

VAPO-REFORMING OF BIOGAS : APPLICATION TO SYNGAS PRODUCTION

J. Koulidiati*, A. Czernichowski¹

**Université de Ouagadougou, Faculté des Sciences et Techniques,
Département de Physique, 03 B.P. 7021, Ouagadougou 03, Burkina Faso
Koulidia@fast.univ-ouaga.bf*

*¹Université d'Orléans, B.P. 6759, 45067 Orléans cedex 02, France
Albin.Czernichowski@wanadoo.fr*

(Reçu le 01 mars 1999 - Révisé le 30 mars 1999)

Summary : A process of valorisation of biogas (or other thin hydrocarbon) assisted by gliding arc without usual catalysts is proposed.

The gliding arc can directly transfert high voltage and low current electric discharge energy in the biogas.

A large part of initial molecules is convert into syngas and insaturated hydrocarbon.

Key words : Vapourforming, biogas, biomass, plasma, gliding arc, syngas, valorisation

La prise en compte de la variable environnement dans la définition des politiques et stratégies de développement peut être considérée comme un des faits majeurs des réflexions et initiatives de ces dernières années sur le devenir des sociétés.

La limitation en ressources énergétiques dont disposent les pays en voie de développement est évidente (énorme poids de la facture pétrolière, effets récurrents de l'utilisation des carburants actuels). Selon «*11th World Hydrogen Energy*» (Stuttgart, Allemagne, 23-28.06.1996), l'introduction progressive de l'hydrogène gazeux dans les combustibles actuels serait une voie médiane entre «le tout carbone» du début de l'ère industrielle et «le tout hydrogène» futuriste.

C'est pourquoi, nous proposons de valoriser le biogaz afin de produire un gaz de synthèse, un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone, pouvant être ensuite utilisé directement comme carburant gazeux plus efficace ou indirectement comme l'intermédiaire dans la synthèse de Fischer-Tropsch des carburants liquides ultra propres. Il s'agira donc de produire du gaz de

synthèse, comme vecteur énergétique pour un transport autonome et propre à proximité d'une source de biomasse. Cette valorisation pouvant se faire également au pied d'un système d'héliostats afin d'inclure plus directement l'énergie solaire, là où elle est abondante. Pour cela nous proposons une technologie composée du biogaz et du plasma (et optionnellement le Soleil). Cette idée peut être mise au point dans un endroit du globe disposant de déchets organiques et/ou pouvant produire une biomasse.

Les plasmas utilisés sont générés par un GlidArc-1 (Arc Glissant) [1] composé de deux ou plusieurs électrodes profilées en forme de tuyère et entre lesquelles des décharges électriques glissantes de forte puissance ont la possibilité de se développer.

1- INTRODUCTION

La digestion anaérobie des composés organiques produit du biogaz qui est composé de méthane ($\text{CH}_4 \approx 66\%$), de dioxyde de carbone ($\text{CO}_2 \approx 30\%$) et de faible quantité de d'hydrogène sulfuré (H_2S), d'hydrogène (H_2), d'azote (N_2), de vapeur d'eau et des traces d'autres composés ($\leq 0,001\%$).

Si les citoyens pouvaient utiliser l'énergie contenue dans les déchets organiques dont ils disposent dans leurs décharges, ce carburant pourrait compléter, sinon satisfaire totalement leurs besoins en énergie [2]

Le biogaz est rarement exploité à cause de son faible pouvoir calorifique. Il est difficilement utilisable directement comme combustible dans les moteurs de voiture ; de plus il y a une teneur en H_2S qui rend sa valorisation difficile.

D'autres technologies utilisent à défaut du biogaz, le gaz naturel. En effet, le gaz naturel occupe 21 % dans la consommation énergétique mondiale [3]. Par rapport au pouvoir calorifique net, le charbon est le moins cher des deux autres carburants fossiles que sont le gaz naturel et le pétrole. Si le pétrole peut être transporté et stocké facilement, c'est le gaz qui a le moins d'impact sur l'environnement. En effet, la combustion de gaz naturel produit 50 % moins de gaz carbonique (gaz à effet de serre bien connu) que le pétrole et le charbon. Le Gaz produit 50 % moins de CO , d'hydrocarbures, de NO_x et 25 % moins de

CO₂ que l'essence ; il ne génère aucune particule, pratiquement pas de SO₂ et de suies [4]. C'est pourquoi le gaz est le carburant le mieux adapté pour l'automobile non polluante.

Certains chercheurs, dans le but d'augmenter le pouvoir calorifique du gaz naturel, proposent d'utiliser un mélange de gaz naturel et d'hydrogène [5-12] pour le mélange hydrogène méthane. Ils ont montré que les proportions optimum sont de 20 à 30 % d'hydrogène dans le gaz naturel.

