

Dispositifs de reformage assisté par plasma hors équilibre

Dans ce paragraphe, nous présentons les principales équipes qui ont étudié le reformage assisté par plasma [Table. 3]. Nous nous intéressons en particulier aux différents procédés et aux combustibles utilisés. Nous avons pu constater qu'au sein de chaque équipe les procédés développés ont évolué au cours du temps dans le but de répondre à la problématique générale des plasmas réactifs à savoir l'optimisation énergétique et technologique des procédés.

	groupe	Procédé plasma	Combustibles
5.1	PSFC-MIT, Boston (USA) Cohn [62-76]	Torche plasma Arcs glissants	Méthane, iso-octane, propane, éthanol, diesel, huiles végétales
5.2	Drexel Plasma Institute, (USA) Fridman [85,86,59]	Décharges corona Arcs glissants	Méthane
5.3	SIEMENS, Erlangen (Allemagne) Kappes [92-95]	"DBDs" Canon d'électrons Torche plasma	Méthane
5.4	ECP, Orléans (France) Czernichowski [91]	Arcs glissants "Glidarc"	cyclohexane, heptane, toluène, essence (SP95), diesel, JP8 ¹⁴ , éthanol, gaz naturel, propane, huiles végétales, biogaz
5.5	GREMI, Orléans (France) Cormier, [61,81,82,96,97]	"Glidarc" "DBDs"	Méthane
5.6	"Tokyo Institute of Technology" (Japon) Sekigushi [98]	Micro-ondes	Hexane
5.7	LPGP, Orsay (France) Pasquiers [84]	"DBDs"	Iso-octane
5.8	"Waseda university" (Japon) Sekine [99-102]	Décharges pulsées	Méthane, propane, hexane, cyclohexane méthanol, éthanol
5.9	CEP Mines Paris (France) Fulcheri [54]	Arcs glissants Torche plasma	Essence (SP95), essence désulfurée ¹⁵ , Iso-octane

Table. 3 - Liste non exhaustive des principales équipes qui ont travaillé sur le reformage par plasmas hors équilibre, des procédés et des combustibles étudiés

¹⁴ carburant utilisé dans l'aviation militaire

¹⁵ California Gasoline-Syntroleum (C₇H_{15,2})

5.1 - PSFC-MIT

L'équipe du PSFC-MIT apparaît comme l'une des équipes les plus avancées dans les recherches sur le reformage d'hydrocarbures par plasma. Historiquement cette équipe s'est d'abord intéressée au reformage par plasma d'arc thermique¹⁶ [62-64], puis, elle s'est orientée vers des procédés moins énergivores, mettant en œuvre des plasmas d'arc hors équilibre [69-72]. Différents prototypes et alimentations électriques ont été envisagés. Les variantes de torche plasma non-thermique développées peuvent se classer en deux catégories [75] en fonction notamment de la géométrie des électrodes et de l'injection des réactifs :

- Torche plasma non thermique à électrodes pointe cône : “Plasmatron gen.2”
- Torche plasma non thermique à électrodes tubulaires : “Plasmatron gen.3”

Les torches non thermiques ont été alimentées par des sources haute tension pouvant fournir jusqu'à plusieurs dizaines de kilovolts et des courants (DC, AC et RF) compris entre 10 mA et 2 A. Lors des réactions de reformage, de nombreux précurseurs hydrocarbonés ont été étudiés : méthane, propane, iso-octane, diesel, éthanol et différentes huiles végétales (maïs, soja et colza). Les hydrocarbures ont été reformés à l'air (oxydation partielle) ou avec un mélange d'air et d'eau (reformage autotherme). L'utilisation de systèmes catalytiques couplés au réacteur plasma a également été étudiée.

La figure [Fig.35] représente le reformeur qui utilise la torche plasma non thermique “Plasmatron gen.2”. Ce dispositif possède un volume de 2 L, il pèse 3 kg. Il est alimenté par des courants de 15 à 120 mA, correspondant à des puissances dans le plasma comprises entre 50 W et 300 W. Les réactifs sont préchauffés et prémélangés avant d'être injectés en phase gazeuse dans la torche.

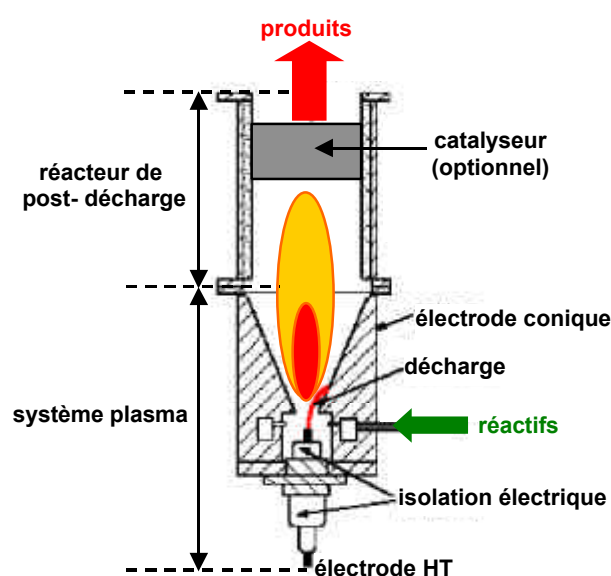


Fig.35 - Dispositif de reformage par plasma : “Plasmatron gen.2” développé au PSFC-MIT [72]

¹⁶ torche plasma thermique”Plasmatron gen.1”

La figure [Fig.36] représente la dernière génération de reformeur assisté par plasma développée par l'équipe du PSFC-MIT. Le reformeur est composé de la torche plasma "Plasmatron gen.3" et d'un réacteur de post décharge. Ce dispositif est relativement compact, sa hauteur et son diamètre extérieur sont respectivement voisins de 12 et 5 cm.

