Les Plasmas

3.1 - Définition

Les plasmas constituent le quatrième état de la matière après les états solide, liquide et gazeux. Ce concept a été introduit par Langmuir et Tonks en 1929. Un plasma est un fluide partiellement ou totalement ionisé constitué de molécules, d'espèces excitées, d'atomes, de radicaux, d'ions et d'électrons.

Ces phénomènes d'ionisations proviennent des collisions entre particules. L'énergie cinétique des particules (électrons, ions, espèces neutres et même photons[4]) est transformée totalement ou partiellement en énergie d'ionisation lors de la collision. Cette activité du milieu caractérise l'agitation des particules. Elle est représentée par la moyenne de l'énergie cinétique de l'ensemble des particules qui est liée à la température par la relation de Boltzmann :

$$\frac{1}{2}\,m.\overline{v^2} = \frac{3}{2}\,k_b.T \qquad \text{[Eq.14]}$$

Avec m la masse de la particule, $\left(\overline{v^2}\right)^{1/2}$ la moyenne quadratique de la vitesse de la particule, k_b la constante de Boltzmann et T la température absolue (K).

Cette équation suppose que les vitesses suivent une distribution de type Maxwell-Boltzmann [33].

L'agitation des particules est alors qualifiée d'agitation thermique. Lors d'une ionisation, un ou plusieurs électrons peuvent être émis et entrer à leur tour en collision. S'ils possèdent suffisamment d'énergie, ils peuvent à nouveau ioniser des particules. Ceci constitue un phénomène auto entretenu appelé cascade ou "décharge de Townsend".

Une particule peut être excitée et / ou ionisée :

- soit en chauffant le milieu afin d'augmenter son agitation thermique
- soit en accélérant les espèces chargées présentes dans le milieu (électrons et ions), sous l'action d'un champ électromagnétique pour provoquer l'ionisation d'autres espèces par collision.

L'agitation des électrons n'est pas toujours égale à celle des espèces neutres ou ionisées qui sont plus lourdes que les électrons et donc plus difficiles à accélérer. Ainsi, une température peut être associée à chaque particule en fonction de l'énergie cinétique de la particule considérée. Les électrons possèdent une température "T_e" (température électronique) et les espèces lourdes (ions et espèces neutres) une température "T_L".

$$T_e = \frac{1}{3}\,\frac{m_e}{k_b}.\overline{v_e^{\,2}} \qquad\qquad T_L = \frac{1}{3}\,\frac{m_L}{k_b}.\overline{v_L^{\,2}} \qquad \text{[Eq.15]}$$

[4] il faut alors considérer l'énergie du photon

Ces températures représentent uniquement l'état d'agitation des particules considérées et ne sont pas égales à la température physique. D'ailleurs, dans le domaine des plasmas hors équilibre thermodynamique, la notion même de température n'a pas de sens, on l'exprime alors comme une énergie, en électron volt.

Ainsi deux grandes catégories de plasmas peuvent être distinguées [Fig.8]. Pour de basses pressions ou pour de faibles puissances (courants), la température électronique T_e et la température des espèces lourdes T_L diffèrent. Dans ces conditions physiques, les espèces lourdes et légères interfèrent peu et se comportent différemment chacune en fonction de leurs caractéristiques propres. Il s'agit alors de plasma hors équilibre ou plasma froid. Lorsque la pression (= nombre d'espèces lourdes par unité de volume) et / ou l'intensité (= nombre de particules chargées par unité de volume) augmentent, le nombre de collisions augmente ce qui homogénéise l'agitation du milieu. Lorsque les particules possèdent toutes la même agitation thermique, $T_e = T_L$, c'est le domaine des plasmas thermiques.

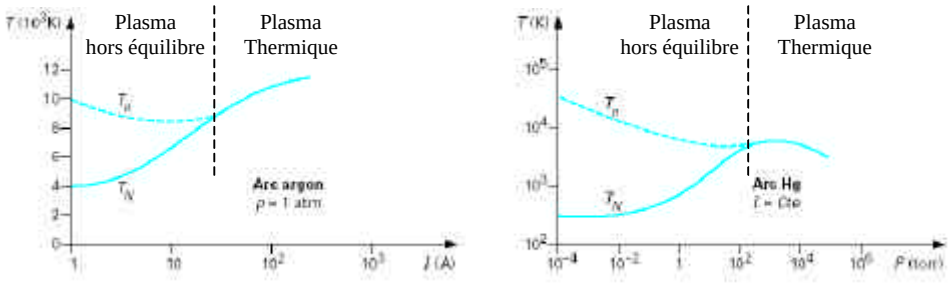


Fig.8 - Evolution de la température des électrons (T_e) et des espèces neutres (T_N) dans une décharge d'arc à pression et courant variable [34]

3.2 - Différents types de plasmas

Le terme plasma regroupe de nombreux domaines et phénomènes et il existe une grande diversité de plasmas autour de nous (flamme, foudre, tube luminescent, arc électrique…), qui peuvent être classés en fonction de la densité d'espèces chargées dans le milieu et de la température électronique [35]. Dans la suite de ce rapport, nous nous intéressons uniquement aux plasmas de type décharge créés par un champ électromagnétique.

3.2.1 - Caractéristique courant tension

L'application d'une tension continue entre deux électrodes reste la méthode la plus classique pour réaliser une décharge.

