

## Chapitre II

# Développement et caractérisation expérimentale d'une torche plasma triphasée à électrodes en graphite fonctionnant à l'air

### 1. Problématique, objectifs de l'étude et démarche expérimentale

Comme nous avons pu le montrer dans le chapitre précédent, la technologie de torche plasma triphasée se place en rupture par rapport aux technologies DC traditionnelles. Elle nécessite une alimentation électrique significativement plus simple que celles utilisées pour les autres technologies de torche (DC, RF ou Micro-onde) puisqu'elle peut être alimentée par un simple transformateur de tension ne nécessitant pas une électronique de puissance complexe et onéreuse. De plus, contrairement aux torches DC classiques basées sur la formation d'un arc confiné, soufflé et stabilisé par un écoulement fluide, la torche triphasée a des arcs libres se développant dans un large volume plasma. Le dernier point important concerne les électrodes de la torche triphasée. Alors que les électrodes d'une torche DC sont constituées d'alliages métalliques couteux devant être refroidies par eau et ayant une durée de vie très limitée, les électrodes de la torche triphasée sont constituées de graphite, matériau consommable à faible coût, pouvant être alimentées en continu sans interruption du procédé, ce qui est primordial pour un fonctionnement dans une installation industrielle.

Dans de précédentes recherches, les avantages certains de la torche triphasée ont été démontrés dans des applications en milieu neutre ou réducteur comme la synthèse de noirs de carbone structurés, de nanotubes de carbone ou de fullerènes [77], [78], [88], ce qui nous a conduit à cette technologie pour l'assistance à la combustion de combustibles à faible PCI. Afin d'exploiter l'apport thermo-chimique d'un plasma d'air pour la combustion, la torche actuelle nécessite certaines adaptations pour permettre un fonctionnement efficace et robuste

en milieu oxydant. En effet, le fonctionnement à l'air induit une forte érosion des électrodes en graphite, ce qui est un point limitant pour envisager son utilisation dans un procédé industriel. Les solutions technologiques proposées devront permettre de limiter au maximum cette érosion. De plus, la torche, initialement conçue pour un fonctionnement avec des gaz neutres ou réducteurs, est équipée d'une isolation thermique en graphite pour protéger les parois métalliques de la torche et réduire les pertes thermiques aux parois. Cette isolation, qui est nécessaire, doit être optimisée par l'utilisation de matériaux mieux adaptés au milieu oxydant tout en limitant les pertes aux parois par un meilleur contrôle des températures internes et de l'écoulement plasma. Le dernier point technologique étudié concerne la puissance de la torche qui doit être portée à 100 kW (actuellement autour 30 kW) qui est la puissance d'allumage nécessaire pour un électrobrûleur de plusieurs MW.

Les objectifs des travaux présentés consistent ainsi à développer une nouvelle torche plasma triphasée qui réponde aux contraintes liées au fonctionnement à l'air à 100 kW: i) minimiser l'érosion des électrodes en graphite tout en garantissant un fonctionnement à fort débit d'air et ii) minimiser les pertes thermiques et contrôler l'écoulement plasma dans la torche pour une puissance de 100 kW. Ils auront pour finalité de permettre l'intégration de cette torche dans un électrobrûleur plasma capable de générer une flamme énergétique stable et autonome à partir exclusivement de combustibles pauvres renouvelables et d'une faible quantité d'électricité ( $P_e < 2\%$  de la  $P_{th}$  totale).

Pour limiter l'érosion des électrodes, plusieurs solutions sont envisagées et évaluées :

- Un gainage des électrodes par un flux gazeux a été réalisé afin de réduire le contact entre l'air et la surface exposée des électrodes.
- L'injection de produits carbonés (noir de carbone) dans la zone plasma a été testée afin de créer un milieu riche en monoxyde de carbone autour des électrodes en faisant réagir préférentiellement l'oxygène avec ces particules au lieu des électrodes.
- Le diamètre des électrodes a été augmenté afin de baisser la densité de courant et réduire par conséquent l'érosion thermomécanique due à l'ablation du graphite.
- Les électrodes en graphite sont isolées thermiquement et électriquement par une céramique jusqu'au plus proche de la zone de formation du plasma afin de permettre l'acheminement du gainage gazeux le plus loin possible, de refroidir efficacement les électrodes par ce gainage et de réduire le rayonnement incident sur les électrodes.

- Des électrodes offrant une protection chimique par imprégnation ont été utilisées, ce qui limite leur sensibilité à l'oxygène jusqu'à 800° C.
- Les arrivées de gaz plasma ont été adaptées afin de permettre le contrôle de l'écoulement d'air autour des électrodes et de limiter la quantité d'oxygène qui vient impacter la zone chaude des électrodes en graphite,

Pour minimiser les pertes thermiques, une grande partie du flux d'air d'entrée a été déviée vers les parois pour réaliser un gainage gazeux. Une céramique haute température a été placée à l'intérieur de la torche comme écran thermique entre la zone haute température du plasma et le corps métallique de la torche qui est refroidi par eau. Cette céramique permet de confiner l'écoulement du gaz chaud et de réduire le rayonnement incident du plasma sur les parois. Le contrôle de l'écoulement du gaz plasmagène a permis d'augmenter le débit sans perturber la décharge électrique ou causer l'extinction de l'arc. Pour augmenter la puissance de la torche, l'angle formé par les 3 électrodes par rapport à l'axe de la torche a été modifié afin de permettre une augmentation de la puissance du plasma, tout en gardant le courant d'arc plus ou moins constant. La modification de cet angle permet de jouer sur la tension d'arc et par conséquent, sur la puissance du plasma.