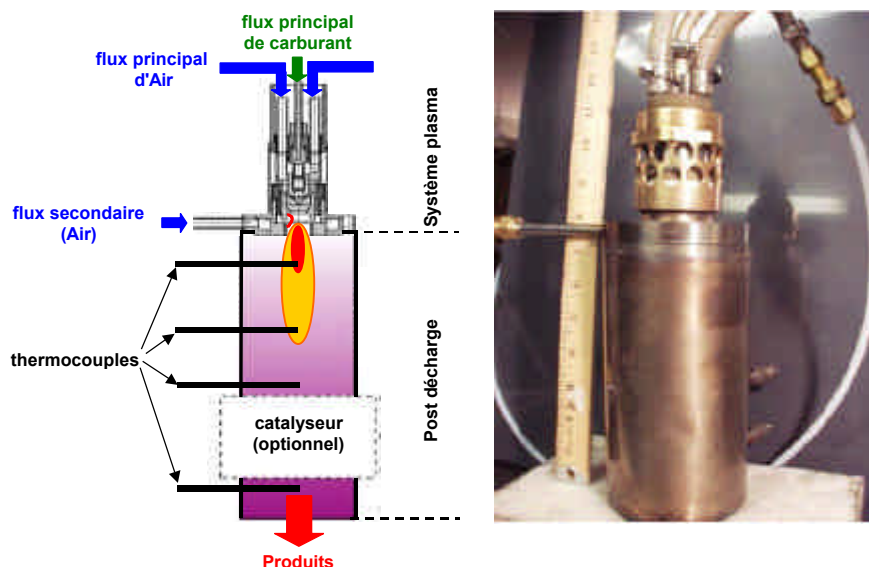


Fig.36 - Dispositif de reformage par plasma : "Plasmatron gen.3" développé au PSFC-MIT [76]

Les travaux de l'équipe du PSFC-MIT ont conduit à une technologie qui a été commercialisée par l'équipementier ARVIN MERITOR [75]. Cette technologie permet la production de gaz de synthèse qui est injecté simultanément avec le carburant dans un moteur à explosion classique, dans le but d'améliorer la combustion (réduction de la consommation ainsi que des émissions de particules et d'oxydes d'azote).

5.2 - Drexel Plasma Institute

L'équipe du Drexel Plasma Institute, a d'abord étudié l'oxydation partielle et le reformage autotherme de l'iso-octane dans un réacteur à décharges corona négatives [85]. Le réacteur plasma d'une longueur de 1.2 m est constitué d'une électrode centrale en inconel de faible diamètre (0.5 mm) située sur l'axe d'un tube de 22.2 mm de diamètre interne en acier inoxydable [Fig.37]. Le réacteur plasma est placé dans un four qui permet de contrôler la température. L'électrode tubulaire est branchée à la masse et l'électrode centrale est alimentée par des impulsions de tension ajustables jusqu'à 20 kV à des fréquences variables de 200 Hz à 2 kHz. La puissance nette maximum fournie par la source est de 20 W. Cette puissance peut varier en ajustant la tension maximale des impulsions et / ou leur fréquence. Cette équipe a également étudié le couplage d'un réacteur plasma avec un réacteur catalytique classique, situé en aval ou en amont du réacteur plasma.

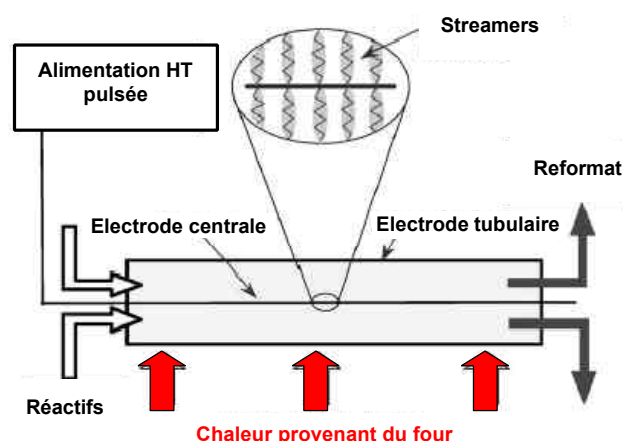


Fig.37 - Schéma du réacteur plasma à décharges corona développé au DPI [86]

Les résultats expérimentaux [86] montrent que l'action des décharges corona n'est sensible que lorsque le réacteur catalytique fonctionne à basse température ($<800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Le rendement de conversion du reformage est alors augmenté par la décharge. Cette augmentation est légèrement plus importante lorsque le réacteur plasma est situé en amont du système catalytique.

Les travaux effectués avec le réacteur à décharges corona concluent que ce procédé ne fournit pas suffisamment de puissance et qu'il faut utiliser des procédés plasmas hors équilibre de plus forte puissance. Le coût excessif et la complexité des systèmes micro-ondes et des canons d'électrons ont conduit cette équipe à évoluer vers des procédés d'arcs non thermiques dont les réacteurs plasmas ont été présentés précédemment :

- réacteur à arcs glissants “Tornado” GAT [Fig.31], [Fig.32]
- réacteur à disque plasma [Fig.29]

Les travaux présentés dans ce qui suit [59] concernent l'oxydation partielle du méthane. Le système [Fig.38] est constitué d'un réacteur à arcs glissants “tornado” (GAT) de 0.2 L et d'un échangeur thermique dans lequel la température des produits permet de chauffer les réactifs. Le GAT est alimenté par une source haute tension capable de fournir un courant de un ampère et des tensions pouvant atteindre dix kilovolts.

