

Traitement du bois par une torche plasmatisque hybride Analyse du procédé

Ing. H. GRANDJEAN
Dr M. HRABOVSKY
Ir C. CHARLIER
GRAMME – Liège

Ce travail n'est qu'une étape dans l'utilisation potentielle des torches plasmatisques dans le traitement des déchets car la mise en place d'un procédé à grande échelle nécessite encore bien d'autres études. Actuellement, l'utilisation d'un tel réacteur est au stade pilote dans le projet envisagé et elle est l'étape nécessaire pour une mise au point et une étude poussée des paramètres de fonctionnement. La maîtrise des bilans matière et énergie sur base de mesures est un des principaux objectifs du présent travail.

Mots-clefs : traitement des déchets – plasma – torche – gazéification – procédé – bilan matière – bilan énergie.

This work is just a step in the potential use of plasma torches in waste treatment because the setting up of a process on a large scale indeed needs further studies. The use of such a reactor is currently at a pilot phase in the considered project and it is the necessary step for a tuning and an advanced study of on measurement basis is one the operation parameters. The control of the mass and energy balances of the main goals of the present work.

Keywords : waste treatment – plasma – torch – gasification – process – mass balance – energy balance.

1. Introduction

Ainsi que le précise le résumé, ce travail ne constitue qu'une modeste étape intermédiaire principalement orientée vers une maîtrise des bilans matière et surtout énergétiques du réacteur plasmatique. Sur base des mesures obtenues sur le réacteur-pilote, il s'agit d'évaluer de manière fiable les rendements énergétiques et d'assurer un contrôle des matières entrantes et sortantes. Une bonne connaissance de la composition du gaz obtenu est également attendue car celui-ci possède des qualités intéressantes pour des utilisations ultérieures.

Afin de mieux situer le contexte, il est intéressant de faire remarquer que ce projet ou plutôt l'idée de projet a démarré vers 2003 sous l'instigation de M. Félicien Absil, ingénieur industriel à la retraite qui avait une bonne expérience des torches plasmatiques. Ce dernier a déposé un brevet intégré permettant la destruction de déchets par une torche plasmatique suivi d'utilisations diverses du mélange gazeux obtenu. Ces utilisations sont chimiques, pour la production de méthanol ou énergétiques, pour la production d'électricité, voire de vapeur. La possibilité de traiter le gaz carbonique comme déchet industriel est également envisagée.

Ce dernier a par la suite recherché des partenaires pour le soutenir aussi bien dans ses réflexions techniques que dans les moyens financiers à envisager pour assurer les diverses étapes qui mènent progressivement au développement d'un procédé industriel.

Sans entrer dans les détails, il convient de dire que l'université de Gand est un partenaire de ce projet par l'intermédiaire du professeur Guido Van Oost considéré comme spécialiste belge des techniques plasmatiques. L'institut Gramme apporte son expertise et sa connaissance dans les bilans de procédés chimiques ou énergétiques ainsi que leur validation sur base de mesures expérimentales. La société EnviTech, société basée en Flandres, a été séduite par le projet et apporte les moyens financiers nécessaires pour les premières étapes. Un des buts était notamment de construire un procédé pilote de traitement à Ostende (actuellement en cours). L'institut de plasma physique de Prague constitue le dernier partenaire d'importance. Le professeur Hrabovsky est considéré comme un des grands spécialistes des torches plasmatiques et l'étude du réacteur-pilote est réalisée dans son institut.

La construction du réacteur de taille pilote a été un réel challenge au niveau du dimensionnement et sa mise au point a été et est plus longue que prévue. Le travail a été notamment suivi par un étudiant de l'institut Gramme en 2004–2005, M. Denis Dupriez. Il s'agissait surtout de faire fonctionner l'installation, d'assurer sa stabilité et mettre au point la prise de mesures ainsi que leur analyse.

Par la suite, lorsque le temps de fonctionnement du réacteur a pu être augmenté à des valeurs permettant la stabilité du procédé et donc à la prise de mesures plus correctes, il est devenu envisageable d'approfondir la maîtrise des divers bilans d'un procédé chimique. Le présent travail s'est attelé à cette tâche et il a eu lieu en 2006–2007. Il s'agit aussi d'étudier les paramètres d'influence du réacteur, amenant notamment à une amélioration de son fonctionnement.

L'année scolaire précédente n'a pas vu de travaux de fins d'étude car il s'agissait d'une année de transition. Compte tenu de la réforme des études d'ingénieurs industriels et du passage à cinq ans, il n'y a pas eu d'année finale, c'est-à-dire de Master 2, qui débouchait sur ce type de travaux. Cette année académique 2008–2009 devra normalement permettre à des étudiants qui vont partir réaliser leur travail de fin d'études à l'institut de plasma physique de Prague, de poursuivre les recherches sur le réacteur pilote afin d'en continuer le développement.

Ce projet s'inscrit parfaitement dans le contexte environnemental parce qu'il propose et étudie des méthodes alternatives à l'incinération ou la pyrolyse classiques pour le traitement de déchets très divers, comme la biomasse ou le dioxyde de carbone. La biomasse est d'ailleurs utilisée comme modèle de déchets pour les premiers essais.

Les paragraphes suivants proposent donc quelques explications sur la physique du plasma et sa mise en œuvre dans un réacteur de taille pilote assimilable à un réacteur de pyrolyse. L'étude du bilan matière est d'abord réalisée pour concevoir un modèle réactionnel approprié afin de maîtriser les substances en présence. Cela doit ensuite permettre d'aborder le bilan énergétique afin surtout d'évaluer correctement les rendements pour les comparer à ceux d'une méthode classique de traitement de déchets.