Avec une démarche expérimentale en plusieurs étapes, ces différentes solutions technologiques ont été intégrées dans un nouveau design de torche plasma de 100 kW ayant un débit d'air nominal de  $65 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Dans un premier temps, des essais préliminaires ont été réalisés sur la configuration actuelle de torche triphasée. Lors de cette étape, les taux d'érosion des électrodes en graphite ont été évalués pour différentes conditions opératoires: la nature et le débit du gaz plasmagène et les concentrations de carbone et d'oxygène au voisinage des électrodes en injectant des particules de noir de carbone dans le plasma. A l'issue de ces essais, des bilans thermiques ont permis de déterminer la répartition des pertes thermiques sur la technologie actuelle de la torche et son rendement énergétique. Une analyse statistique du mouvement de l'arc par caméra rapide a été réalisée afin de déduire ses propriétés géométriques. A la fin de cette phase d'essais préliminaires, des axes d'amélioration ont été identifiés et une nouvelle conception a été proposée. La modélisation numérique de l'écoulement du gaz plasmagène dans cette nouvelle conception a permis de valider théoriquement la bonne tenue thermique des différents composants de la torche. Cette étape est détaillée dans le chapitre III. Après la phase de fabrication et de montage de la torche sur le banc expérimental, des essais de caractérisation ont été effectués. Limité par la

capacité restreinte d'évacuation d'énergie du banc d'essai, la torche n'a pas été testée à pleine puissance. Des tests de combustion ont été également réalisés pour de faibles débits de biomasse avec pour objectif de faire une description qualitative de la combustion assistée par plasma.

## **2. Description du banc expérimental**

Le banc expérimental représenté dans la Figure 26 a permis de réaliser les essais préliminaires sur la torche plasma initiale. Il est constitué de la torche plasma, d'un réacteur, de sous-systèmes annexes et de différents dispositifs d'analyses et de mesure. Les principaux sous-systèmes sont : la source électrique triphasée (A), l'injecteur de poudre (B), le système de refroidissement (C), le compresseur d'air (D), le dispositif de filtration et le panneau de contrôle (non représentés).

### **2.1. La torche plasma triphasée**

Les études, menées par PERSEE depuis une vingtaine d'années sur la conversion d'hydrocarbures par voie plasma et sur la gazéification, ont conduit au développement d'une technologie plasma triphasée originale qui repose sur un même principe : la génération d'arcs libres dans un courant gazeux entre trois électrodes en graphite alimentées par un courant sinusoïdal triphasé. Du point de vue du procédé, cette technologie est mature et extrêmement robuste pour un fonctionnement en atmosphère inerte ou réductrice. Elle permet, par ailleurs d'élargir les conditions opératoires rencontrées dans la filière plasma d'arc classique, notamment en termes de températures et de vitesses d'écoulement, ouvrant la voie pour l'exploration de nouveaux domaines paramétriques, ce qui est particulièrement intéressant dans la perspective de l'optimisation du procédé. La simplicité et la robustesse de cette technologie par rapport aux technologies concurrentes (arc DC ou induction) permettent d'envisager une diminution significative des coûts d'investissement, de maintenance et de fonctionnement dans un électrobrûleur pour l'assistance à la combustion.

Comme le montre la Figure 27, la torche plasma actuelle est équipée de 3 supports d'électrode coplanaires. Elle est conçue pour permettre un fonctionnement à pression atmosphérique, de façon continue avec le contrôle manuel du positionnement en charge des 3 électrodes. La distance inter-électrodes est réglable afin de permettre l'amorçage de la décharge et le contrôle précis de la distance entre pointes en cours de fonctionnement. Les électrodes de diamètre 18 mm sont en graphite. Elles sont connectées à la source de courant alternatif. La

conception de la torche plasma est évolutive et chaque élément est modifiable indépendamment les uns des autres. La Figure 28 montre les différents composants de la zone de décharge.