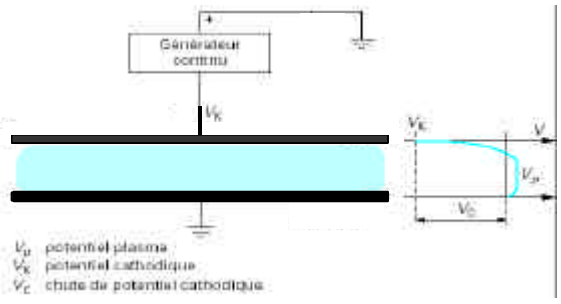


Fig.9 - Génération de décharge à courant et tension continu [34]

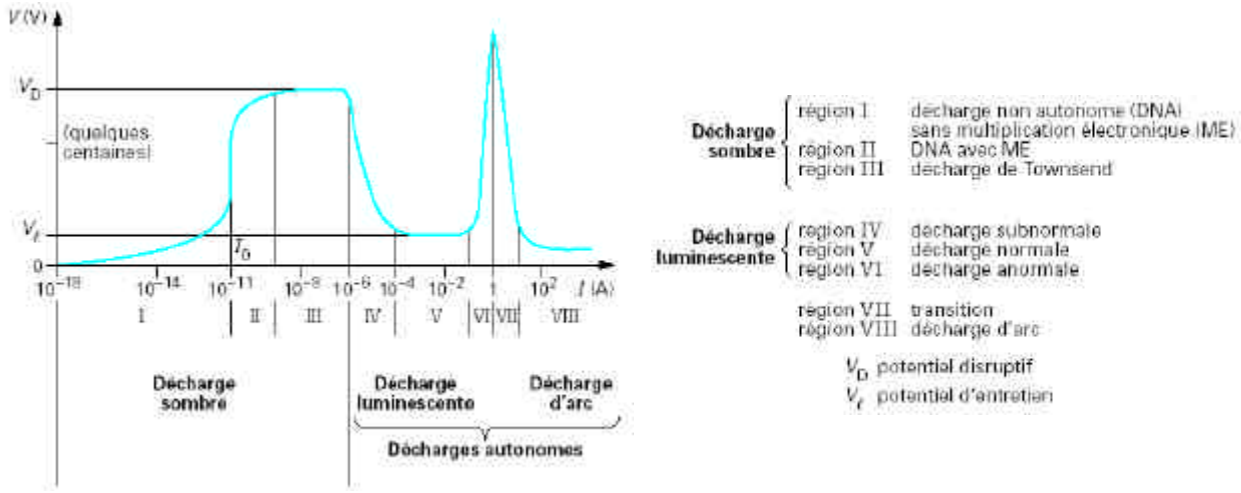


Fig.10 - Caractéristique courant-tension d'une décharge à courant continu [34]

Le graphe de la figure [Fig.10] présente l'évolution de la tension aux bornes d'une décharge en fonction du courant. La caractéristique courant tension de la décharge est composée de différentes zones. Les frontières entre ces zones correspondent à des phénomènes particuliers :

- entre la zone I et II : "1ère avalanche de Townsend"
- entre la zone II et III : "2ème avalanche de Townsend"
- entre la zone III et IV : "claquage électronique"
- puis on évolue vers l'arc thermique avec le pic de transition (zone VI, VII)

3.2.2 - Théorie des plasmas

La figure [Fig.11] représente sur la caractéristique courant tension, les différents régimes de plasma. Pour chaque régime, différents procédés industriels sont associés.

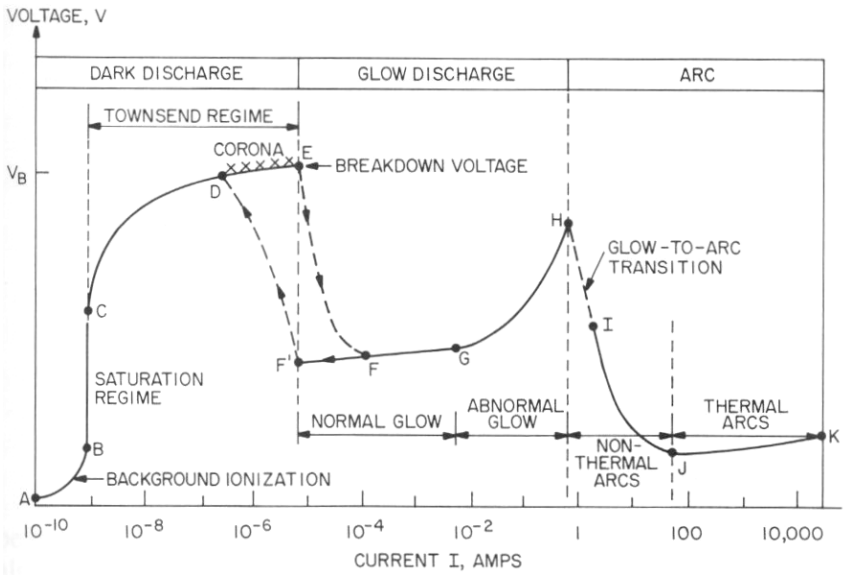


Fig.11 - Caractéristique courant-tension des décharges à courant continu et régimes associés [35]

Initialement, les plasmas étaient générés sous de très faibles pressions. Les théories qui ont été développées pour les plasmas sous vide considèrent les paramètres globaux (vitesse globale, champ global, …) et des lois statistiques de répartitions.

Dans le cas des plasmas à pression atmosphérique et au-delà, le modèle de Townsend (modèle de comportement global des particules du milieu : champ global, vitesse globale …) n'est plus applicable [36] et il faut utiliser d'autres modèles comme la théorie des streamers (dards ou filaments locaux) [Fig.12]. Concrètement, cela signifie qu'à de telles pressions, les densités élevées des molécules ne permettent plus de considérer des comportements isotropes et homogènes et ce sont les phénomènes locaux qui priment (champs électriques locaux, propagations locales des streamers…).