Il est clair qu'il existe déjà plusieurs procédés de traitement interprétables comme des gazéifications potentielles de déchets de type biomasse mais une

des originalités de celui-ci réside dans l'utilisation d'une torche plasmatisque dont le paragraphe suivant aborde les principes.

2. Introduction à la physique plasmatisque

Le plasma est considéré comme un quatrième état de la matière. Historiquement, il aurait été mis en évidence par Sir William Crooke dans un tube à décharges électriques. Il est donc mis en œuvre dans des champs électriques ou magnétiques importants.

Le plasma est considéré comme un gaz ionisé où des particules ioniques et des électrons sont en mouvement libre. Ceci implique une température très élevée afin d'extraire les électrons des atomes ou des molécules. La figure suivante illustre les propos et permet de fixer quelques ordres de grandeur.

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Exemple Ice H_2O	Exemple Water H_2O	Exemple Steam H_2O	Exemple Ionized Gas $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ $T > 10$ electron Volts
			
Molecules Fixed in Lattice	Molecules Free to Move	Molecules Free to Move, Large Spacing	Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing

Figure 1 : Comparaison des états de la matière

Le soleil, les éclairs ou autres étoiles sont autant d'exemples naturels de la présence de plasmas, que l'on range à côté de ceux qui sont créés par la technique moderne. Ces derniers sont décrits par deux paramètres clés.

2.1 Le degré d'ionisation

Ce degré se définit comme la proportion d'atomes qui ont perdu, voire gagné des électrons. Si le gaz contient 1% de particules ionisées, il est considéré comme ayant les caractéristiques d'un plasma. Le degré d'ionisation est mesuré par spectrographie (réf. 3 et 4).

2.2 La température

C'est probablement le paramètre le plus important et celui qui influence principalement le degré d'ionisation. Il s'agit de la température des ions et particules neutres ainsi que celle des électrons. Elles peuvent être différentes. Le plasma est dit froid et en non équilibre thermique si la température des électrons est supérieure à celles des autres particules, ils sont alors seuls réellement actifs.

Si les températures sont semblables, il y a équilibre thermique, les ions sont également actifs et l'énergie nécessaire pour parvenir à cet état est bien plus importante. Pour évaluer celle-ci, l'équation de Boltzmann $E = k_B T$ est utilisée, k_B représentant la classique constante de Boltzmann.

La figure suivante synthétise les divers types de plasma rencontrés et met en évidence la liaison entre les précédents paramètres.

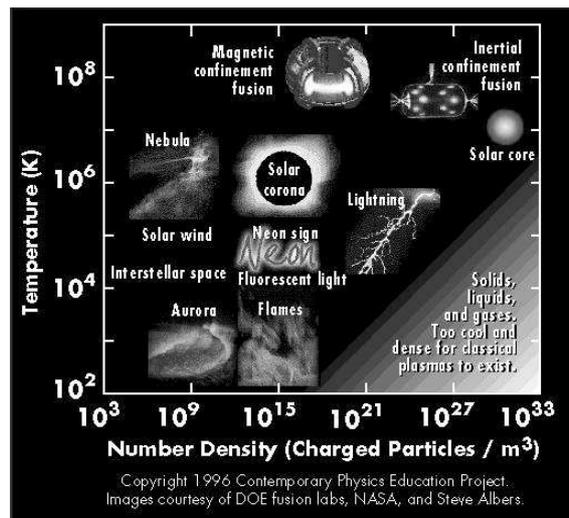


Figure 2 : Types de plasma, température – degré d'ionisation

Bien entendu, plus la température est élevée, plus le degré d'ionisation risque d'être élevé, et de même plus élevée sera l'énergie nécessaire pour le créer.

2.3 Applications des plasmas

Cette technique est considérée par beaucoup comme celle du XXI^{ème} siècle car ses applications sont fortement liées aux progrès technologiques. Il ne s'agit pas d'être exhaustif mais il est important de mentionner au moins les projets sur la fusion nucléaire, comme le projet ITER qui représente un des défis énergétiques majeurs de demain.

Des applications comme le soudage, la projection, etc., viennent s'ajouter au traitement des déchets. Dans ce dernier cas, des avantages résident dans la possibilité du traitement du gaz carbonique allié à une réduction de son émission ainsi que dans la production d'un gaz de synthèse fort pur et énergétique. Par contre, des désavantages se trouvent dans le besoin d'une énergie importante pour l'ionisation et dans l'importance des infrastructures nécessaires pour ces réalisations.

2.4 Description d'une torche plasmatisque

Il s'agit surtout de décrire le type de torche qui est utilisé à l'IPP ou Institut de Physique des Plasmas de Prague. C'est une torche thermique hybride à arc non transféré dont le plasma est basé sur l'eau et l'argon. Elle travaille dans le domaine de température de 1000 à 10000 K et au-delà. La figure suivante en est l'illustration.

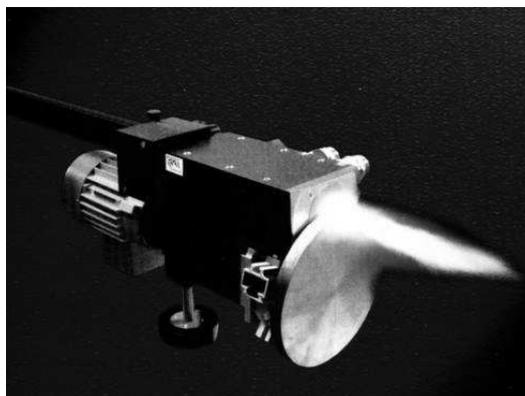


Figure 3 : Torche hybride de l'IPP

Les torches à arc transféré sont utilisées en soudage et l'anode (+) est la base pour le soudage. Dans le cas de la torche de la figure 3, l'anode en cuivre tourne sur elle-même et est constamment refroidie. Le but est de produire un flux plasmatique par un champ électrique intense. Compte tenu des températures élevées, la cathode est en tungstène. La figure suivante propose un schéma de principe de cette torche pour permettre de percevoir les différents flux de matière et leur rôle.

