'énergie primaire sous forme de gaz combustibles. Une fraction est réimportée dans le procédé.
- Les quantités d'effluents aqueux (refroidissement, scrubage, quench) varient entre 0,4 et 2 m³ par tonne [9].
- Compte tenu des températures atteintes dans les processus de pyrofusion, la possibilité de fondre les cendres est susceptible de conduire à des granules vitrifiés peu lixiviables, très denses (densité de 2,8 à 3) et pratiquement exempts d'imbrûlés.

Les inconvénients de la gazéification concernent:

- Les concentrations en oxyde d'azote dans les effluents gazeux sont nettement plus élevées qu'en incinération classique, compte tenu des températures atteintes et de la présence d'air [11].
- De plus la nécessité de résistance des équipements à haute température augmente les frais d'exploitation. Les investissements correspondants sont en général également plus élevés qu'en incinération classique.
- Enfin, la complexité accrue des opérations requiert un personnel plus qualifié.
- L'apport complémentaire de combustibles s'avère souvent nécessaire pour atteindre la haute température. Cet appoint est en général fourni par un brûleur au gaz naturel.

-
- De même, un fort taux de poussière (en moyenne 5g/Nm^3) conjugué à une température élevée des gaz en entrée de chaudière récupératrice a provoqué des colmatages importants au niveau des surchauffeurs [12].

4. Étude sur la cinétique de dévolatilisation de la biomasse

Pour la quantification des cinétiques de dévolatilisation nous avons réalisé des essais de perte de masses dans un four à moufle utilisant des creusets en silice. Pour simuler la pyrolyse, les creusets sont couverts avec un chapeau également en silice pour recréer l'atmosphère réductrice (absence d'oxygène) de la pyrolyse. Trois températures (540°C, 700°C, 1100°C) pour la pyrolyse ont été testées afin de mieux appréhender les phénomènes (figure 2).

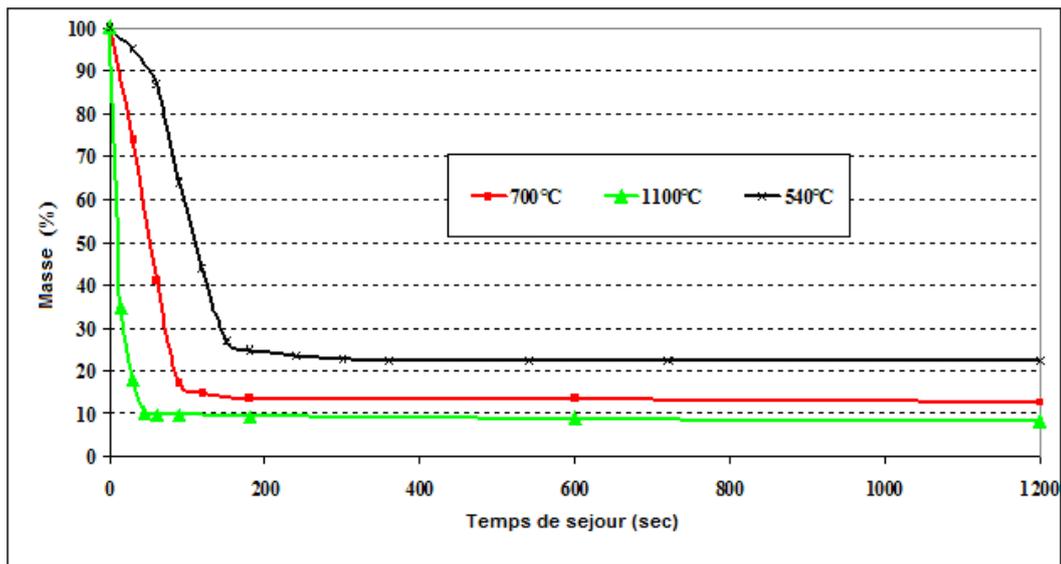


Fig. 2. La dégradation thermique de l'échantillon de biomasse de pin pendant la pyrolyse

On voit bien sur les deux schémas que la température accélère les cinétiques de perte de masse. Pour un temps infini, les écarts de rendement entre les différentes températures de pyrolyse deviennent moins importants.

Les courbes mettent bien en évidence les écarts de temps de séjour entre la pyrolyse basse et haute température. Ainsi à 1100°C, le processus pyrolytique est presque terminé au bout d'un minute, alors qu'à 540°C, le processus se fini au bout de 3-4 minutes.

On peut également voir que les courbes à 700°C sont beaucoup plus proches de la courbe à 1100°C que celles à 540°C. Un traitement pyrolytique à 700°C se rapproche donc plus d'un traitement haute température et court temps de séjour. Ca peut être expliqué par le comportement des liaisons C-C qui commencent à être rompues à la surface du produit à partir de 500°C [2]. Pour ça on attend le coke de pyrolyse obtenue à 700°C être similaire au coke obtenue à 1100°C.

En utilisant la variation de la fraction combustible du déchet et une fonction de premier degré pour la cinétique nous pouvons calculer l'énergie d'activation E_a

qui corresponde au produit analysé. Dans le modèle on considère que la fraction combustible est constitué du carbone fixe est substances volatiles.

$$\frac{dm}{dt} = -k \times [m(t_s) - m_c] \quad (9)$$

$$m(t_s) = m_c + (m_0 - m_c) \times e^{-kt_s} \quad (10)$$

ou:

$m(t_s)$ – le contenue en matière combustible après le temps de séjour t_s ;

m_c – le contenue en carbone fixe;

m_0 – la fraction de matière combustible initiale;

k – le coefficient de variation de vitesse.