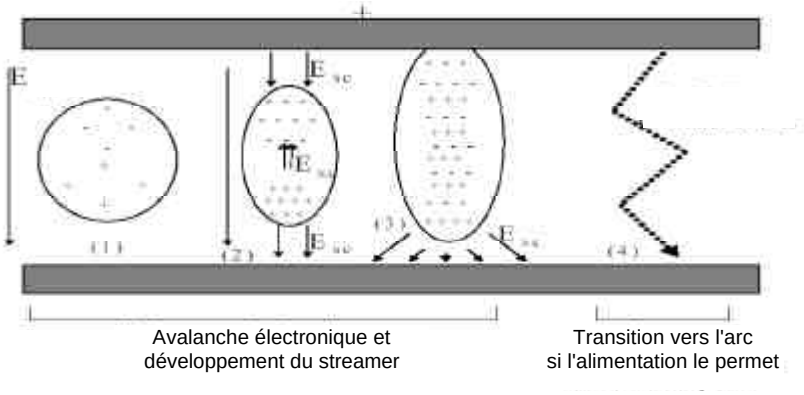


Fig.12 - Représentation du développement d'une décharge [38]

La figure [Fig.12] représente le développement d'une décharge. Les espèces initialement soumises au champ électrique global "E" entre les électrodes, se déplacent et créent des champs électriques locaux "E_{sc}" qui deviennent prépondérants et déclenchent l'ionisation localisée du milieu (décharge filamentaire).

3.2.3 - Théorie du Streamer

D'un point de vue purement théorique, le développement d'un streamer / décharge filamentaire ne nécessite qu'un unique électron initial. Cet électron devra être suffisamment accéléré pour engendrer le phénomène d'avalanche électronique.

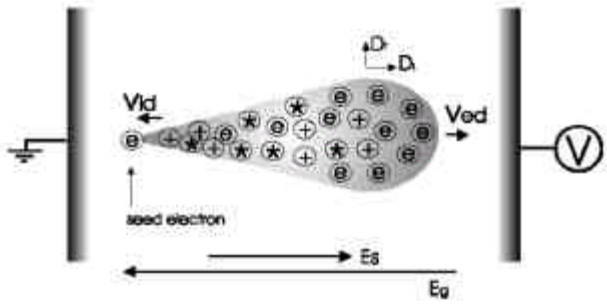


Fig.13 - Avalanche électronique à partir d'un électron source [38]

Si suffisamment d'électrons sont présents initialement et génèrent tous un streamer sans interagir les uns avec les autres, on pourra obtenir une décharge homogène (vision théorique du phénomène). Cependant, une décharge à la pression atmosphérique ou supérieure aura tendance à se développer de

manière inhomogène. Des décharges homogènes ne peuvent s'obtenir que sous certaines conditions très particulières qui nécessitent notamment une adaptation décharge / alimentation très "pointue".

Les électrons présents initialement dans le milieu sont nécessaires au développement des streamers. Ils peuvent provenir de différents phénomènes :

- Photo ionisation à différentes fréquences (UV,…, RX)
- Faisceaux à électrons (troisième électrode)
- Effets mémoire (les électrons proviennent des décharges et avalanches précédentes et ont été piégés dans le milieu)

Dans l'air ambiant, on trouve 100 à 1000 électrons par cm^3 (phénomène d'ionisation naturelle).

La pression apparaît comme un facteur important dans l'apparition et le comportement de la décharge. Des lois la relient à divers paramètres électriques, ce qui autorise le concept de décharge équivalente, obtenu par variation compensatoire de facteurs corrélés entre eux. Mais il convient de tenir compte également des effets thermiques qui ne suivent pas les lois de similarité [37]. Ainsi, l'accroissement de la pression entraîne un confinement de la chaleur au cœur du canal de décharge.

Constantes de similarité E/N j/N^2 μ/N

Avec : " μ " la mobilité,"E" le champ électrique, et "N" la densité moléculaire

Equation de l'énergie :

$$j\vec{E} + \frac{1}{r}\frac{?}{?r}\left(?.r.\frac{?T}{?r}\right) = 0 \qquad \text{[Eq.16]}$$

En divisant par N^3 on retrouve les constantes de similarité

$$\frac{j}{N^2}\frac{\vec{E}}{N} + \frac{1}{N.r}\frac{?}{?N.r}\left(\frac{?}{N}.N.r\frac{?T}{?N.r}\right) = 0 \qquad \text{[Eq.17]}$$

Seul le terme $\frac{?}{N}$ ne suit pas la loi de similarité ce qui indique que plus la pression est élevée, plus le terme de diffusion est faible. L'énergie est moins dissipée vers l'extérieur. Ce confinement conduit à haute pression à un mécanisme de développement du streamer appelé "leader" qui confirme la tendance inhomogène et filamentaire des plasmas à pression atmosphérique ou supérieure. En d'autres termes, à haute pression, la décharge et la chaleur se confinent dans un canal ionisé [Fig.14] où l'on constate une forte décroissance de la densité des neutres.

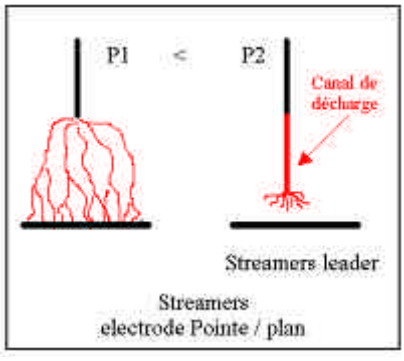


Fig.14 - Décharges basse et haute pressions, canal de décharge

3.2.4 - Chimie dans les phénomènes de décharge

Dans les modélisations de processus basés sur des plasmas hors équilibre thermodynamique, différentes phases peuvent être distinguées [38] :

- La phase de développement du streamer (onde d'ionisation), création des radicaux d'espèces primaires, excitation, ionisation des espèces.
- La phase de décharge, création des radicaux d'espèces secondaires.
- La phase de post décharge : réactions chimiques et destructions des radicaux (on parle de chimie de post décharge ou de chimie du plasma).