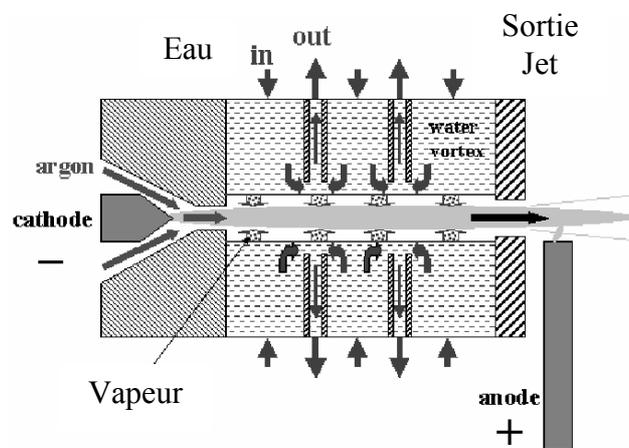


Figure 4 : Schéma de principe de la torche hydride de l'IPP

Le flux d'argon sert notamment à protéger la cathode, son bilan matière est assez difficile à maîtriser car les mesures sur cette substance sont les moins précises. L'eau remplit deux tâches. Elle doit servir de fluide de refroidissement du système et, par l'originalité de son contact direct, une partie de cette eau se retrouve dans le jet plasmatique. De nouveau, l'étude du bilan en eau sera délicate compte tenu de son double rôle et parce qu'il n'est pas facile de maîtriser la quantité qui ira dans le plasma.

Les températures sont élevées et le besoin énergétique important. Les tensions de travail sont de 220 V pour un courant de l'ordre de 450 A. Pour fixer les idées sur d'autres paramètres, précisons que les vitesses de jet plasmatique sont de l'ordre du km/s, soit de 1,5 à 4 km/s, par contre les densités du plasma sont très faibles, mille fois plus faible que celles des gaz.

2.5 Analyse théorique de la torche hybride plasmatique

La conception de la torche et les paramètres de fonctionnement ont été étudiés par le professeur Milan Hrabovsky et sont explicités dans la référence 4. Les formulations proposées relient les divers facteurs géométriques et opératoires. Ils servent de base pour l'étude et le fonctionnement de base de la torche. Ce sont principalement :

$$\eta = (1 + \xi_1 \frac{R^2 L}{G} \frac{\varepsilon_n}{h} + \xi_2 \frac{R^2 L S}{G h})^{-1}$$

$$U = \varphi I \left(\frac{1}{\eta} \frac{G L h}{R^2 \sigma} \right)^{1/2}$$

$$h = \varphi I \left(\eta \frac{L}{G R^2} \frac{h}{\sigma} \right)^{1/2}$$

Où η est l'efficacité de la torche en % (puissance disponible dans le jet plasmatique divisé par la puissance fournie à la torche),
 U est la tension de l'arc de la torche en volt,
 h est l'enthalpie moyenne du plasma en MJ/kg,
 L et R sont la longueur et le diamètre de la chambre à arc, en mètre,
 G est le débit de gaz plasmatique en kg/h,
 S est le flux de chaleur potentielle du plasma,
 ε_n est le coefficient net d'émission fonction des pertes par radiation,
 σ est la conductivité électrique en siemens,
 I est le courant utilisé pour l'arc en ampère,
 ξ , φ et ψ sont des facteurs géométriques adimensionnels dépendant de la forme et des profils plasmatiques.

Les paramètres comme R , L , G , U et I sont mesurables ou déterminés. Les facteurs géométriques sont propres au jet et au système envisagés. Leur influence est avérée. Compte tenu de données fondamentales comme σ et ε_n , les variables η , h et S sont déduites. Ces différentes équations permettent de comparer différentes torches dont le tableau suivant (réf. 4) résume les résultats.

Type de Plasma	Intensité I (A)	Puissance kW	Débit G (g/s)	Enthalpie h (MJ/kg)	T (K)	Efficacité η (%)
Ar/H ₂ (3,3)	500	25	0,98	15,3	10800	60
N ₂ /H ₂ (2,5)	500	200	5	24	6200	60
Eau	300	84	0,20	252	15800	60
Eau	600	176	0,33	320	17500	60

Il nous faut donc constater que la torche utilisant de l'eau engendre une enthalpie plasmatique (symbole de l'énergie) plus importante et qu'elle s'avère être parmi les plus intéressantes pour la gazéification de déchets comme la biomasse.

3. Description de l'installation pilote

La figure suivante propose un schéma complet du procédé plasmatique de traitement, ainsi que des mécanismes de mesures et de contrôle. Cette installation se trouve à l'Institut de Physique des Plasmas de Prague (IPP).

Elle est opérationnelle depuis le début de l'année 2004.

Le réacteur a été conçu et construit principalement par la société tchèque Ateko s.a. basée à Hradec Kralové.

L'installation a évolué au fur et à mesure des essais. Plusieurs parties ont été réaménagées comme l'alimentation ou le traitement des gaz après passage dans le réacteur.