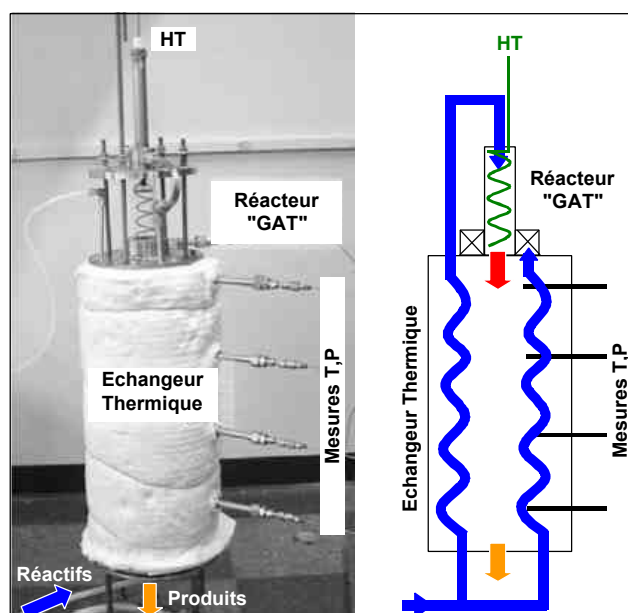


Fig.38 - Dispositif de reformage GAT développé au DPI [59]

Au cours des expériences la puissance fournie avoisinait 200 W. La température des réactifs en entrée se rapprochait de 700 K, et celle des produits en sortie atteignait 1050 K. Les expériences d'oxydation partielle ont été menées pour des valeurs de ratio O/C comprises entre 1.08 et 1.3. Le temps de séjour des espèces dans le réacteur plasma était voisin de 50 ms. Les expériences ont montré que l'arrêt du plasma conduisait à une importante formation de suies. Des mesures de la composition des gaz en sortie de torche et en sortie de l'échangeur ont montré que 95 % de la conversion obtenue s'effectuait au niveau de la torche plasma.

5.3 - Société “Etude Chimique et Physique”

La société ECP, basée à Orléans, a développé des prototypes et des pilotes de plus grande échelle basés sur la technologie glidarc présentée précédemment [Fig.22]. De nombreux hydrocarbures ont été testés : cyclohexane, heptane, toluène, essence (SP95), diesel, JP8¹⁷, éthanol, gaz naturel, propane, huile végétale (colza, soja) et biogaz¹⁸. En dépit de quelques expériences de craquage et de reformage au dioxyde de carbone, les principaux résultats publiés ont été obtenus par oxydation partielle en utilisant des réacteurs de type “Glidarc I” [Fig.39]. Les alimentations électriques utilisées sont constituées de transformateurs haute tension triphasés pouvant fournir des courants pouvant atteindre 5A par phase.

¹⁷ carburant utilisé dans l'aviation militaire

¹⁸ mélange de méthane et de dioxyde de carbone provenant de la fermentation anaérobie de déchets organiques.

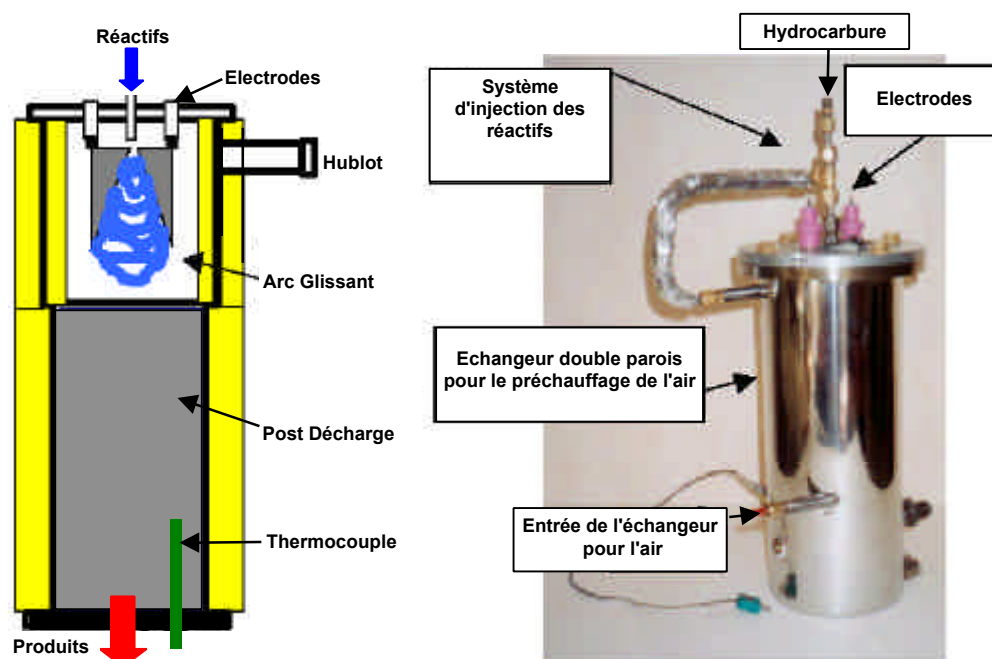


Fig.39 - Dispositif de reformage de type "Glidarc I" développé par la société ECP [91]

L'influence des composés soufrés présents dans les hydrocarbures a également été étudiée expérimentalement [91], l'auteur conclut que ces composés ne perturbent pas l'efficacité du procédé de manière significative. Un pilote de reformage d'environ 30 kW électrique dénommé "SYNGEN", a été développé au Canada [90]. Ce pilote était composé de plusieurs réacteurs "glidarc" disposés en série ou en parallèle. D'après les informations dont nous disposons, ce pilote n'a jamais été exploité industriellement.

5.4 - SIEMENS

La société SIEMENS a d'abord étudié le vaporeformage du méthane par décharge DBD¹⁹ [92, 93]. Les réacteurs DBD développés sont composés d'une anode et d'un tube métallique relié à la terre faisant office de cathode dans lequel est introduit le diélectrique constitué d'un tube en alumine. L'anode est constituée d'un axe coaxial à celui du réacteur et d'une succession de disques perpendiculaires à cet axe [Fig.40].