Les courbes de variation du taux de matière combustible pendant la pyrolyse à 540°C et 700°C fournissent deux fonctions de variation avec deux coefficients de vitesse k_1 , k_2 et la même énergie d'activation E_a (équation 11).

$$k_1 = k_0 \times e^{-\frac{E_a}{RT_1}} \quad (11)$$

En égalant les deux équations écrites pour 540°C et 700°C résulte l'énergie d'activation en fonction des températures de traitement T_1 et T_2 (équation 12). La valeur obtenue est caractéristique au produit $E_a = 198$ kJ/mol et peut être vérifiée par l'intermède de la troisième courbe pour la pyrolyse à 1100°C.

$$E_a = R \ln \frac{k_1}{k_2} \times \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \quad (12)$$

Dans l'expression de l'équation pour la variation de masse (10) nous avons considéré un coefficient de correction du temps pour prendre en compte le délai introduit par la période de séchage avec une cinétique différente du processus de dévolatilisation.

5. Conclusions

Les systèmes standards pour la valorisation énergétique par voie thermique de la biomasse et autres déchets assimilés qui ont opéré avec succès jusqu'au présent sont menacés par de nouvelles technologies et concepts déjà disponibles, mais qui n'ont pas été encore validées sur une assez longue période. Jusqu'à ce moment la gazéification quelque soit technologie utilisée semble la plus efficace pour conversion en énergie électrique.

Par rapport à la chaîne de conversion en énergie du déchet elle peut être considérée l'alternative viable et beaucoup moins polluant à l'incinération. Produisant une quantité importante de hydrogène, cette technologie représente aussi la interface entre la valorisation des déchets et la production d'électricité dans les piles de combustion.

En ce qui concerne la pyrolyse on doit tenir compte que c'est une technologie de liaison entre l'augmentation du potentiel énergétique de la biomasse et sa conversion en énergie. Cette interface est nécessaire en spécial pour les déchets assimilés à la biomasse ou imposé par raisons économiques et politiques énergétiques.

Le coke résultant en ce cas représente un combustible quasi - propre mais dans le même temps un sous déchet qui peut être, au choix, brûler ou gazéifié selon une série des facteurs en principal économiques et d'environnement. Pour la maximisation du carbone fixe contenu dans le coke.

La complémentarité et la complexité des solutions pour la conversion énergétique par voie thermique, imposent une analyse détaillée et ponctuelle pour une éventuelle implémentation dans les conditions spécifiques de l'emplacement.

Dans le même temps au niveau national il y a besoin d'une stratégie globale pour la valorisation énergétique zonale de la biomasse intégrée au traitement des déchets solides assimilées (ménagères, déchets de l'agriculture etc.) dans le contexte présent de la politique communautaire: énergie – environnement.

REFERENCES

- [1] Bajeat, P. « *L'incinération des déchets ménagères et assimilés* », Textes des intervenants de la journée d'information sur l'incinération performantes des déchets ménagères et assimilés, Sète, 1994.
- [2] Garcia, A.N., Font, R. & Marcilla, A., *Kinetic Studies of the Primary Pyrolysis of Municipal Solid Waste in a Pyroprobe 1000*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 23,1992, p. 99-119.
- [3] Li, A.M., Li, X.D., Li, S.Q., Ren, Y., Shang, N., Chi, Y., Yan, J.H., & Cen, K.F., *Experimental Studies on Municipal Solid Waste pyrolysis in a Laboratory-Scale rotary Kiln*, Energy 24,1999, p. 209-218.
- [4] Rath, J. & Staudinger, G., *Cracking Reactions of Tar from Pyrolysis of Spruce Wood*, Fuel 80, 2001, 1379-1389.
- [5] Roy, C., De Caumia, B., Pakdel, H., Plante, P. « *Une Solution au Traitement des Déchets : la Pyrolyse sous Vide* » Proceeding 5th Conference AQME, 11-13 April 1991, Château Ste Anne, Québec.
- [6] Wilkins, E.S., Wilkins, M.G. « *Review of Toxicity of Gases emitted from Combustion Pyrolysis of Municipal and Industrial Wastes* » Environ. Sci. Heath, A2O (2), p. 149-175, 1997.
- [7] Freeman, H. « *Innovative Thermal Processes for the Destruction of Hazardous Wastes* », Incineration of Hazardous Wastes, Ed. Technomic, USA, 1993.
- [8] Tchobanoglous, G. « *Integrated solid waste management* », Mc Grow Hill, 1993, 954 p.
- [9] Agence Européenne de l'Environnement « *Management des déchets municipaux en Europe* », Sujet du rapport No 15/2001
- [10] Antonini, G. & Gislais, P. « *Traitement thermique des déchets industriels* », Technique & Documentation, Lavoisier, 1995, 143 p.
- [11] Dario, M. « *Municipal Solid Waste gasification reactions for H₂ generation* », State of the Art, Michigan State University, 2004.
- [12] Klein, A. « *Gasification an alternative process for energy recovery and disposal of municipal solid waste* », M.S. Thesis, Columbia University, 2002.
- [13] Buekens, A.G. & Schoeters J.G. « *European experience in the pyrolysis and gasification of solid wastes* », Conservation & Recycling Vol.9, N°3, 1986, p. 253-269.