Il est maintenant établi que la physico-chimie engendrée par le plasma dépend de la manière dont l'énergie est injectée dans le milieu et pas seulement de la quantité d'énergie fournie [39]. Cela induit des différences entre plasma filamentaire et plasma homogène. Pour une même densité d'énergie fournie au milieu, les espèces actives sont similaires. Seule la répartition spatiale change : dans un cas, les espèces actives sont situées en périphérie des filaments et dans l'autre, les espèces actives sont réparties de manière homogène.

De nombreux modèles de simulation sont à l'étude pour déterminer le développement spatio-temporel d'un streamer [40-41]. Ils prennent en compte plusieurs centaines de réactions chimiques (incluant les espèces métastables) [42].

3.3 - Intérêt des plasmas hors équilibre dans le reformage assisté par plasma

Un certain nombre de travaux sur le reformage par plasma [43-44], notamment au PSFC-MIT [62-64], portait sur l'utilisation de plasmas thermiques à partir de torches plasma classiques à courant continu. Ce type de plasma se caractérise par une forte densité énergétique et une température très élevée, nécessaires pour homogénéiser le niveau d'excitation des espèces lourdes et légères. Cela favorise la cinétique des réactions, mais conduit en contre partie à un coût énergétique très élevé. Dans le cadre du reformage par plasma, différentes études [62-64] ont montré que l'utilisation des plasmas hors équilibre thermodynamique permet d'obtenir des taux de conversion équivalent à ceux obtenus par plasma thermique, à des coûts énergétiques nettement plus faibles. La comparaison des différents résultats obtenus par le PSCF-MIT est représentée sur la figure [Fig.15], dans laquelle "old-plasmatron" correspond au plasma thermique et "new-plasmatron" à un système plasma hors équilibre thermodynamique.

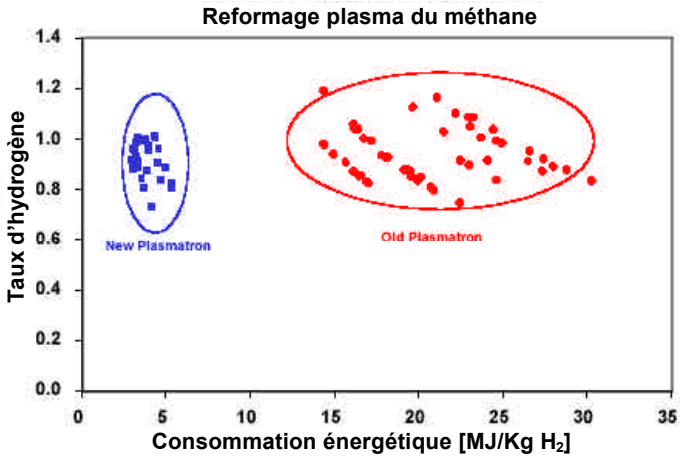


Fig.15 - Taux d'hydrogène (H_2 produit / H_2 dans le carburant) fonction de l'énergie électrique consommée [69]

Dans le cas des plasmas hors équilibre la densité énergétique est beaucoup plus faible. Les électrons qui possèdent des vitesses beaucoup plus élevées, entrent en collision avec les espèces lourdes et créent des radicaux susceptibles d'accélérer certaines réactions chimiques.

3.4 - Plasmas hors équilibre thermodynamique

Plusieurs techniques permettent l'obtention de plasma hors équilibre. Une technique qui est utilisée dans les procédés DBDs et OAUGDPs consiste à utiliser une barrière diélectrique pour empêcher la transition de la décharge vers un régime thermique. On peut également agir sur l'alimentation électrique en contrôlant le courant et / ou la puissance transmise au système (procédés corona, décharge micro-onde, arc non thermique). Une autre alternative consiste à souffler l'arc hydrodynamiquement afin d'empêcher sa stabilisation (procédés "Glidarc" ou "Rotarc" situés à la limite entre les plasmas hors équilibre et les plasmas thermiques). Ces différents procédés sont présentés dans la suite de ce rapport

3.4.1 - Décharges corona à pression atmosphérique

L'effet corona est connu depuis l'antiquité dans la marine à voile comme "feu de Saint Elme", et craint de la population comme prélude de la foudre. Ce phénomène est maintenant maîtrisé et utilisé dans l'industrie. Par rapport aux barrières diélectriques (DBD), le volume des décharges corona est moindre et elles conduisent à des concentrations et des flux d'espèces actives limités. Ce type de décharge est néanmoins utilisé dans certains procédés industriels tels que par exemple le traitement de surface dans les polymères.

- **Caractéristiques des décharges et des sources de décharges corona**

Les décharges corona sont générées dans les régions de fort champ électrique avoisinant les pointes, les fils et les bordures de morceaux métalliques. Pour les utilisations industrielles à pression atmosphérique, la géométrie filaire est la plus utilisée. L'électrode coronale est entourée d'une région

active délimitée par un rayon critique r_0. Dans cette région, le champ électrique est supérieur au champ de claquage[5]. L'ionisation, l'excitation et la production d'espèces actives se situent dans la région active qui peut être visible si les courants sont suffisamment élevés. Les décharges corona nécessitent des tensions de 10 à plusieurs dizaines de kilo-volts avec des courants de 1 à 100 mA/m. Les sources corona utilisées industriellement n'opèrent généralement pas à des puissances supérieures à 1 kW.