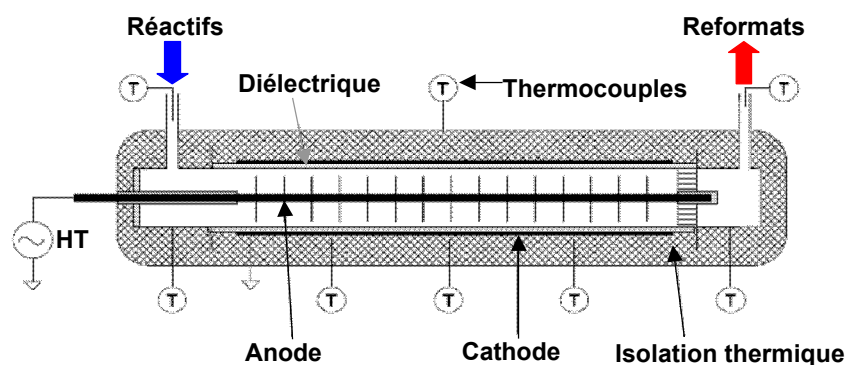


Fig.40 – Schéma d'un réacteur à barrière diélectrique développé par la société SIEMENS [92]

¹⁹ Décharges à Barrière Diélectrique

L'alimentation électrique était réalisée par une source haute tension pouvant fournir des courants pulsés²⁰ ou alternatifs à hautes fréquences comprises entre 5 kHz et 20 kHz et des pics de tension pouvant atteindre 30 kilovolts. Ce type de dispositif pouvait fournir des puissance comprises entre 50 W et 200 W. Les réactifs (mélange d'air et d'eau) étaient préchauffés en entrée de réacteur jusqu'à environ 400°C. L'ensemble du réacteur était contrôlé en température jusqu'à 600°C.

Comme précédemment, les auteurs sont arrivés à la conclusion [92] que la densité de puissance des dispositifs DBDs n'est pas suffisante. Cette équipe s'est alors intéressée à des procédés mettant en œuvre des faisceaux d'électrons, qui sont susceptibles de fournir des densités de puissance plus élevées [94]. Le principe de ces procédés est le suivant : des électrons sont produits et accélérés sous vide par un "canon à électrons" [Fig.41]. Ils traversent une fenêtre et créent un plasma à l'intérieur du réacteur.

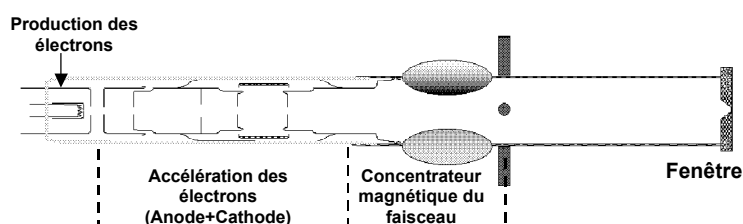


Fig.41 – Schéma de principe d'un canon à électrons [94]

L'intérêt principal de ce type de système réside dans le fait que l'émission des électrons est réalisée à l'extérieur de la chambre de réaction, et n'est donc pas soumise aux conditions variables de pression, température et composition qui y règnent. Le canon à électrons est généralement alimenté en courant continu et permet de générer un plasma de géométrie sphérique. Les résultats publiés concernent le reformage du méthane au dioxyde de carbone²¹, le vaporeformage et l'oxydation partielle. Deux réacteurs ont été utilisés [Fig.37] : une chambre de réaction de type "A" a été utilisée dans le cas du vaporeformage et du reformage à sec, une chambre de réaction de type "B" a été utilisée dans le cas de l'oxydation partielle.

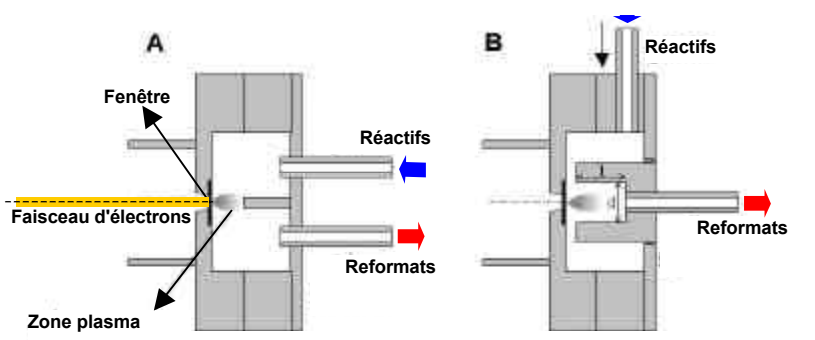


Fig.42 - Chambres de réaction associées au canon à électrons [94]

Les expériences ont été menées à partir d'un plasma de très faible puissance (inférieure à 0.5 W) et pour de très faibles débits pour des raisons technologiques.

²⁰ la durée des impulsions est inférieure à 10 μ s, l'énergie d'une impulsion avoisine 10 mJ

²¹ on parle alors de reformage à sec

Cette équipe a également développé une technologie de reformage par arc non thermique [95], dans le cadre de recherches sur la combustion en mélange pauvre. Le système [Fig.43] est constitué d'un brûleur couplé à une unité de reformage. Une partie du méthane (mélange riche) est convertie en gaz de synthèse par le biais d'une décharge puis injectée dans un milieu méthane/air pauvre afin d'y subir l'étape de combustion. Cet enrichissement en hydrogène confère à la flamme un comportement plus stable et permet une meilleure combustion. L'unité de reformage est composée d'un tube de 2.2 mm de diamètre qui se termine par un divergent relié à la terre. Une électrode centrale de 1,5 mm de diamètre, reliée à la haute tension et isolée par un tube en céramique traverse le reformeur jusqu'à la partie divergente. A la sortie du reformeur se trouve un déflecteur qui permet localement d'homogénéiser le plasma et de mélanger le gaz de synthèse obtenu avec le mélange pauvre [Fig.43].