Un vaste programme de recherches est mené partout dans le monde ; par exemple on s'intéresse à l'Hythane (20 % H₂ + 80 % CH₄) au Canada pour les bus de transport en commun. Déjà en 1996 tous les taxis japonais (250.000 voitures) fonctionnaient au gaz. En Italie, plus d'un million de voitures et au Bénélux plus de 650.000 voitures fonctionnent au gaz [13].

L'hydrogène est pensé comme carburant du futur en termes de carburant acceptable pour l'environnement. Le problème est qu'il n'y a aucune source naturelle d'hydrogène. Il doit donc être fabriqué à partir d'une source abondante, par exemple l'eau ou le méthane. Cependant pour obtenir 1 mole d'hydrogène, il faut dépenser respectivement 285 kJ et 37 kJ d'énergie de dissociation en éléments. Un projet international a été élaboré [14] pour produire de l'Hydrogène solaire.

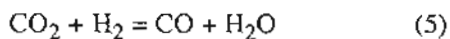
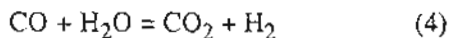
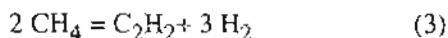
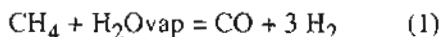
Les technologies à venir devront prendre en compte l'utilisation optimum des ressources naturelles et veiller à la protection de l'environnement. La technologie du biogaz a l'avantage d'utiliser les ressources locales par exemple les plantes, les résidus des agro-industries [15], [16], les eaux usées [17], [18] et vient en complément des technologies existantes pour produire de la chaleur, de l'électricité et créer des emplois pour les populations locales. C'est pourquoi, du point de vue économique et environnementale, le biogaz a une longueur d'avance. [19-21].

Nous allons dans ce qui suit, décrire le procédé de valorisation du biogaz afin de produire le gaz de synthèse et l'application expérimentale puis nous présenterons les résultats obtenus.

2- LE PROCÉDÉ

Le procédé que nous allons exposer nous permet de convertir le biogaz (ou autres hydrocarbures légers) en «gaz de synthèse» composé en majorité d'hydrogène et de monoxyde de carbone et aussi en d'autres produits de valeur comme l'acétylène (réaction 3), sans l'utilisation de catalyseurs classiques. Le gaz utilisé ici est une simulation du biogaz à partir du méthane (ou du gaz naturel), du gaz carbonique de vapeur d'eau.

Ce procédé est assisté par plasmas d'arcs glissants [22]. Au cours d'une seule opération, nous réalisons simultanément dans le réacteur GlidArc-I (Arc Glissant) une conversion d'hydrocarbures légers par un vapo-reformage du méthane, (réaction 1), un reformage avec le gaz carbonique (réaction 2) et un shift simple et inverse d'une partie de l'hydrogène (réactions 4 et 5). Ceci afin d'obtenir un gaz de synthèse ayant un rapport molaire H_2/CO souhaitable pour une utilisation ultérieure de ce gaz de synthèse, par exemple via un procédé Fischer-Tropsch. Le procédé est donc basé principalement sur les réactions suivantes :



Nous obtenons d'autres produits de conversion de la charge : C_2H_4 et C_2H_2 à assez fortes teneurs. Ces produits insaturés peuvent apporter une valeur supplémentaire à la conversion d'hydrocarbures assistée par les arcs électriques glissants.

La conversion du biogaz selon les réactions endothermiques (1) à (3) nécessite un apport d'énergie de préférence «propre», détachée de

toute combustion intérieure ou extérieure. La meilleure façon de favoriser ces réactions serait de réaliser des arcs électriques directement dans le milieu à convertir en imposant une répartition permanente d'énergie dans le plus grand volume à traiter. Le transfert d'énergie d'origine électrique vers le mélange gazeux s'effectuerait par transfert direct de l'énergie vers les molécules. Cela se traduirait par des phénomènes d'excitation, d'ionisation et de dissociation et également par effet Joule en considérant le mélange ionisé comme un conducteur gazeux. C'est-à-dire que le mélange gazeux, rendu conducteur après une ionisation, elle-même due à un claquage diélectrique (donc une préionisation) entre des électrodes portées à des potentiels différents, serait considéré comme une résistance électrique et en même temps comme une sorte d'électrolyte en phase gazeuse : le plasma. Dans cette étude, nous utilisons un plasma hors équilibre thermodynamique réalisé dans un dispositif à arcs électriques glissants.