Les décharges corona peuvent être produites soit par des excitations à courant continu (DC) [45] soit par des excitations alternatives hautes fréquences (AC/RF). Les décharges corona positives (fil central chargé positivement) sont généralement uniformes, alors que les décharges corona négatives peuvent être constituées de bourrelets irréguliers formant des sphères lumineuses le long de l'électrode. Lorsqu'une décharge corona est excitée en fréquence (AC ou RF), des couronnes positives et négatives se succèdent. Il n'y a pas de production d'espèces ionisées en dehors de la région active. Seules les espèces ionisées présentes naturellement dans le gaz et celles qui ont migré de la zone active assurent le transport du courant de la décharge corona jusqu'à l'électrode extérieure (il n'y a pas de phénomène de claquage dans la région non active). Ce flux d'ions est appelé vent coronal ou vent ionique. Le rayonnement ultraviolet de la région active de la décharge coronale peut changer l'énergie de surface de certains matériaux, et affecter la capacité de certaines surfaces à se charger en courant statique.

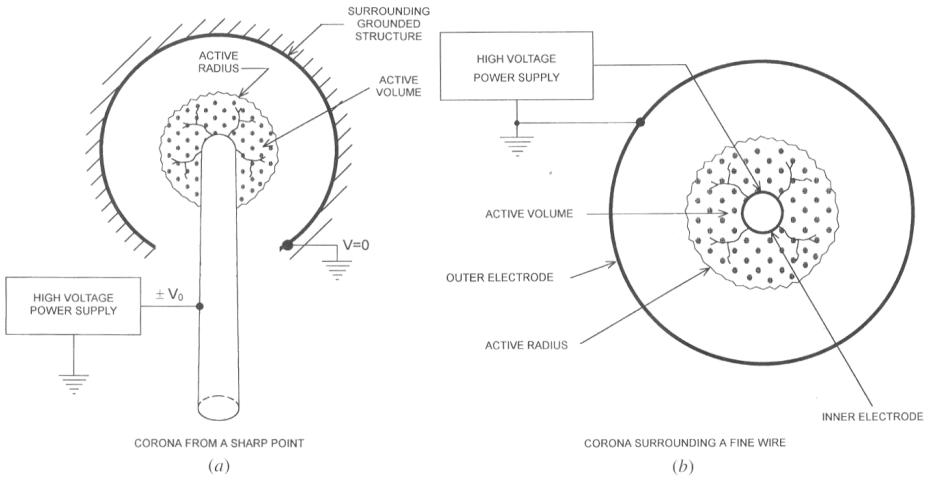


Fig.16 - Configuration des électrodes dans les procédés corona
(a) électrode pointe, (b) électrode fil [35]

Les décharges corona sont de faible puissance, mais elles ont l'avantage d'être physiquement robustes, d'être produites par des électrodes de géométrie simple, à des pressions supérieures ou égales à la pression atmosphérique. Leur inconvénient principal réside dans le faible taux d'espèces actives qu'elles produisent, ce qui en limite l'utilisation à des procédés nécessitant de faibles énergies [46].

[5] le champ électrique est égal au champ de claquage à la limite $r = r_0$

3.4.2 - Décharges à barrière diélectrique (DBDs)

Les décharges à barrières diélectriques à pression atmosphérique ont une longue histoire. Les premiers brevets, Allemands, datent de 1860. Ils ont été déposés en vu de produire de l'ozone pour la désinfection de l'eau. Plus récemment, l'imprimerie a dû, pour des raisons environnementales, substituer les encres à base de solvants organiques aux encres aqueuses. Les DBDs permettent d'améliorer l'impression en agissant par un traitement de surface sur la mouillabilité du papier.

- **Caractéristiques des DBDs**

Les procédés DBDs industriels sont basés sur des électrodes qui sont : soit planes pour traiter la surface des papiers par exemple, soit cylindriques comme dans les ozoneurs.

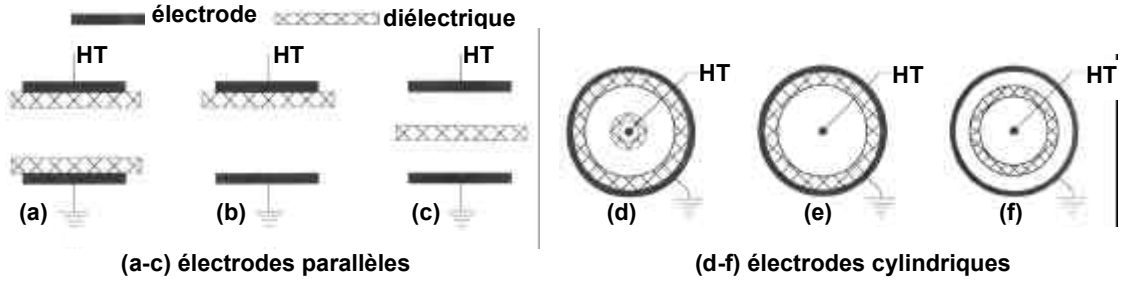


Fig.17 - Schémas des électrodes de différents procédés DBD [35]