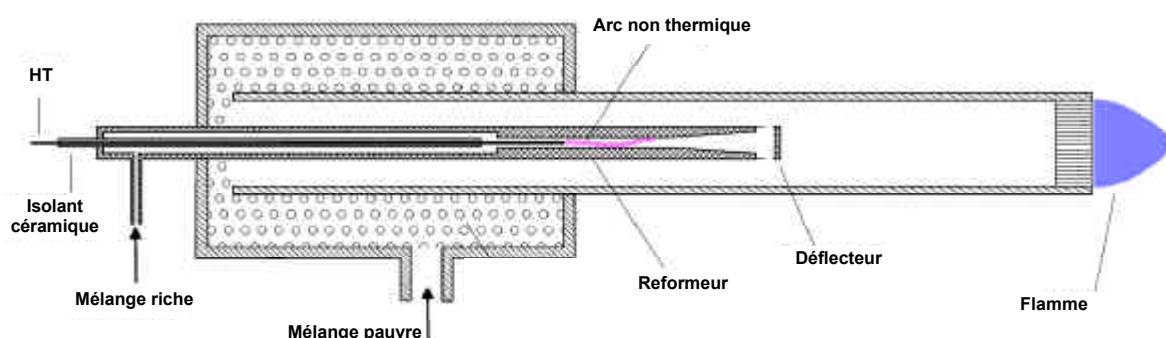


Fig.43 - Schéma du système à arc non thermique développé par SIEMENS [95]

L'alimentation électrique fournit des tensions et des courants maximums respectivement égaux à 6 kV et 350 mA. Les puissances atteintes varient entre 45 W et 75 W. Le coût énergétique de l'hydrogène produit varie entre 400 et 800 kJ/mole d'hydrogène en fonction des conditions opérationnelles. Aucune information sur la composition du reformat n'est donnée dans cette publication [95].

5.5 - GREMI

L'équipe du GREMI²² étudie depuis de nombreuses années le reformage assisté par arcs non thermiques. Des travaux ont notamment porté sur le vaporeformage du méthane par une technologie à arcs tournants [61] de type “Rotarc” qui a été présentée précédemment [Fig.23]. La valeur du coût énergétique de l'hydrogène produit au niveau du reformeur était voisine de 300 kJ/mole d'hydrogène.

Le vaporeformage [81] et le reformage autotherme²³ [82] du méthane ont également été expérimentés dans un réacteur à arcs glissants “Sliding Arc” présenté précédemment [Fig.27]. Les réactifs sont préchauffés et prémélangés avant d'être introduits dans le réacteur. Le coût énergétique pour produire de l'hydrogène augmente avec le rapport H_2O/C . La puissance électrique fournie au réacteur plasma était comprise entre 350 W et 1000 W. Dans le cas du reformage autotherme [82], les auteurs concluent que l'addition d'oxygène pur n'est pas une solution pour améliorer la conversion du méthane et l'efficacité du système.

²² Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés, CNRS, université d'Orléans

²³ l'oxygène est ici introduit pur

Cette équipe a également étudié le vaporeformage de l'éthanol à pression atmosphérique dans un réacteur plasma à arc non thermique [96]. La décharge a lieu entre deux électrodes en graphite de forme conique placées en vis-à-vis et séparées de 10 mm [Fig.44]. Le mélange d'éthanol et d'eau est directement préchauffé par passage à travers une des électrodes. La décharge est alimentée par un transformateur haute tension à fuites magnétiques qui fournit un courant alternatif à 50 Hz, dont la valeur efficace est voisine de 155 mA. La puissance fournie dans la décharge varie entre 57 W et 72 W en fonction des proportions éthanol / eau.

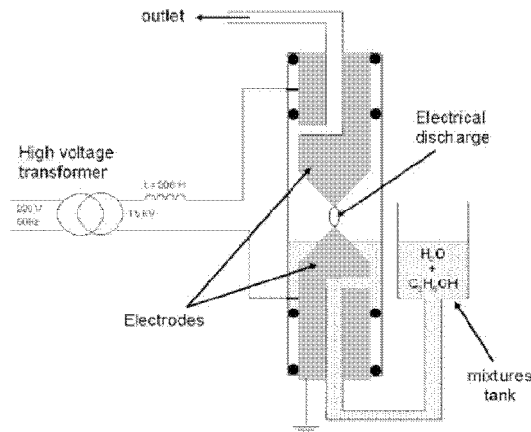


Fig.44 – Schéma du dispositif de vaporeformage d'éthanol à arc non thermique développé au GREMI [96]

Les auteurs concluent que les résultats expérimentaux sont voisins de ceux obtenus dans les réacteurs catalytiques et que l'utilisation industrielle d'un tel système pour la production de gaz de synthèse est envisageable, à partir notamment de bio-éthanol.

Cette équipe a également développé un réacteur pour l'enrichissement en hydrogène du carburant des moteurs à combustion interne [97]. La technologie employée est celle du "glidarc" [Fig.45] et [Fig.46], dans laquelle l'arc est soufflé par un mélange initialement composé d'air et de méthane. Deux électrodes planes divergentes sont situées dans un tube en quartz de 300 mm de longueur et de 22 mm de diamètre intérieur. L'espace inter-électrodes minimal est d'environ 1 mm.