Toutes ces réactions sont donc effectuées dans un milieu fortement activé par la présence d'un plasma produit par les arcs électriques glissants qui apportent au milieu réactionnel à la fois une enthalpie facilement contrôlable et des espèces très réactives [23], [24]. Ces arcs particuliers peuvent donc jouer le rôle d'un catalyseur en phase homogène [25]. En effet, l'activation du milieu se manifeste par la présence des espèces plutôt inhabituelles (par rapport aux conditions classiques de conversions d'hydrocarbures) provenant de la matière dans laquelle se développent ces arcs. Ainsi on y détecte les électrons aussi bien que des atomes, ions, et/ou radicaux moléculaires tels que : H, OH, O, O₂, H⁺, O⁺, O₂⁺, O₂⁻, HO₂, CH₃, CH₂, CH, C₂, etc. La plupart de ces espèces peuvent exister dans leurs états excités électroniques ou vibrationnels d'un temps de vie assez long. Ils sont également connus comme extrêmement actifs chimiquement.

La réaction endothermique (1) de vapo-reformage du méthane, demande, pour être complètement effectuée dans les conditions standard (298 K, 1 atm), une énergie équivalente à 206 kJ par mole de méthane, soit 0,64 kWh par 1 m³(n) du mélange CO + 3 H₂ produit.

D'autre part, il est possible d'obtenir H₂ à partir de CO + H₂O ou CO à partir de CO₂ + H₂ via des réactions (4) et (5) quasiment

athermes, dites «shift». En pratique industrielle, ces réactions nécessitaient jusqu'alors un réacteur séparé, une présence de catalyseurs et elles sont accompagnées de tous les problèmes de complexité, d'empoisonnement et de vieillissement de la charge catalytique, etc. Des travaux ont été réalisés, sans catalyseurs classiques sur les réactions (4) et (5) et les résultats probants consignés [26].

3- DISPOSITIF À PLASMA GLIDARC-I

Le dispositif à plasma GlidArc, développé à Orléans et déjà installé au Département de Physique de Ouagadougou peut être alimenté en courant continu, redressé ou en courant alternatif monophasé (2 électrodes), triphasé (3 ou 6 électrodes) ou polyphasé (n ou $2n$ électrodes). Il fonctionne en régime de décharges avec des tensions relativement élevées (quelques kilovolts) et des courants faibles (quelques ampères). Ce dispositif permet d'obtenir à la pression allant d'un vide partiel (0,1 bar) à des pressions plus élevées (12 bars) des volumes plasmagènes importants à basse température (2 kK) avec des gaz très différents (oxydants ou réducteurs) comme : air, vapeur d'eau, CO_2 , CH_4 , N_2 , O_2 , H_2S , N_2O , SO_2 , gaz rares, chloroforme, fréons ou avec leurs mélanges comme CO_2 - H_2S , CH_4 -air, CH_4 - CO_2 . [27].

La théorie des arcs et décharges glissantes indique clairement le caractère fortement hors équilibre de ces types de plasma. Les études spectroscopiques préliminaires confirment que les plasmas produits dans le GlidArc sont hors équilibre et contiennent de nombreuses espèces radicalaires et excitées qui les rendent très actifs et intéressants pour diverses applications de chimie des plasmas.

Le réacteur GlidArc-I utilisé est schématisé sur la Fig. 1. Le réacteur /1/ utilise six électrodes /2/ en tôle profilée d'acier inox de 0,8 mm d'épaisseur (seulement deux des six électrodes réparties symétriquement autour de l'axe de l'écoulement du fluide à traiter sont montrées sur la Fig. 1). Chacune des électrodes a une longueur de 14 cm et une largeur de 25 mm. Les électrodes délimitent un volume en forme de tuyère /3/ dans lequel des arcs électriques glissants /4/ ont la possibilité de se développer. Ce réacteur contient une buse /5/ de 1,8 mm de

diamètre soufflant le fluide /6/ à convertir dans l'espace /7/ entre les électrodes disposées de manière à ce que le fluide circule le long de la partie centrale de ces électrodes exposées aux arcs. Ainsi les pieds /8/ d'accrochage des arcs éclatant et préionisant le gaz à l'endroit /9/ où la distance entre les électrodes est la plus faible, glissent sur ces électrodes puis disparaissent à l'endroit /10/ proche de l'extrémité des électrodes pour réapparaître de nouveau à l'endroit initial. Le processus est séquentiel et on constate une durée de vie d'un arc /4/ comprise entre 1 et 20 ms en fonction de la vitesse linéaire du fluide dans les zones /7/, /9/, /13/ et /10/ entre les électrodes /2/. Les arcs glissants /4/ ont des caractéristiques variables à partir de l'endroit /9/ où ils sont initiés, jusqu'à leur extinction /10/ avec, en particulier, des dissipations d'énergie qui sont croissantes au cours du temps. Le réacteur est fermé par un couvercle /11/ portant les électrodes isolées électriquement avec des connexions de haute tension /12/. Toute la structure est étanche. Enfin un orifice /13/ sert pour la sortie des produits du traitement. Le réacteur (de diamètre intérieur 80 mm et de volume 1,5 litres) a, comme enveloppe, une double paroi /14/ fermée en acier inoxydable. Ces doubles parois /14/ calorifugées à l'aide d'une ouate minérale /15/ sont utilisées pour recycler l'énergie dégagée dans le réacteur en l'injectant dans le fluide entrant /6a/. Les pertes thermiques du réacteur peuvent être encore limitées à l'aide d'une résistance /16/ enroulée autour du réacteur et parcourue par un courant électrique. D'autres fluides peuvent être ajoutés séparément par l'entrée /6b/ pour former un mélange qui est ensuite injecté par la buse /5/. Des trous ou des dérives /17/ servent, par exemple, à brancher un manomètre, passer un fil de thermocouple ou un échantillonneur de fluide entrant à l'intérieur du réacteur. Par une injection /5/ rapide (≥ 10 m/s) et quasi ponctuelle du fluide entre les électrodes /2/ on provoque déjà un phénomène de récirculation /18/ des réactifs dans la zone d'arcs glissants. Pour renforcer cette récirculation, on ajoute un diaphragme céramique /19/ ayant un trou axial large /20/ divisant ainsi le réacteur en deux parties : un compartiment d'arcs /21/ d'environ 2/3 du volume total du réacteur et un de « maturation » /22/ d'environ 1/3 du volume total du réacteur. Le trou /20/ de forme convergente/divergente (18 mm de diamètre dans sa