L'une des électrodes au moins est recouverte d'une barrière diélectrique qui empêche le passage du courant[6]. Lorsqu'on applique une tension continue, un champ électrique apparaît dans le volume inter-électrode. Les électrons se déplacent de la cathode vers l'anode ce qui instaure un équilibre électrostatique. Pour sortir de cet équilibre électrostatique et générer un plasma, il faut alimenter le système en courant alternatif ou pulsé. Il y a alors production d'espèces actives à chaque alternance. Le développement d'un filament ionisé dans une DBD est illustré par la figure [Fig.18]. Une décharge peut être initiée dans l'espace inter-électrodes si on applique une tension suffisamment élevée pour créer un champ électrique supérieur ou égal au champ de claquage du fluide. L'émission électronique de la cathode peut être provoquée soit par un champ électrique local suffisamment élevé, soit par photo-émission (excitation par UV…). Les électrons émis par la cathode sont accélérés par le champ électrique inter-électrodes jusqu'à atteindre des énergies égales ou supérieures à l'énergie d'ionisation du gaz. On obtient alors le phénomène d'avalanche électronique dans lequel le nombre d'espèces ionisées croît exponentiellement au cours des collisions successives. La grande mobilité des électrons comparée à celle des ions, permet au nuage électronique de se déplacer à travers l'espace inter-électrodes dans des temps très courts. Les électrons laissent derrière leur passage (après chaque collision) des ions ou des espèces actives excitées qui peuvent réagir chimiquement entre elles. Lorsque le nuage électronique atteint le diélectrique opposé, les électrons s'étalent sur sa surface, contrecarrant la charge positive de l'anode. Le champ électrique local est ainsi réduit ce qui met fin au phénomène d'ionisation.

[6] dans certains cas la barrière diélectrique peut être située entre les deux électrodes

Les avalanches électroniques dans les DBDs sont très brèves, de l'ordre de la nano seconde. La production la plus efficace d'espèces actives a lieu pour des fréquences comprises entre 50 Hz et 10 kHz. Les DBDs sont générées sous des tensions de quelques dizaines de kilo volts (efficaces) et des champs électriques voisins des champs électriques de claquage du gaz considéré[7].

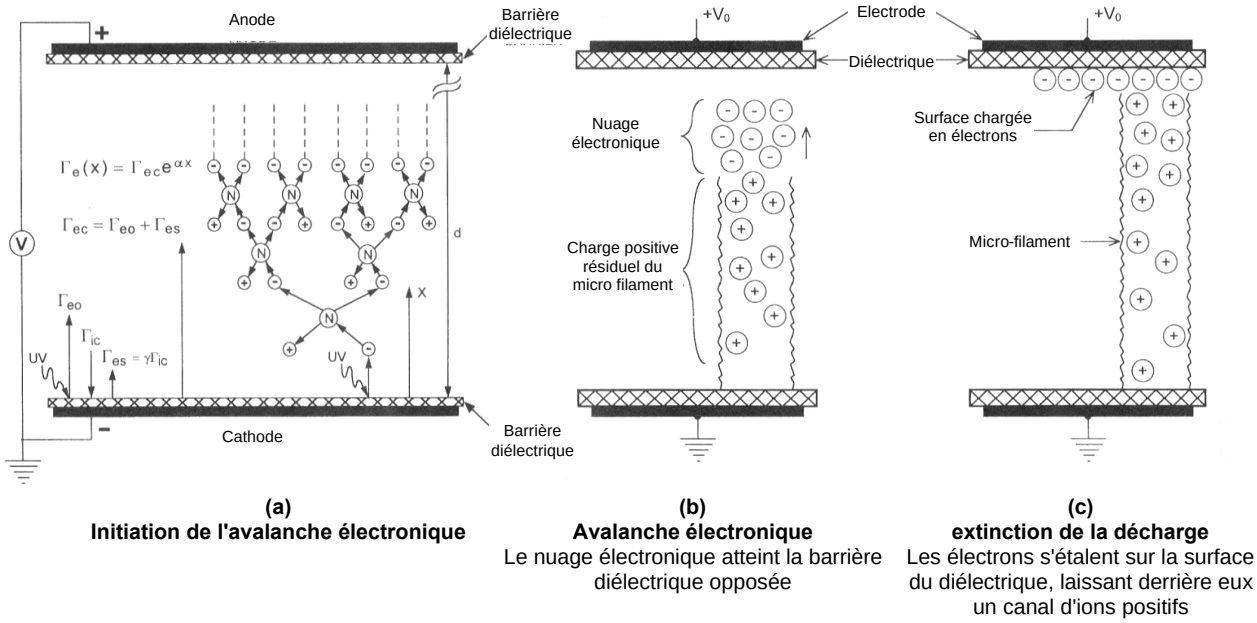


Fig.18 - Etapes du développement d'une avalanche électronique dans une DBD [35]

Les filaments produits ont des diamètres de quelques dizaines ou centaines de micromètres. Les densités de puissance des DBDs utilisées industriellement sont comprises entre 50 mW/cm^3 et 1 W/cm^3. Cette limite est généralement imposée par l'échauffement du diélectrique.

Une des principales limites des DBDs réside dans leur faible densité d'espèces actives (si l'on considère l'ensemble du volume du réacteur) qui est néanmoins supérieure à celle rencontrée dans les décharges corona. La densité moyenne d'espèces actives dépend de la fréquence des impulsions de l'alimentation. Pour augmenter la densité moyenne d'espèces actives il faut des alimentations qui fournissent des fréquences d'impulsions de courant plus élevées.