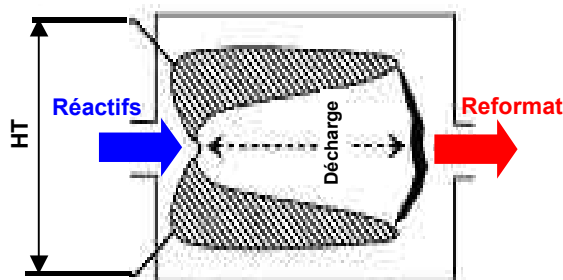


Fig.45 - Schéma du reformeur plasma développé au GREMI [97]

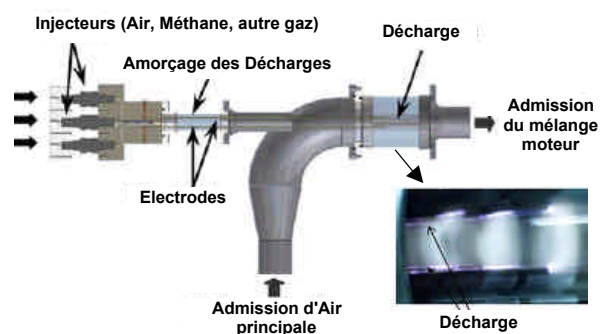


Fig.46 - Schéma du système global d'enrichissement en hydrogène du carburant développé au GREMI [97]

Au cours des expériences le débit d'air était fixé à 33 L/min et le ratio O/C variait entre 0.8 et 2.2. La puissance du plasma était comprise entre 35 W et 75 W. Pour un ratio O/C de 1.8, les

auteurs ont montré que le taux de conversion du méthane et la fraction molaire d'hydrogène augmentaient avec la puissance et atteignaient respectivement 58 % et 9 % pour une puissance maximale de 75 W.

5.6 - Département d'ingénierie chimique du Technology”

“Tokyo Institute of

Ce groupe de recherche a étudié le vaporeformage d'hexane par plasma micro-ondes à pression atmosphérique [98]. Le réacteur se compose d'un tube en quartz de 12 mm de diamètre intérieur et de 500 mm de longueur. Un guide d'onde concentre les champs électromagnétiques dans une portion du réacteur ce qui permet l'obtention d'un plasma. Les expériences ont été effectuées avec une alimentation micro-ondes de fréquence 2.45 GHz et de 2.8 kW de puissance maximale. Les auteurs ont montré que le rendement de reformage et le taux de conversion de l'hexane augmentaient avec la puissance du plasma. Pour un débit d'hexane de 0.81 mmole/s correspondant à un pouvoir calorifique de 3.1 kW et un ratio H_2O/C égal à 2, le rendement passait de 26 % à 59 % lorsque la puissance électrique variait de 1.6 kW à 2.5 kW. Le taux de conversion de l'hexane se situait entre 55 % et 75 %. Lorsque la puissance électrique était de 1.8 kW, le taux de conversion atteignait un maximum pour une valeur du ratio H_2O/C voisine de 1.6.

5.7 - Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas

L'équipe du LPGP a étudié [84], dans le cadre d'un partenariat avec le constructeur automobile Peugeot l'oxydation partielle et le reformage autotherme de l'iso-octane dans un réacteur DBD couplé à un catalyseur. Ce dernier est constitué d'un tube en quartz, de 14 mm de diamètre intérieur et de 2 mm d'épaisseur, revêtu d'une enveloppe en cuivre d'une longueur de 14.5 cm, qui constitue l'électrode externe. L'électrode interne est une tige en acier inoxydable de 5 mm de diamètre située sur l'axe du réacteur. La taille du volume réactionnel est d'environ 19.5 cm³. Les alimentations électriques utilisées fournissent des tensions pouvant atteindre 40 kV et des courants pulsés ou sinusoïdaux dont la fréquence peut atteindre 120 Hz. Les expériences ont lieu à pression atmosphérique. L'iso-octane est vaporisé dans l'air ou dans un mélange air / vapeur d'eau.

5.8 - Département de chimie appliquée de l'université de Waseda

Différentes études effectuées par le département de chimie appliquée de l'université de Waseda (Tokyo) présentent des travaux sur le reformage de composés hydrocarbonés par décharges pulsées de faible énergie. Ces études concernent des réacteurs plasma de laboratoire de faible puissance électrique (inférieure à 100 W) mettant en jeu de faibles débits de carburant.

Le premier réacteur développé était constitué d'un tube en quartz de 4 mm de diamètre et de deux électrodes coaxiales de 2 mm de diamètre en acier inoxydable.

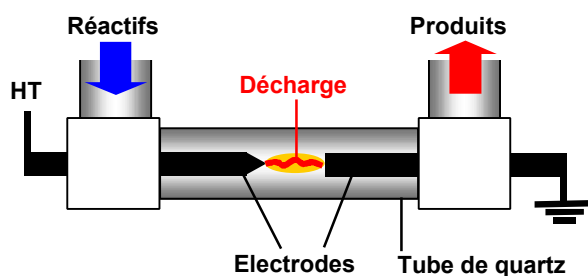


Fig.47 –Schéma du réacteur à décharges pulsées développé à l'université de Waseda [99]

Ce réacteur a été utilisé dans le cadre de plusieurs expériences concernant notamment :

- la conversion du méthane à pression atmosphérique par craquage, oxydation partielle, reformage au dioxyde de carbone et vaporeformage [99].
- le vaporeformage de composés hydrocarbonés à pression atmosphérique (méthane, propane, hexane, cyclohexane, méthanol et éthanol) [100].

Dans ces expériences, les réactifs étaient préchauffés et introduits en phase gazeuse dans le réacteur. Les auteurs ont montré que la puissance fournie par l'alimentation électrique augmentait avec la fréquence des impulsions. Les auteurs ont ensuite utilisé une électrode constituée de fibres de carbone pour “pomper”, préchauffer et vaporiser les réactifs et ainsi s'affranchir d'un système externe de préchauffage [101]. Dans ce dispositif, les réactifs initialement en phase liquide remontaient par capillarité le long des fibres de carbone et étaient vaporisés par la puissance thermique du système.