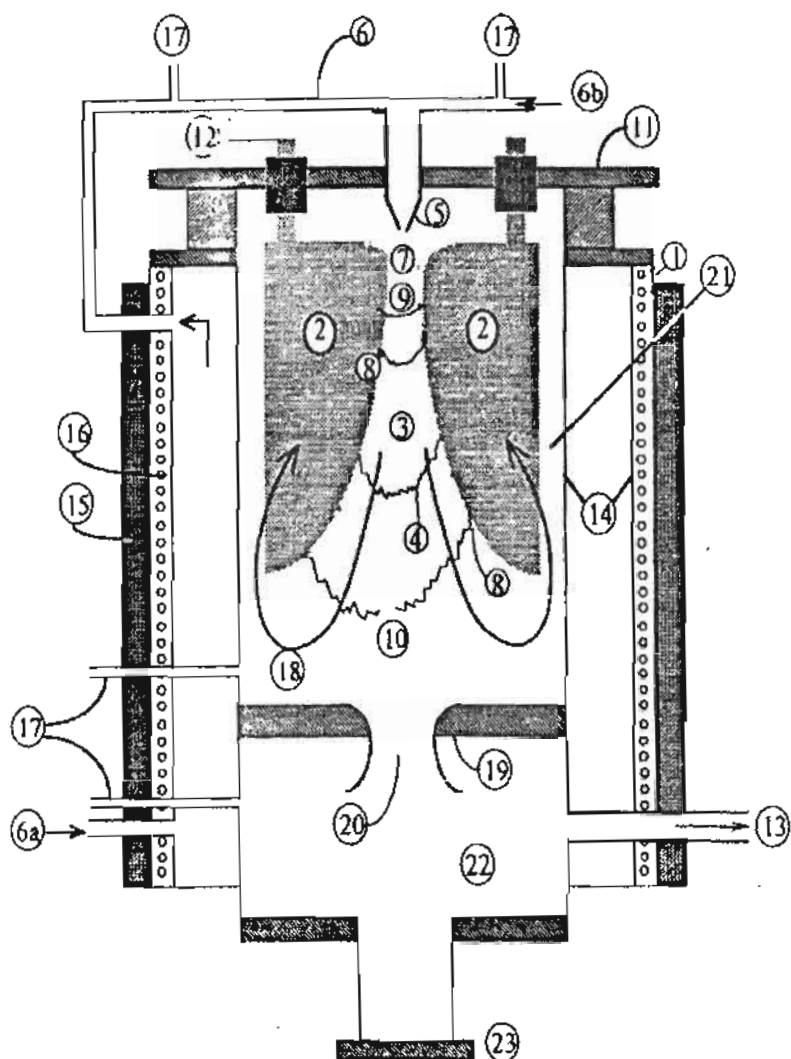


Figure 1 : Réacteur à arcs glissants (GlidArc)