3.4.3 - Décharge luminescente uniforme à pression atmosphérique (OAUGDP)s

Il est possible depuis peu de générer des décharges luminescentes uniformes sans préionisation. La théorie développée sur ce type de décharge et celle du "piégeage ionique" [35]. Bien que des décharges luminescentes à pression atmosphérique aient été observées dans l'air et dans l'hydrogène sous des sources DC ou RF, ces décharges étaient instables et devaient être amorcées sous vide, la pression étant progressivement ramenée à 1 atmosphère. Ce n'est que récemment que des décharges

[7]environ 25 kV/cm pour l'air

luminescentes ont pu être directement obtenues sous 1 atmosphère [47-50]. Les décharges homogènes à pression atmosphérique nécessitent des paramètres opératoires bien précis.

- **Caractéristiques des OAUGDP et de leur alimentation électriq ue**

La figure [Fig.19] représente un réacteur OAUGDP à électrodes plates. L'une des deux électrodes est recouverte par un élément diélectrique qui empêche la formation de l'arc. L'OAUGDP est extrêmement capacitive et l'adaptation d'impédance entre la source et la décharge est primordiale pour aboutir à une décharge homogène stable.

Caractéristiques	Unité	Mini	Moyenne	Max
Fréquence	kHz	0.5	5	40
Tension efficace	kV	1.5	7	18
Espace inter-électrode	cm	0.2	0.40	2.8
Champ électrique	kV/cm	2	8.5 (Air)	12
Pression	Torr	755	760	775
Puissance dans le plasma	W	10	200	2000
Densité de puissance	mW/cm^2	4	100	600
Volume du plasma	litre	0.030	0.20	2.8
Densité électronique	e^-/m^3	?	$\sim 10^{16}$	?
Energie électronique	eV	1	4	20
Energie ionique	eV	0.025	0.025	?

Table.1 - Caractéristiques des OAUGDPs pour les gaz : He, Ar, N_2O, CO_2, air, d'après [35]

La fréquence de l'alimentation électrique est un élément essentiel puisqu'elle doit permettre le piégeage des ions dans l'espace inter-électrodes[8], alors que les électrons traversent entièrement l'espace inter-électrodes. C'est le phénomène de "piégeage ionique".

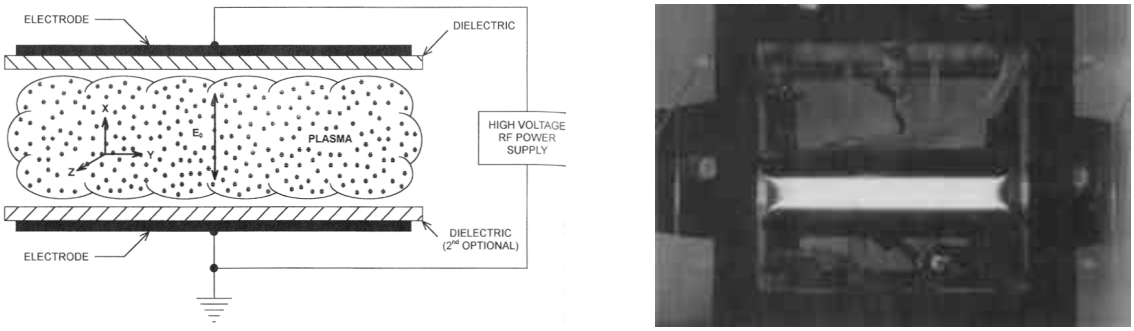


Fig.19 - Schéma et photographie d'un réacteur OAUGDs à électrodes parallèles [35]

[8] les ions situés près d'une paroi n'ont pas le temps d'atteindre la paroi opposée

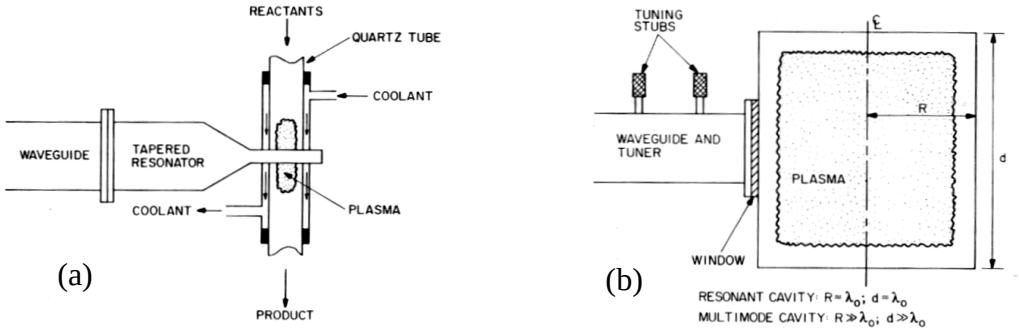
3.4.4 - Décharge électrique micro-ondes

L'interaction d'ondes électromagnétiques à fréquence micro-ondes dans un milieu gazeux peut, sous certaines conditions, conduire à la formation d'un plasma "homogène". Deux grands types de réacteurs plasma micro-ondes peuvent être distingués :

- les réacteurs micro-ondes à cavité résonnante, qui traitent un volume de gaz dans une enceinte fermée [Fig.20 (b)].
- Les réacteurs micro-ondes non résonnants, qui traitent un gaz en écoulement continu. Les micro-ondes produites par la source sont concentrées et acheminées par un guide d'onde au niveau d'une zone où circule le gaz à traiter [Fig.20 (a)] et [Fig.21].

Les réacteurs plasma micro-ondes se caractérisent par des températures électroniques supérieures à celles des plasmas de décharge (5 à 15 eV pour les micro-ondes et 1 à 5 eV pour les décharges). Les plasmas micro-ondes étaient généralement utilisés à des pressions de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-3} Torr. Ce n'est que depuis les années quatre vingt que des réacteurs plasmas à pression atmosphérique et au delà ont pu être mis au point.