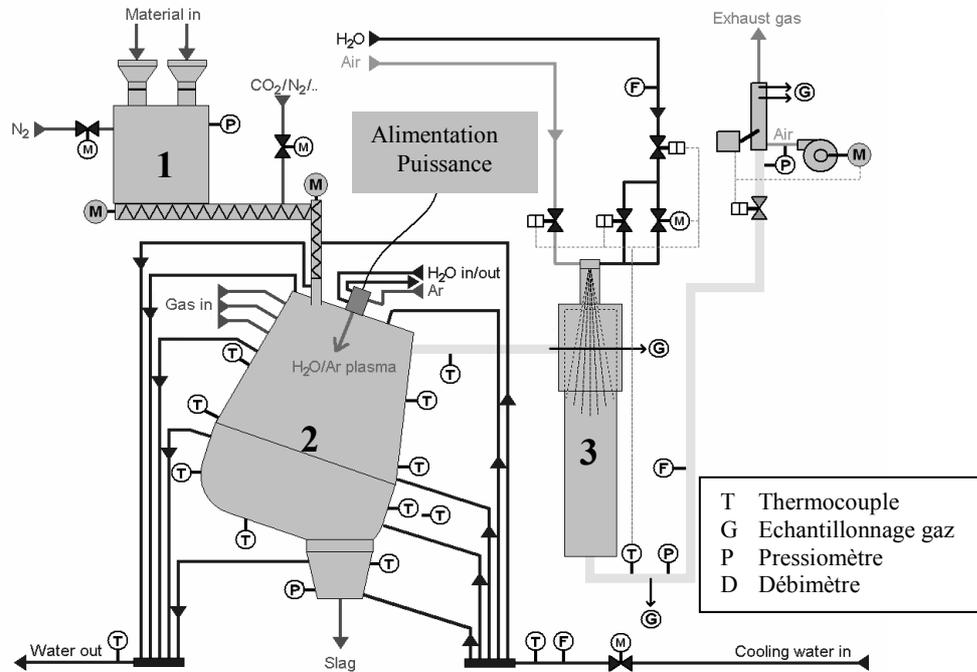


Figure 5 : Plan général du procédé IPP

Le repère 1 montre la zone de l'alimentation où la biomasse (les "déchets") est broyée, puis convoyée par une vis sans fin vers le réacteur repéré par 2. Celui-ci est refroidi par un circuit d'eau ("cooling water") et deux sorties sont nécessaires, une pour les gaz ("exhaust") et l'autre pour un déchet solide (lave ou minéraux lourds non oxydables ou "slag"). Précisons que la biomasse sera remplacée par du bois et que cela engendre peu de lave. En effet, dans ce contexte, ce seront surtout des particules de carbone. Le dernier repère 3, indique une zone de trempé afin de faire chuter rapidement la température et limiter les réactions de recombinaison qui diminueraient la présence d'hydrogène et de monoxyde de carbone qui sont considérés comme les gaz très valorisables. Signalons que ce gaz doit être brûlé avant son rejet compte tenu de l'aspect expérimental, ce qui ne sera pas le cas dans un procédé industriel.

3.1 Réacteur plasmatique

Le schéma suivant offre une description plus détaillée du réacteur-pilote (repéré par 2 dans le schéma précédent, fig. 5).

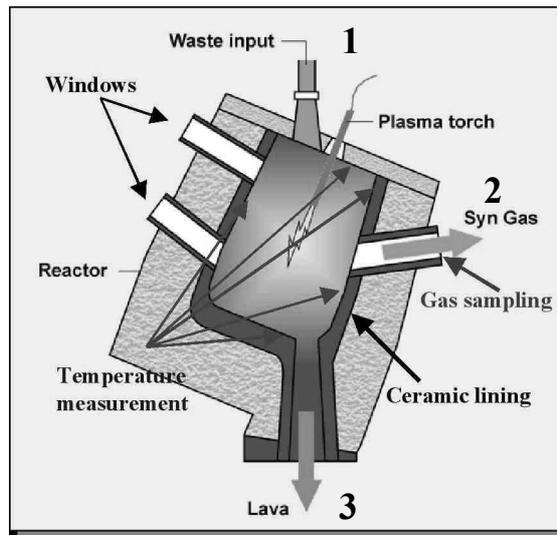


Figure 6 : Schéma du réacteur plasmatique

Ce réacteur a été conçu en 2003-2004. Il a été construit en 2004 et est devenu opérationnel dans le courant de l'année académique 2004-2005. La première étape a été d'assurer sa stabilité et surtout sa durée de fonctionnement. Pour le travail actuel, celle-ci était de 2 heures, ce qui permettait la collecte des mesures.

Ce réacteur-pilote est incliné pour des raisons de facilité d'évacuation et accueille les déchets par l'entrée repérée par 1 ("waste input"). Ceux-ci traversent la torche plasmatique ("plasma torch") à une température de plus de 10000 K et sont ionisés. La température régnant hors du jet plasmatique est un paramètre clé et peut être appelée température du réacteur. Elle est de l'ordre de 1473 K et elle est fortement liée à la composition du gaz de synthèse obtenu (ou Syn Gas, repéré par 2). Cela est abordé dans un paragraphe ultérieur.

Une deuxième sortie est prévue pour recueillir la "lave" ("lava" repéré par 3), des particules de carbone dans ce cas-ci. Il sera démontré qu'il faut en

tenir compte dans les bilans, même si les quantités ne sont pas très importantes.

La tenue de la céramique ("ceramic lining") s'est avéré être un point délicat, elle a dû être remplacée car les températures sont importantes. Par ailleurs, de nombreux instruments de mesures, décrits ci-après, sont disposés sur le réacteur.

En ce qui concerne les dimensions, le réacteur est cylindrique et le diamètre extérieur est d'un mètre environ pour un diamètre intérieur de 0,57 m. La hauteur intérieure est de 1,150 m pour un volume interne de 0,22 m³.

Son fonctionnement se fait à l'abri de l'air vu la grande réactivité des molécules obtenues comme l'hydrogène et le monoxyde de carbone. De plus, l'azote n'est pas intéressant à traiter dans ce cadre (obtention de NO_x).