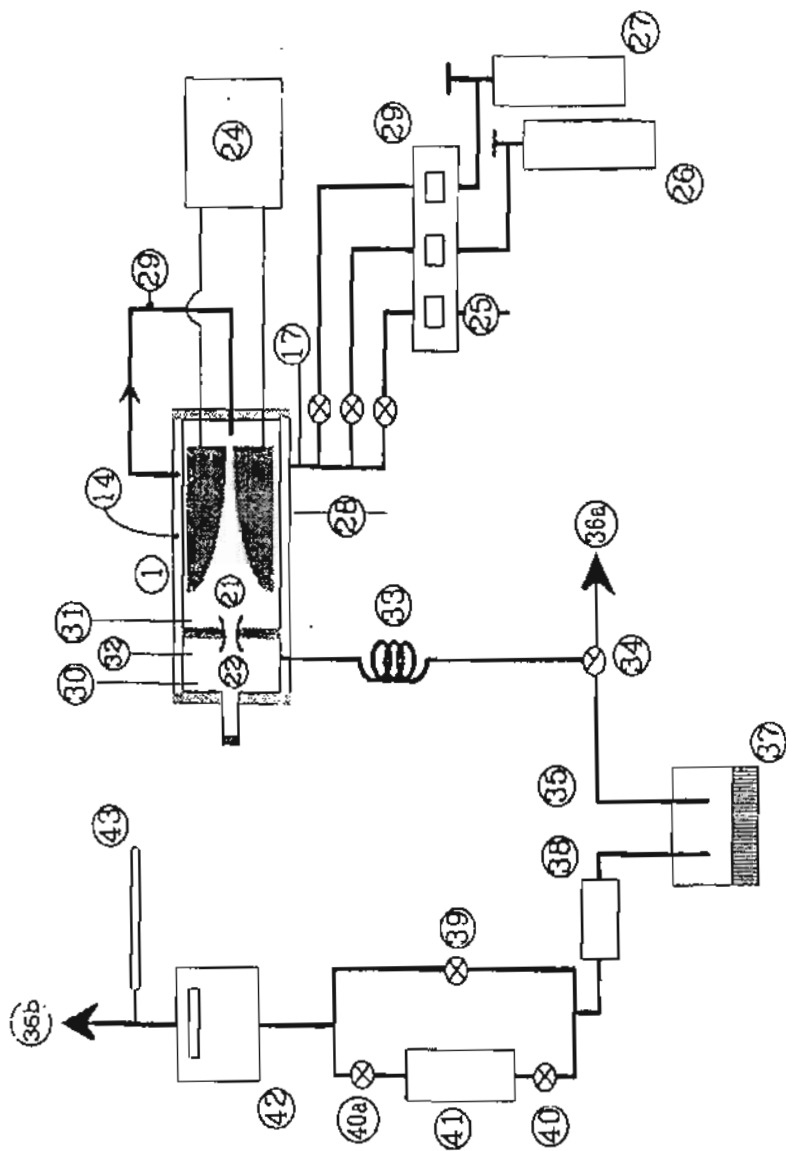


Figure 2 : Dispositif expérimental

partie étroite) assure un passage des réactifs (partiellement consommés) et les espèces long-vivants actives provenant de l'excitation des gaz par les arcs glissants. Dans la zone de maturation, la conversion est susceptible d'être donc terminée dans une ambiance où la température est beaucoup plus basse. Le fluide, une fois dans cette zone post-plasma, ne peut d'ailleurs plus rentrer dans la zone d'arcs. La zone lumineuse d'arcs électriques glissants peut être observée à travers un hublot /23/ de 12 mm de diamètre, ceci pour s'assurer du bon fonctionnement du réacteur. Des informations très importantes peuvent être tirées à partir du spectre d'émission de cette zone. La conversion d'hydrocarbures peut être suffisamment avancée lors d'un passage par un seul réacteur GlidArc.

Des analyses chimiques sont effectuées en utilisant les méthodes classiques de chromatographie en phase gazeuse. Trois chromatographes dédiés chacun aux gaz particuliers secs sont utilisés : CO, CO₂ et CH₄ pour le premier, l'hydrogène pour le second, et tous les hydrocarbures pour le troisième. Le débit de la vapeur d'eau dans les produits est quantifié par un piègeage d'un volume connu de gaz sortants.

Les arcs glissants à l'intérieur du réacteur sont alimentés par un système spécial de haute tension assurant à la fois une préionisation du milieu et ensuite un transfert de l'énergie électrique vers le plasma. La puissance électrique du réacteur utilisé varie entre 0,6 et 1,1 kW sous 0,1 ou 0,2 A pour un débit de fluides à traiter de 0,6 à 1,2 m³(n)/h ; l'apport énergétique par rapport à la charge est de 0,47 à 1,2 kWh/m³(n).

4- RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION

Le gaz utilisé ici est une simulation du biogaz à partir du gaz naturel (GN), du gaz carbonique et de la vapeur d'eau. Le reformage du biogaz sera mieux compris à l'aide de la Fig. 2. Le réacteur utilisé est celui dessiné sur la Fig. 1. La Figure 2 est une représentation schématique de l'ensemble de l'appareillage. Sur cette figure, le réacteur GlidArc-1/1/ est alimenté par un générateur électrique spécial /24/ de haute tension. On le fait fonctionner directement avec, comme gaz plasmagènes, du gaz

naturel /25/ (ou /26/) mélangé au gaz carbonique /27/, à la vapeur d'eau (ou l'eau liquide) /28/ ou au mélange $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$. Les débits de gaz sont contrôlés par des débitmètres massiques /29/. Le mélange gazeux entrant (sec) peut être prélevé pour analyse chromatographique par une dérivation /17/. Le débit de vapeur d'eau est également connu à la suite du calibrage de la pompe de dosage du dispositif /28/. Le thermocouple /29/ permet de mesurer la température du fluide à l'entrée de la buse d'injection tandis que les sondes /30/ et /31/ indiquent les températures dans les deux compartiments du réacteur. Un manomètre /32/ donne à tout instant la pression à l'intérieur du réacteur ; cette pression est tenue légèrement supérieure à la pression atmosphérique. Les produits sortant du réacteur sont refroidis dans un échangeur de chaleur à l'air /33/. A leur sortie de l'échangeur, les gaz sont dirigés sur un robinet /34/ inverseur de sens qui sert à les envoyer soit vers l'analyse /35/ soit vers la cheminée d'évacuation /36a/. Lors de nos essais, nous recueillons et pesons l'eau sortant du réacteur, ceci par condensation /37/ et absorption /38/, ainsi que le produit gazeux sec pour des analyses chromatographiques. Pour cela, on envoie d'abord le gaz humide vers la sortie /36a/ puis, lorsque nous estimons que le réacteur fonctionne en régime stable (pression, températures, débits de gaz, débit de la vapeur d'eau, puissance électrique), on inverse le robinet /34/ et on l'envoie vers l'analyse /35/. L'eau se dépose dans le flacon fortement refroidi /37/ et dans une matière absorbante. Le robinet /39/ étant auparavant fermé et les robinets /40/ et /40a/ ouverts, le gaz sec traverse une ampoule ou un ballon /41/ puis le compteur à gaz /42/ et sort du dispositif expérimental par /36b/ vers la cheminée d'évacuation. La température du gaz à la sortie du compteur /42/ est mesurée à l'aide d'un thermomètre /43/. A chaque essai, on mesure également la pression atmosphérique à l'aide d'un baromètre, ceci pour ramener nos bilans de volumes aux conditions normales (n).

Le Tableau.1 résume les résultats expérimentaux. Il est divisé horizontalement en trois parties. La première partie indique la nature et la quantité des fluides injectés dans le réacteur, l'énergie spécifique injectée dans le plasma (l'énergie électrique réelle du GlidArc rapportée au débit horaire normal de tous les réactifs entrants) ainsi que la température du fluide entrant dans le réacteur, celle à l'intérieur du compartiment à plasma

(mais hors contact avec les arcs glissants) et celle à l'intérieur du compartiment de maturation.

La deuxième partie du tableau indique les volumes (en litres normaux) de produits secs du procédé sortant du réacteur après l'injection de 1 kWh d'énergie électrique au plasma de GlidArc-I dans les conditions d'expérimentation. Ainsi, ces valeurs indiquent un coût énergétique (en électricité) du procédé à l'échelle laboratoire. Cette section indique également le coût énergétique d'une masse unitaire de CO (autres produits considérés comme «gratuits») ou d'un volume unitaire de gaz de synthèse (autres produits considérés également comme «gratuits») ayant un rapport H_2/CO donné.

La troisième partie du Tableau indique d'autres résultats de calculs basés sur les données expérimentales : le taux global de conversion de carbone d'origine gaz naturel et éventuellement d'origine CO, les taux de conversion de différents hydrocarbures présents dans le gaz naturel ainsi que les sélectivités relatives de conversion de carbone présent dans le gaz naturel et éventuellement d'origine CO_2 vers des produits utiles.

Nous obtenons donc, présentement, beaucoup plus d'hydrocarbures insaturés. Dans un même temps, pour un rapport similaire de H_2/CO , le rapport C_2H_4/C_2H_2 est plus élevé. Ces résultats témoignent d'un renforcement de la récirculation dans le compartiment raccourci du GlidArc par une mise en place du diaphragme. La charge hydrocarbonnée peut être ainsi en contact plus intime et plus prolongé avec la zone d'arcs glissants ; c'est là où beaucoup d'acétylène est créé. En même temps, nous observons une hydrogénation partielle de l'acétylène vers éthylène qui survient hors des arcs dans le compartiment de maturation. Dans une ambiance où la température est suffisante pour assurer une cinétique assez rapide d'hydrogénation partielle, une partie de l'acétylène est convertie en éthylène : produit encore plus recherché pour ses multiples applications.