Les procédés micro-ondes restent cependant très complexes et peu flexibles. En effet, ils sont basés sur des phénomènes de résonance propagés par guides d'ondes, nécessitant une adaptation très pointue entre la géométrie du système, les paramètres du milieu et la fréquence d'excitation de la source électrique. Les principaux atouts de cette technologie sont liés à la relative homogénéité de la décharge et à la possibilité de contrôler la puissance injectée.



(a) non résonnant (b) cavité résonnante

Fig.20 - Plasma micro-ondes, schéma du couplage des réacteurs et des guides d'onde [35]

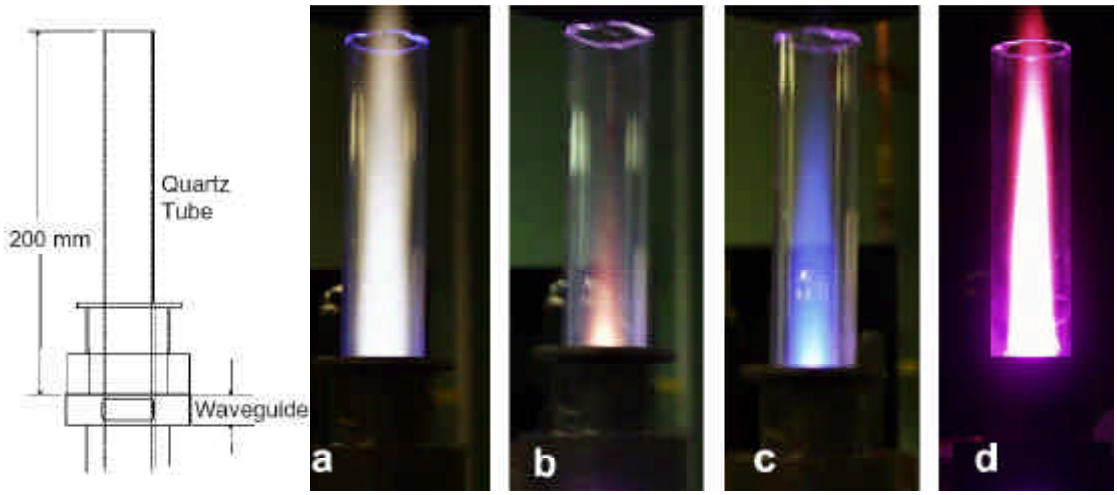


Fig.21 - Schéma et photo d'un réacteur plasma micro-onde développé au PSFC-MIT [51]

La figure [Fig.21] représente des plasmas micro-ondes générés à pression atmosphérique obtenus à partir de différents gaz : (a) air, (b) azote, (c) azote avec 2 % de souffre, (d) azote avec un hydrocarbure.

3.4.5 - Décharge à arc glissant

Dans ce type de décharge, l'arc est soufflé entre deux électrodes, ce qui empêche sa stabilisation vers un régime thermique. La technologie "Glidarc" a été développée et étudiée par A. Czernichowski [52, 91]. Un réacteur de ce type a également été conçu au Centre d'Energétique et Procédés lors de précédents travaux menés dans le cadre d'un projet européen sur le reformage assisté par plasma [54]. Le principe de fonctionnement d'un système de type "glidarc" sera décrit plus en détails dans le chapitre suivant.

3.5 - Conclusion et choix d'une technologie plasma

L'analyse de la littérature relative aux différentes technologies plasmas non thermiques actuellement disponibles : décharges corona, décharges à barrière diélectrique, décharges luminescentes (OAUGPs) et arcs non thermiques , établit clairement que la physico-chimie engendrée par le plasma dépend de la manière dont l'énergie est injectée dans le milieu et pas uniquement de la quantité d'énergie fournie. Par ailleurs cette analyse montre que le couplage entre l'alimentation électrique et le plasma joue un rôle déterminant dans la mise au point des procédés[9].

Le choix d'une technologie plasma adaptée à l'application visée, s'est basé sur une analyse de la littérature et sur la prise en compte de considérations technologiques : efficacité du procédé[10], contrôle de la décharge : homogénéité du plasma, contrôle du courant et / ou de la puissance, intégration du

[9] Bien que le couplage entre le plasma et l'alimentation électrique soit un problème général, cet aspect apparaît plus crucial dans le cas des plasmas hors équilibre thermodynamique que dans le cas des plasmas thermiques.
[10] vis à vis de l'opération de reformage

procédé dans un système de reformage embarqué (robustesse, compacité, perturbations électromagnétiques, coût, complexité du système, ...).

Les décharges micro-ondes sont intéressantes en terme de production d'espèces actives et de contrôle de la décharge, mais apparaissent aujourd'hui peu adaptées à un système embarqué notamment en ce qui concerne la robustesse, le coût, la complexité du procédé et les perturbations électromagnétiques.

Les décharges corona concernent de faibles densités énergétiques (si l'on considère l'ensemble du volume du réacteur) et ne paraissent pas adaptées à notre utilisation.

Les décharges DBDs apparaissent limitées en terme de production d'espèces actives et de contrôle spatial de la décharge. A cela, s'ajoutent les hautes fréquences de la source électrique DBD qui génèrent de fortes perturbations électromagnétiques qui semblent difficilement compatibles dans le contexte automobile.

Les décharges luminescentes peuvent depuis peu opérer à pression atmosphérique. Bien que très intéressantes en terme d'homogénéité, ces décharges demeurent très sensibles vis à vis de la composition et de l'hydrodynamique du gaz, ce qui les rend extrêmement instables.

Cette analyse nous a amené à porter notre choix, sur les arcs non thermiques. La suite de ce rapport leur est donc consacrée.