3.2 Instrumentation de mesures

Les figures 5 et 6 servent de base pour un repérage éventuel des divers instruments de mesures dont on donne ci-après une description succincte, révélant surtout la complexité du système. Précisons que la pression est effectivement mesurée mais qu'elle n'est pas un paramètre très influent et que le réacteur est atmosphérique.

Mesure de la température

Il s'agit des températures pour le refroidissement et surtout de l'importante température dite du réacteur qui permet de maîtriser la composition du gaz obtenu. Ce sont essentiellement des thermocouples dont la précision est élevée. De nombreux thermocouples mesurent également la température du mur de céramique dans un but notamment préventif.

Mesure des débits

Cela concerne la mesure des débits totaux du gaz obtenu, qui est le mélange le plus important des mélanges à déterminer et des divers débits des fluides de refroidissement. Cela va des classiques tubes Pitot aux débitmètres à palettes. Leur précision (environ 5%) est moyenne mais satisfaisante pour les travaux actuels.

Mesure par caméra

Elle doit permettre d'observer la distribution spatiale des poussières de déchets dans le réacteur afin de la maîtriser. Il est préférable que cette distribution soit limitée pour des questions d'homogénéité réactionnelle. L'appareil est sensible au visible et aux infrarouges, il utilise les fenêtres ("windows" fig. 6) du réacteur pour effectuer ces mesures.

Mesure par spectrométrie

C'est un spectromètre de masse de type Balzer QMS 200, utilisé pour déterminer rapidement la composition du gaz obtenu appelé aussi gaz de synthèse (ou Syn Gas). Actuellement, il exclut l'utilisation de l'azote (non désiré de toute façon) car il ne peut être distingué du monoxyde de carbone. Il faudrait dans ce cas une chromatographie gazeuse. L'eau n'est pas détectable dans ce cas. La précision est bonne pour les gaz principaux, hydrogène et monoxyde de carbone.

Mesure par spectrographie

Principalement utilisée pour les mesures sur le plasma, à savoir la température et la densité électronique. Ces valeurs sont liées à l'énergie du plasma. Ces mesures sont considérées comme capitales pour le réglage du jet plasmatique (paragraphe 2.5).

4. Etude du bilan matière

Dans le cadre de l'étude, les expériences sont réalisées avec du bois, qui est le modèle utilisé pour représenter la biomasse ou les déchets car le but poursuivi est d'abord d'acquérir la maîtrise du fonctionnement, des phénomènes en jeu et des pistes d'interprétation. Par la suite, il conviendrait d'ajouter : établir un modèle adéquat pour le contrôle du réacteur et la prédiction de résultats.

De plus, ce bois sera, pour des raisons de simplifications, assimilé à la formule $C_6H_{10}O_5$ (formule approchée de la cellulose). Les formulations plus complexes étudiées n'ont pas apporté d'améliorations significatives dans l'actuelle interprétation des résultats. Les rapports H/C et O/C ne sont pas très éloignés de ceux rencontrés dans le bois naturel (H/C \approx 1,5 et O/C \approx 0,6) et la formulation s'est avérée acceptable comme modèle simplifié.

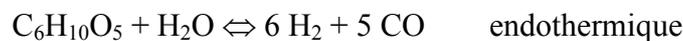
Signalons de nouveau que l'étude est aussi orientée vers une gazéification de la biomasse ou des déchets et que l'utilisation d'un plasma peut constituer une méthode alternative aux procédés classiques.

4.1 Analyse du système réactionnel

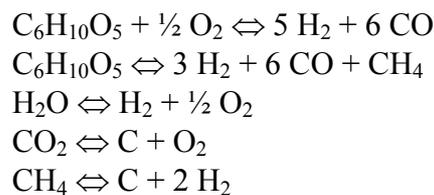
La détermination d'un système réactionnel est indispensable pour le contrôle des bilans matière où sont impliqués des changements chimiques de substance. Il est d'ailleurs basé sur les substances identifiables par leur formule chimique. Ce qui n'est pas aisé pour la biomasse et même le bois dont les compositions en substances de base ne sont pas simples à cerner.

Pour le traitement des bilans de matières avec réactions chimiques, le génie chimique apporte les outils nécessaires à l'analyse et aux calculs (par ex. réf. 8).

En accord avec une analyse rapide des résultats expérimentaux, l'équation globale suivante permet déjà de rendre compte des phénomènes d'obtention d'un gaz de synthèse :



Cependant, pour une analyse plus détaillée et un contrôle plus spécifique des diverses substances qui interviennent dans le procédé, cette équation chimique a dû évoluer vers le système réactionnel suivant :



Ce système a été déduit pour être en accord avec les résultats expérimentaux et avec les mesures obtenues dont les détails ne peuvent apparaître ici pour des raisons évidentes de confidentialité. Notons qu'il y a un excès de mesures mais qu'aussi bien en validation (toutes les mesures sont gardées et validées) qu'en simulation (certaines mesures sont écartées pour définir un système où il y a autant d'équations que d'inconnues), la cohérence satisfaisante des résultats obtenus corrobore le choix du système. Sans

toutefois révéler tous les résultats, les calculs et l'expérience s'accordent pour une proportion d'hydrogène de l'ordre de 30% et de CO de l'ordre de 60%.

En anticipant le paragraphe suivant, il peut être précisé que les réactions sont écrites dans le sens de la production de petites molécules répondant à l'hypothèse de gazéification. La 5^{ème} réaction se justifie par la présence de particules de carbone dans les résidus ("lave", revoir les fig. 5 et 6 de l'installation). Signalons encore que le rôle de l'eau est encore à éclaircir. La 3^{ème} réaction se présente en fait dans le sens opposé, vers la production d'eau, ce qui indique probablement un déficit d'eau. Les mesures sur l'eau ne sont malheureusement pas les plus précises, néanmoins cette conclusion semble plausible.