Tableau 1 : Résumé des résultats expérimentaux

Exemple	G21	G22
Débit entrant, I(n)/h :		
GN	495	484
CO ₂	52	138
Vapeur d'eau	332	254
Energie Spécifique, kWh/m³(n)	1,23	1,07
Température (°C)		
Entrée	240	230
Réaction	665	660
Maturation	390	395
Débit sortie		
C ₂ H ₄	6,8	6,4
C ₂ H ₂	13,5	17,2
C ₃ H ₆	0,5	0,5
CO	80,9	95,3
H ₂	268	245
H ₂ /CO (mol/mol)	3,3	2,6
Coût énergétique		
CO (KWh/kg)	9,9	8,4
H ₂ + CO kWh/m ³ (n))	2,9	2,9
Conversion de carbone (%)		
d'origine GN	21,6	17,0
d'origine CO ₂	1,1	3,5
Conversion d'hydrocarbures présents dans le GN (%)		
CH ₄	20	18
C ₂ H ₂	41	36
C ₃ H ₆	47	40
Sélectivités relatives de conversion de carbone (%) vers :		
C ₂ H ₄	11	9
C ₂ H ₂	22	24
C ₃ H ₆	1	1
CO	66	66

5 - CONCLUSION

Nos expériences ont démontré la faisabilité d'un procédé nouveau de production de gaz riches en hydrogène et en oxyde de carbone, contenant également des quantités assez importantes de C_2H_4 , C_2H_2 et C_3H_6 . Le procédé consiste à fabriquer ces gaz par les arcs électriques glissants qui éclatent directement dans le biogaz ou dans des hydrocarbures mélangés avec de la vapeur d'eau et/ou avec du gaz carbonique dans des proportions quelconques. Ceci provoque l'oxydation et/ou craquage partiel de ces hydrocarbures en évitant les inconvénients des procédés existants (vieillessement, empoisonnement du catalyseur). Les réactifs, partiellement convertis dans un compartiment à arcs glissants, pénètrent ensuite dans un autre compartiment de maturation qui est séparé de la zone de réaction directe par un diaphragme comportant un large trou. Là, en présence des espèces encore actives, produites dans les arcs et transportées par le gaz sortant de la zone d'arcs, le gaz subit une conversion additionnelle à une plus basse température que celle présente dans la zone de réaction directe.

Le dispositif GlidArc-I permet également de transférer directement de l'énergie électrique sous haute tension et relativement bas courant dans un milieu réactionnel endothermique. Ces conditions électriques, couplées à une forte vitesse du milieu plasmagène dans la zone d'arcs, provoquent un fort déséquilibre électrique et aussi thermodynamique. La matière injectée dans cette zone de plasma hors équilibre créée dans le dispositif GlidArc réagit donc de façon non-thermique.

Aucune difficulté n'a été notée lors des expériences et l'extrapolation pour de grands débits est facile. Malgré un réacteur non optimisé et un seul passage des réactifs par le compartiment à GlidArc-I, une grande partie des molécules initiales est convertie en gaz de synthèse et en hydrocarbures insaturés. Cette conversion est fortement améliorée par l'injection quasi ponctuelle des réactifs dans la zone d'arcs à l'aide d'une buse fine et également par un diaphragme avec un trou convergent/divergent placé de façon axiale et renforçant la récirculation des réactifs dans cette zone de réaction directe.

Sur un plan plus technique, il faut souligner une étonnante facilité de

fonctionnement du réacteur et de son ensemble, sans détérioration d'électrodes, des porte-électrodes, du diaphragme ou des parois du réacteur ou du maturateur, tous soumis à l'action de réactifs entrant et de produits sortant. Ceci s'explique par la température modérée de l'ensemble ($\leq 680^{\circ}\text{C}$) et par un temps de contact très court des pieds d'arcs avec les électrodes, même en acier, même non refroidies. Nous n'avons pas noté de difficultés au niveau de la mise en œuvre des gaz plasmagènes choisis : les mélanges d'hydrocarbures avec de la vapeur d'eau et/ou du CO_2 .

L'utilisation du GlidArc-I a surtout l'avantage de traiter simultanément les composés organiques volatils et le sulfure d'hydrogène qui pourraient polluer le biogaz. Dès lors, il est nécessaire de procéder à l'identification des résidus à grand potentiel pour la production anaérobie de biogaz, leur production et leurs sites. L'avantage immédiat est la minimisation des déchets (déchets ultime), la valorisation des déchets, éventuellement leur incinération à partir de l'énergie qu'ils produisent ; cela permet une optimisation du dispositif général.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. LESUEUR, A. CZERNICHOWSKI, J. CHAPELLE. Dispositif de Génération de Plasmas Basse température par Formation de Décharges Electriques Glissantes, Brevet Français No. 2639172.
- [2] MIR-AKBAR, HESSANI, SKY CHRISTENSEN AND ROBERT GANI, Anaerobic digestion of household organic waste to produce biogas, Renewable Energy, (1996) 9, 1-4 .
- [3] K. HEDDEN, University of Karlsruhe, Germany - Oil Gas (1992) European Magazine.
- [4] OESTERWIND ; Dieter, (1996) 16^e congrès du Conseil Mondial de l'Énergie 1996.
- [5] LYNCH, F.; et al; The Denver Hythane Project - Recent Progress; (1992) Tenth Anniversary Conf.. Indutry and Hydrogen; Kananaskis; Alberta.