Les auteurs se sont ensuite intéressés au vaporeformage d'éthanol par l'établissement de décharges pulsées en phase liquide [102]. Le réacteur développé est constitué d'une paire d'électrodes situées à l'intérieur d'un tube en pyrex de 100 mm de diamètre intérieur et de 150 mm de longueur. Une membrane en téflon dans laquelle est percé un orifice de faible diamètre (compris entre 0.2 mm et 2 mm) est placée à l'intérieur du tube entre les deux électrodes [Fig.48].

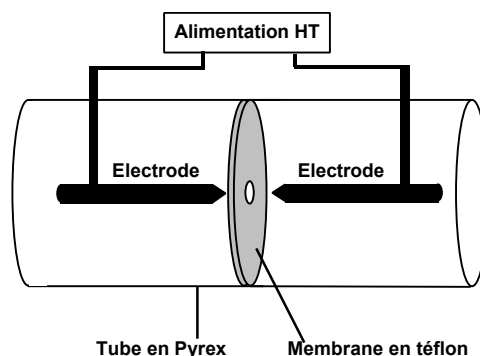


Fig.48 –Schéma du réacteur à membrane développé à l'université de Waseda [102]

Les deux électrodes sont plongées dans un mélange liquide d'éthanol et d'eau à température ambiante et à pression atmosphérique. D'après les auteurs, la membrane percée permet de limiter l'érosion des électrodes et assure la stabilité des décharges. Ce procédé original permet le reformage d'un mélange d'éthanol et d'eau à pression atmosphérique.

5.9 - Equipe plasma du CEP

Lors de travaux antérieurs concernant le reformage d'hydrocarbures par plasma non thermique [54], l'équipe plasma du CEP a développé un réacteur plasma à arcs glissants ainsi que son alimentation haute tension. Le réacteur se compose d'une enceinte en acier inoxydable de 6.3 L et de deux paires d'électrodes planes divergentes placées en série [Fig.49]. L'alimentation est composée de deux étages haute tension pouvant fonctionner en courant continu ou en courant alternatif à 50 Hz. Le premier et le deuxième étage haute tension peuvent respectivement fournir des différences de potentiel et des puissances de 5 kV- 2 kW et de 10 kV- 4 kW. Plusieurs géométries de chambres de décharge cylindriques et parallélépipédiques ont été développées.

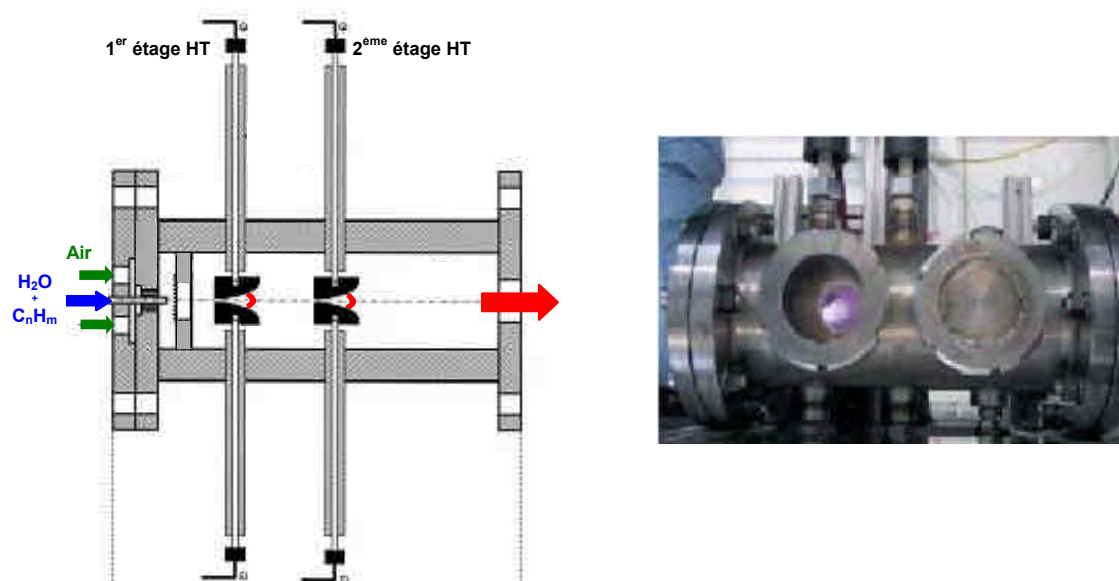


Fig.49 –Réacteur de reformage à arcs glissant développé au CEP [54]

Les expériences ont concerné le reformage de l'essence²⁴ à des pressions comprises entre 1 et 3 bars, pour des ratios O/C variant de 0.3 à 1.2 et des ratios H₂O/C compris entre 1 et 5. Les réactifs étaient préchauffés à 500 °C. L'eau et l'essence étaient introduites prémélangées et l'air était introduit séparément. La puissance maximale du plasma était d'environ 1 kW pour un débit de carburant correspondant à 10 kW²⁵. Les auteurs ont montré que le rendement de reformage augmentait avec la température de réaction et avec la pression. Pour des ratio O/C et H₂O/C respectivement égaux à 1.2 et 2.5, le rendement passait de 12.3 % à 27 % lorsque la pression variait de 2 bars à 2.5 bars.

²⁴ les études ont concerné deux types d'essence : une essence désulfurée de composition moyenne C₇H_{15.2} et une essence commerciale de type sans plomb 95

²⁵ relatif au PCI du carburant

6 - Conclusion

Actuellement, l'hydrogène est presque exclusivement utilisé en tant que produit chimique et ses applications énergétiques sont extrêmement limitées. Pour des raisons économiques, il est aujourd'hui principalement produit à partir de combustibles fossiles. Néanmoins avec le développement des piles à combustible et la nécessité de réduire les émissions de dioxyde de carbone, son utilisation en tant que vecteur énergétique offre des perspectives largement supérieures aux utilisations actuelles.