4.2 Etude et contrôle du bilan matériel

Le système réactionnel précédent sert donc de base à l'étude des bilans matière. La figure suivante propose un schéma général simplifié du réacteur afin de bien mettre en évidence les divers flux à envisager dans l'étude, flux pour lesquels des mesures sont possibles ou pour lesquels il faut obtenir des estimations.

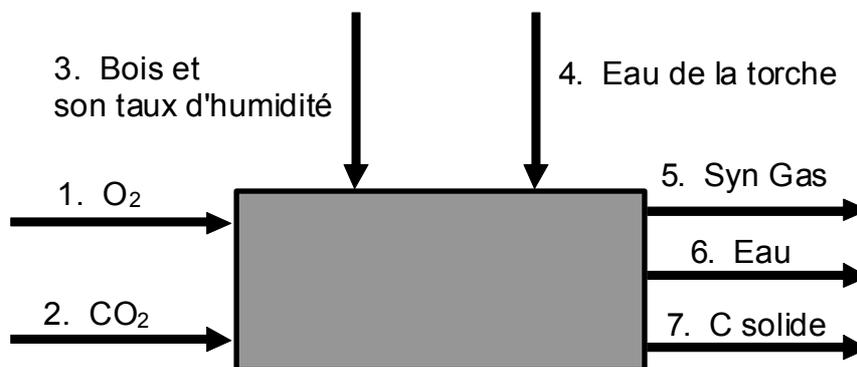


Figure 7 : Schéma général matière du réacteur plasmatique

Sans toutefois entrer dans tous les détails de l'évolution vers ce schéma, il faut noter que le bilan en argon n'est pas étudié par manque de fiabilité des mesures mais qu'heureusement, celui-ci est sans grande influence. Le bilan de l'eau ne tient pas non plus compte de l'eau de refroidissement et l'eau

considérée est celle qui est impliquée dans les réactions. En fait, cette dernière doit être évaluée vu le problème signalé dans un paragraphe précédent (voir 2.4) quant à la difficulté de connaître la part de l'eau allant dans le plasma.

Ce schéma matière allié au schéma réactionnel obtenu, permet quelques études théoriques qui doivent encore être vérifiées par expérience. Un des buts est de limiter, voire d'annuler la perte en carbone solide ("lave").

Il s'avère que l'eau étant déficitaire à première vue (calculs du paragraphe précédent), l'humidité contenue dans le bois (ou déchets) est considérée comme bénéfique. Cela a été mis en évidence et cela contribue à la diminution de carbone dans la "lave". A partir de 50% d'humidité dans le bois, une saturation de l'effet est atteinte.

L'oxygène a également une influence presque semblable, si le débit d'oxygène augmente, cela contribue à limiter le carbone perdu dans la "lave". L'énergie nécessaire à la torche plasma est moindre mais l'oxygène utilisé étant pur, l'intérêt en est diminué vu son prix. L'eau se révèle donc un choix plus judicieux.

La dernière étude se penche sur le flux de dioxyde de carbone, intéressant aussi à traiter en tant que déchet et gaz à effet de serre. L'influence est de nouveau assez similaire aux deux substances précédentes. Cependant comme pour l'eau, l'utilisation de dioxyde de carbone nécessite plus d'énergie à la torche plasmatisque.

S'il fallait tirer une première conclusion quant à l'étude des bilans matière, il s'agirait de dire que le travail n'est pas encore suffisamment achevé (par ex. le rôle de l'eau et son contrôle doivent être améliorés) et qu'il faudrait plus orienter cette étude sur base d'une validation plutôt que sur base d'une simulation, d'autant plus qu'il y a excès de mesures. Néanmoins des pistes ont été ouvertes pour mieux comprendre ou améliorer ce contrôle, voire influencer le fonctionnement du procédé (limitation du carbone solide).

5. Etude du bilan énergétique

C'est surtout l'établissement des rendements qui est visé à des fins de comparaison entre procédés et dans ce but, il nous faudra utiliser la notion d'enthalpie qui est la variable énergétique classique des procédés chimiques.

Avec la notion d'enthalpie complète et en l'appliquant au procédé qui nous concerne, la figure suivante explicite d'une manière générale les valeurs à déterminer pour les calculs.

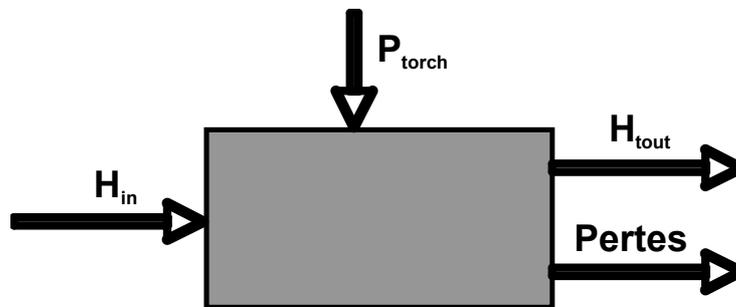


Figure 8 : Schéma simplifié du bilan chaleur

Ceci permet de proposer une première formulation de rendement :

$$\eta = \frac{\sum H_{\text{out}}}{\sum H_{\text{in}} + P_{\text{torch}}}$$

Où la notion complète d'enthalpie (in ou out ci-dessus) comprendra l'enthalpie dite chimique ou encore enthalpie de formation et l'enthalpie spécifique, celle calculée sur base de la chaleur spécifique classique C_p . Les termes de non idéalité ne sont pas envisagés dans le cadre de cette étude. Ajoutons pour être complet que la température de référence pour les calculs est celle des gaz parfaits à 298 K. Il est sous-entendu que la pression est atmosphérique mais son influence n'est pas à considérer ici.