[6] RYAN, T.W., LESTZ, S.S.; The Laminar Burning Velocity of Isooctane, N-Heptanol, Methane and Propane at Elevated Temperature and Pressures in the Presence of a Diluent; SAE Paper, (1998), n 800103.

[7] WALLACE, J.S., CATELLAN, A. I.; Hythane and CNG Fuelled Engine Exhaust Emission Comparison; Proc.(1994) 10th World Hydrogen Conf.; Miami.

[8] HOEKSTRA, R. L ET AL; Demonstration of Hydrogen Mixed Gas Vehicles, Proc. (1994) 10th World Hydrogen Conf. Miami.

[9] BÜNGER, U., ZITTEL, W.; Hydrogen in the Public Gas Grid - A Feasibility Study about its Applicability and Limitations for the Admixture Within a Demonstration Project for the City of Munich; (1994) Proc. 10th World Hydrogen Conf.; Miami.

[10] BROCKERHÖFF, P., EMONTS, B.; Unse of Hydrogen as an Additive to Natural Gas in a Catalytic Burner ; (1994) Proc. 10th World Hydrogen Conf.; Miami.

[11] DRIFT, A.V. ET AL.; Low-NOx Hydrogen Bruner ; (1994) Proc. 10th World Hydrogen Conf.; Miami.

[12] G.A. KARIM, IWIERZBA, Y. AL-ALOSSI, Int. J. Hydrogen Energy, (1996) vol. 21, N°7, 625-631.

[13] T.M, Industries et Technique - Hors Série - 1996.

[14] G.S. ELJRUSHI, J.N. ZUBIA. Solar Hydrogen : The Great Sahara Project. Int. J. Hydrogen Energy, (1994) vol.19, N°3, 215-218.

[15] SARA THYBERG NAUWANN, CARIN MYRÈN, Journal of Power Sources, (1995) 56, 45-49.

[16] AMTELA K., KIVAIISI. M.S.T. RUBINDAMAYUGI, University of Dar es Salam, Tanzania, The potential of agroindustrial residus for production of biogas and electricity in Tanzania, Renewable Energy 1996, Tanzania.

[17] ERIC DOBA, SIAAP, Station d'Épuration d'Archères, Traitement des Eaux. Société Française des Thermiciens, journées d'étude du 16-11-1988. France.

[18] PETER M. CZEPIEL, PATRIC M. CRILL, ROBERT C. HARRIS ; Environ. Sci. Technol., (1993), 27, 2472-2477.

[19] BATHIA R.K, MILLS D.R, Renewable Ressource Assesment and Technology Evaluation, in *Integrated Energy Planing. A Manuel* (1985) Vol. II, Asian and Pacific Developpment Centre, Kuala Lumpur, pp 133-187.

[20] TIEN C.F. 1995, Biogaz Generating system in Taiwan, in the *Word Directory of Renewable Energy suppliers and services 1995* - James, United Kingdom, pp 48-49

[21] MOHD YUSOF HJOTHMAN. CHIKEN DUNG, Biogaz Power Generating System in Malaysia, Faculty of Physical and Applied Sciences, 1996. University Kebangssan Malaysia, 43600 Bangui.

[22] A. CZERNICHOWSKI, Gliding arc. Applications to engineering and environment control, *Pure and Applied Chemistry*, (1994) vol. 66(6), 1301-1310.

[23] P. JORGENSEN, J. CHAPELLE, A. CZERNICHOWSKI, Procédé de Production de Gaz Réactifs Riches en Hydrogène et en Oxyde de Carbone dans un Post-Arc Electrique, Brevet Français No. 2593493.

[24] K. MEGUERNES, J. CHAPELLE, A. CZERNICHOWSKI, Oxydation de l'Ethane C_2H_6 par CO_2 ou O_2 dans un arc électrique, *J. High Temp. Chem. Process.*, (1992) vol. 1(3), 71-76.

[25] A.CZERNICHOWSKI, T. OPALINSKA, P. CZERNICHOWSKI, H. LESUEUR, Procédé et dispositif de déshalogéation de composés organiques par plasma, Brevet Français, No. 2724166.

[26] A. CZERNICHOWSKI, K. MEGUERNES, Electrically assisted water shift reaction, 12th Int. Symp. on Plasma Chem., Minneapolis, Minnesota, (1995), vol. 2, p. 729-33.

[27] H. LESUEUR, A. CZERNICHOWSKI, J. CHAPELLE, *Int. J. Hydrogen*. (1994) vol.19, N°2, pp139-144.