La production industrielle d'hydrogène est maîtrisée et fait appel à des procédés matures et optimisés. Cependant, l'utilisation directe d'hydrogène comme vecteur énergétique pour des applications embarquées, doit faire face à l'absence d'infrastructure de distribution et à des difficultés technologiques liées au problème du stockage de l'hydrogène. Une étape transitoire probable avant le passage à une infrastructure "direct hydrogène", consiste à produire l'hydrogène à bord du véhicule à partir des carburants automobiles traditionnels. Les dispositifs de reformage embarqués sont des systèmes complexes et non optimisés qui sont aujourd'hui principalement basés sur des procédés catalytiques. Ces systèmes souffrent de certaines limites en terme notamment de compacité, de temps de réponse et d'empoisonnement des catalyseurs. La mise au point de nouveaux dispositifs basés sur l'utilisation de plasma sont susceptibles d'apporter une alternative intéressante aux procédés actuels.

L'analyse de la littérature a montré que de nombreuses études sur le reformage par plasma non thermique ont été réalisées et de nombreuses technologies développées. Ces études établissent clairement que la physico-chimie du plasma dépend de la manière dont l'énergie est injectée dans le milieu et pas uniquement de la quantité d'énergie fournie. Par ailleurs elles montrent que le couplage entre l'alimentation électrique et le plasma joue un rôle déterminant dans la mise au point des procédés.

Le choix d'une technologie plasma adaptée à l'application visée, s'est basé sur l'analyse de la littérature et sur la prise en compte de considérations technologiques : efficacité du procédé, contrôle de la décharge : homogénéité du plasma, contrôle du courant et / ou de la puissance, intégration du procédé dans un système de reformage embarqué. Cette analyse nous a amené à porter notre choix, sur les arcs non thermiques.

Chapitre II

Développement d'une torche plasma haute tension faible courant et de son alimentation électrique.

- 1 - Développement d'une torche plasma haute tension et faible courant
- 2 - Alimentation électrique
- 3 - Caractérisation électrique de la torche plasma couplée à une alimentation électrique de type convertisseur à résonance

Table des matières du chapitre II

1 - DEVELOPPEMENT D'UNE TORCHE PLASMA FONCTIONNANT A HAUTE TENSION ET FAIBLE COURANT

1.1 - LES DIFFERENTS PROTOTYPES	71
1.1.1 - Prototype 0.....	71
1.1.2 - Prototype 1.....	71
1.1.3 - Prototype 2.....	72
1.1.4 - Prototype 3.....	72
1.1.5 - Prototype 4.....	72
1.2 - PRINCIPE DE LA TORCHE PLASMA	74
1.2.1 - Description de la Tuyère.....	74
1.2.2 - L'électrode centrale.....	74

2 - ALIMENTATION ELECTRIQUE

2.1 - INTRODUCTION	75
2.2 - CARACTERISTIQUE DE LA DECHARGE	75
2.2.1 - Nature de la décharge.....	75
2.2.2 - Stabilité de la décharge.....	76
2.2.3 - Notion de Dualité.....	76
2.3 - LES GENERATEURS DE DECHARGE	77
2.4 - GENERATEUR HAUTE TENSION ELECTROTECHNIQUE	77
2.4.1 - Description.....	77
2.4.2 - Arc glissant alimenté par la source électrotechnique.....	79
• Le phénomène "d'arc glissant"	79
• Caractérisation électrique de l'arc glissant alimenté par la source électrotechnique	80
2.5 - GENERATEURS HAUTE TENSION D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE	81
2.5.1 - Description du convertisseur à double résonance.....	81
2.5.2 - Caractérisation de la source "convertisseur à résonance"	83

3 - CARACTERISATION ELECTRIQUE DE LA TORCHE PLASMA COUPLEE A UNE ALIMENTATION DE TYPE CONVERTISSEUR A RESONANCE.

3.1 - INTRODUCTION	85
3.2 - ANALYSE ELECTRIQUE	85
3.3 - RAPPEL SUR LA PHYSIQUE DE L'ARC.....	87
3.3.1 - Les différentes zones de l'arc	88
3.3.2 - L'effet de balayage : "sweeping effect"	88
3.4 - LES DIFFERENTS REGIMES DE DECHARGE OBSERVES A PRESSION ATMOSPHERIQUE	89
3.5 - REGIME DE STREAMER	90
3.6 - REGIME GLIDARC :	92
3.6.1 - Description.....	92
3.6.2 - Influence de la géométrie de la torche.....	93
• Régime "Glidarc 1"	93
• Régime "Glidarc 2"	94

• Régime “Glidarc 3”	94
• Fréquences des régimes glidarc	95
3.7 - REGIME CONTINU.....	96
3.7.1 - Description.....	96
3.7.2 - Influence de la longueur de la torche	96
3.8 - INFLUENCE DU DEBIT DE GAZ	97
3.8.1 - Transition Streamer / Glidarc	97
3.8.2 - Transition Glidarc / Continu	97
3.8.3 - Influence du débit en régime glidarc	98
3.8.4 - Influence du débit en régime continu.....	100
3.9 - INFLUENCE DE LA PRESSION	100
3.9.1 - Régimes de décharge en fonction de la pression.....	100
3.9.2 - Influence de la pression en régime glidarc	101
3.9.3 - Influence de la pression en régime continu.....	102
3.10 - INFLUENCE DU COURANT	103
3.10.1 - Influence du courant en régime glidarc	103
3.10.2 - Influence du courant en régime continu.....	104
3.11 - INFLUENCE DE L’ALIMENTATION ELECTRIQUE.....	105
3.11.1 - Régime glidarc.....	105
3.11.2 - Régime continu	106
4 - CONCLUSION	108