P_{torch} est la puissance fournie au système plasmatique et Pertes sont les pertes de chaleur difficilement mesurables.

5.1 Evaluation des diverses enthalpies

Cela nous amène, en tenant compte des informations recueillies dans l'étude du bilan matériel, au schéma de bilan énergétique suivant, qui se veut nécessairement plus détaillé pour les divers flux à considérer.

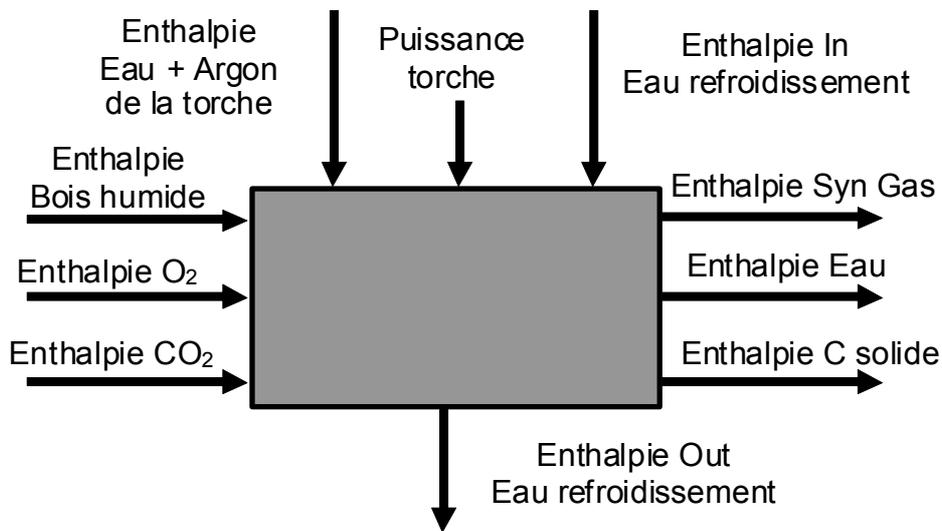


Figure 9 : Schéma détaillé du bilan chaleur du réacteur plasmatique

Ce qui nous intéresse surtout dans le cadre d'un rendement c'est l'enthalpie de Syn Gas qui contient surtout de l'hydrogène et du monoxyde de carbone (près de 90% dans ce contexte). D'ailleurs, en ce qui concerne les températures, les entrées sont à la température d'ambiance et n'ont guère d'influence. Par contre les sorties sont à la température du réacteur (voir paragraphe 3.1), c'est-à-dire aux environs de 1273 K. En termes d'enthalpie complète, il s'agit d'une approche de l'estimation potentielle de la valeur du pouvoir calorifique.

Les enthalpies de l'eau sortante et du carbone solide sont des pertes supplémentaires aux pertes à l'ambiance et sont difficilement quantifiables, car elles ne sont guère valorisables actuellement. La chaleur emmenée par le refroidissement s'ajoute également aux pertes.

En entrée, le terme clé dans les enthalpies est celui du bois et il a fallu faire une évaluation de son enthalpie de formation en tenant compte de l'humidité

éventuelle. Pour une humidité nulle, la valeur est de -5500 kJ/kg environ, si cette humidité est de 6%, la valeur est approximativement -7000 kJ/kg et de -10000 kJ/kg pour une humidité de 21%. Les autres valeurs de formation ou de chaleur spécifique sont plus classiques et facilement trouvées dans les tables de thermodynamique. Les valeurs des débits sont issues des bilans de matière.

Pour les dernières expériences réalisées en mai 2007, le rendement a été évalué à environ 39% pour une puissance fournie au plasma de 108 kW et un débit de bois de 47 kg/h. Il faut reconnaître que la formule de rendement utilisée conduit à des valeurs dévalorisées. Dans les procédés et de manière plus pratique, le rendement est calculé sur base des pouvoirs calorifiques inférieurs, à savoir :

$$\eta = \frac{PC_{\text{syngas}}}{PC_{\text{bois}} + P_{\text{torch}}}$$

Les pouvoirs calorifiques ou PC représentent une potentialité énergétique et ceux à envisager ici, sont ceux du gaz de synthèse (Syn Gas ou syngas) en sortie et du bois en entrée. Pour le calcul du rendement, il faut ajuster les unités du PC en tenant compte bien entendu des débits de ces matières.

6. Comparaison avec un procédé classique

La société belge XyloWatt produit un gaz de synthèse par un procédé classique de gazéification et il a été possible d'obtenir quelques informations comme le rendement de cette gazéification, évalué à 80% pour le traitement de 220 kg/h de bois avec une puissance fournie de 1115 kW. La formule utilisée pour le calcul de ce rendement est celle basée sur les PC.

Il n'est jamais aisé de faire des comparaisons dans des conditions parfaitement semblables et les informations obtenues sont nécessairement limitées pour des raisons de confidentialité. Pour le rendement du réacteur plasmatique, dont la valeur calculée au paragraphe précédent avec la première formulation, était de 39%, en utilisant la même formulation que pour XyloWatt, celle-ci est estimée à 68,5%.

Cependant, pour une valeur de 100 kg/h de bois avec une humidité de 6% et une puissance de torche de 113 kW, la valeur du rendement devient égale à 85%. En fait, premièrement l'augmentation du débit de bois n'engendre pas une consommation proportionnelle de la puissance à la torche et deuxièmement, l'eau joue un rôle plus favorable compte tenu des conditions de fonctionnement plasmatiques, car beaucoup plus d'hydrogène est récupéré.

En faveur du procédé basé sur le plasma, il convient d'insister sur la pureté du gaz de synthèse obtenu et sur sa richesse (plus de 90% de CO et H₂), il ne contient que très peu de CO₂ et d'azote. Son pouvoir calorifique n'en est que meilleur et de plus il convient très bien pour la production chimique d'une substance devenant clé comme le méthanol.

7. Conclusions

Un des buts principaux du travail était de progresser vers un meilleur contrôle du bilan matière afin de proposer une évaluation du bilan de chaleur et des rendements énergétiques. Sur ces bases, une analyse économique succincte, non présentée ici par souci de concision, a montré des perspectives intéressantes tout en allant dans le sens des soucis écologiques concernant le dioxyde de carbone, pour autant que le traitement des déchets et des rejets soit valorisé.

L'analyse du bilan matière a notamment montré l'importance de l'eau dont l'augmentation du débit est propice à l'amélioration des résultats. Ce bilan doit cependant encore être mieux cerné pour notamment diminuer les pertes en carbone mais aussi maîtriser l'eau en entrée notamment à travers l'humidité du bois qui n'est donc pas considérée comme un handicap.

L'étude montre aussi un intérêt d'ordre environnemental, dans la possibilité de traiter le dioxyde de carbone pour le transformer en monoxyde grâce à l'important pouvoir de transformation du plasma.

Au niveau des rendements énergétiques, on peut dire qu'ils sont comparables à ceux des procédés classiques. Par contre l'obtention d'un gaz fort riche en hydrogène et monoxyde de carbone allié à une grande pureté,

sont des atouts importants, tant pour la production d'énergie que la production d'une substance clé comme le méthanol.

Ceci permet de dire en final que le procédé basé sur l'utilisation d'un plasma pour le traitement des déchets et/ou leur gazéification, est une alternative intéressante qu'il convient de continuer à étudier, car plusieurs aspects sont encore à ajuster, en vue de son exploitation à plus grande échelle.

8. Références bibliographiques

- [1] HRABOVSKY, M., *Water Stabilized Plasma Generators*, Czech Republic, Academy of Sciences of Prague 8, Institute of Plasma Physics.
- [2] HRABOVSKY, M., KONRAD, M., KOPECKY, V., SEMBER, V., *Propeties of Water Stabilized Plasma Torches*, Czech Republic, Academy of Sciences of Prague 8, Institute of Plasma Physics.
- [3] HRABOVSKY, M., KONRAD, M., KOPECKY, V., SEMBER, V., KAVKA, T., CHUMAK, O., *Properties of Hybrid Water/gas DC Arc Plasma Torch*, Czech Republic, Academy of Sciences of Prague 8, Institute of Plasma Physics.
- [4] HRABOVSKY, M., *DC Arc Thermal Plasma Generation, Diagnostics and Applications*, Czech Republic, Academy of Sciences of Prague 8, Institute of Plasma Physics, Proc. of CAPPSSA 2005, 8-17.
- [5] HRABOVSKY, M., KONRAD, M., KOPECKY, V., HLINA, M., KAVKA, T., VAN OOST, G. (Department of Applied Physics Ghent University), BEECKMAN, E., VERSTRAETEN, J. (EnviTech sa Belgium), LEDECKY, J., (Ateko sa Hradec Kralove), *Gasification of Biomass in Water Stabilized DC Arc Plasma*, Czech Republic, Academy of Sciences of Prague 8, Institute of Plasma Physics, 2005.
- [6] HRABOVSKY, M., KONRAD, M., KOPECKY, V., HLINA, M., KAVKA, T., VAN OOST, G. (Department of Applied Physics Ghent University), BEECKMAN, E. (Envitech sa Belgium), *Pyrolysis of Biomass in Arc Plasma for syngas production*, Czech Republic, Academy of Sciences of Prague 8, Institute of Plasma Physics. Symposium on Plasma and Technology, 2006.

- [7] HRABOVSKY, M., KOPECKY, V., KONRAD, M., HLINA, M., KAVKA, T., CHUMAK, A., VAN OOST, G. (Department of Applied Physics Ghent University), BEECKMAN, E. VERSTRAETEN, J. (EnviTech sa Belgium), *Pyrolysis of waste using a hybrid argon-water satbilized torch*, Czech Republic, Academy of Sciences of Prague 8, Institute of Plasma Physics. ScienceDirect, Vacuum 80, Elsevier, 2006.
- [8] DIETENBERGER, M., *Update for Combustion Properties of Wood components*, USA, USDA Forest Service, Forest Products laboratory Madison WI, 2002.
- [9] CHARLIER, C., *Génie chimique – Opérations chimiques unitaires*, Belgium, Institut HEMES-Gramme Liège, PubliEtudiant Liège, 2006.

Les articles principaux sont seuls mentionnés. Les manuels techniques de l'ingénieur ont également servi de référence pour l'approche du bois-énergie.

9. Remerciements

Il nous paraît important que nos remerciements soient notamment adressés à M. Félicien Absil pour sa motivation permanente dans l'élaboration d'un tel projet ainsi qu'au professeur Guido Van Oost pour son soutien, sa courtoisie et bien sur sa grande expérience en physique plasmatique.

Il nous faut aussi mentionner le professeur Milan Hrabovsky pour son accueil, son intérêt indéfectible, son écoute attentive et sa disponibilité malgré un emploi du temps très chargé. Nous ne pouvons oublier l'équipe qui constitue le département de plasma physique de l'académie des sciences de Prague pour leurs conseils et leur aide.

Il ne serait pas courtois de ne pas adresser nos remerciements à M. Ivan Sintzoff, directeur de XyloWatt pour nous avoir aimablement fourni des renseignements sur le fonctionnement du procédé de pyrolyse dont il a la direction.