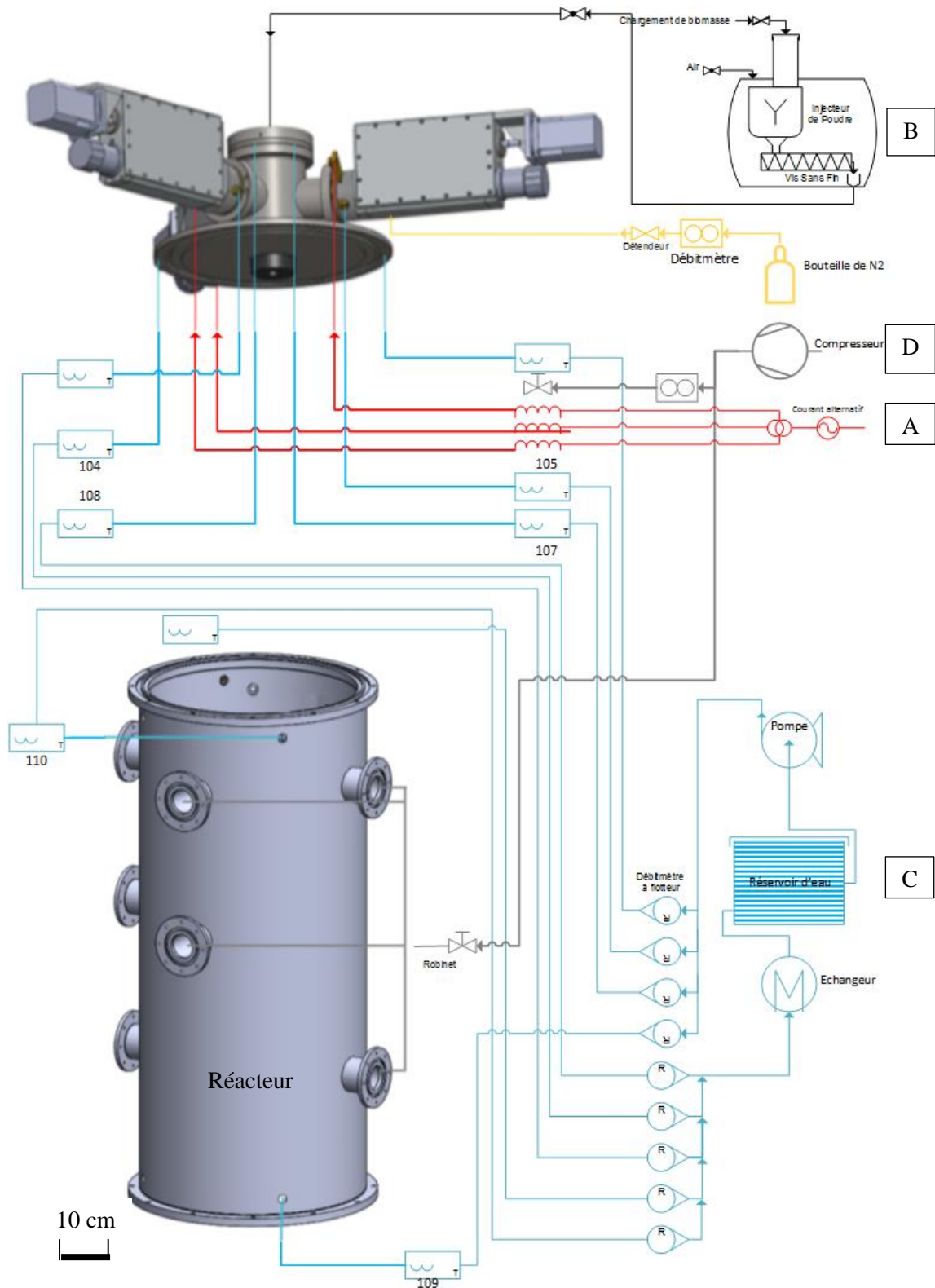


Figure 26: P&D du banc d'essai avec la torche plasma triphasée en configuration coplanaire

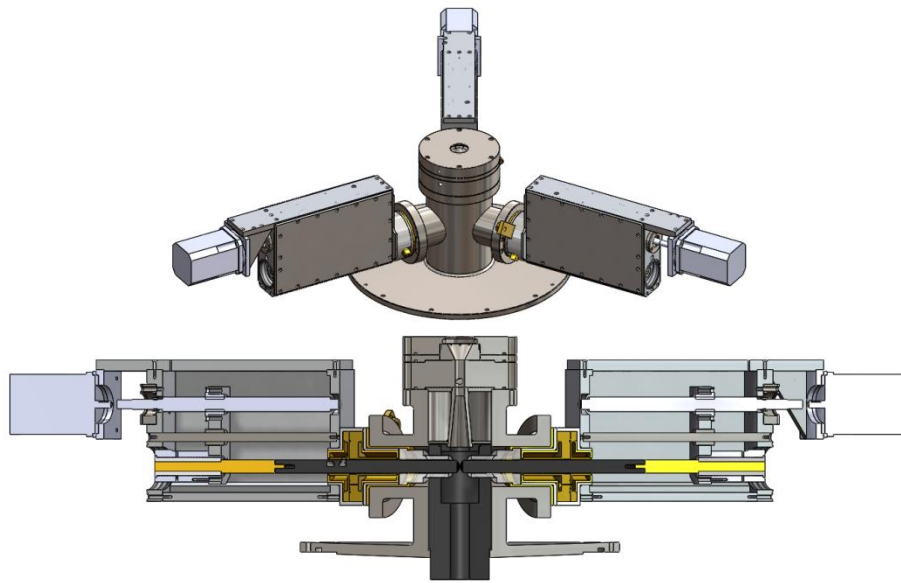


Figure 27 : Vue isométrique (haut) et vue en coupe (bas) de la torche plasma triphasée

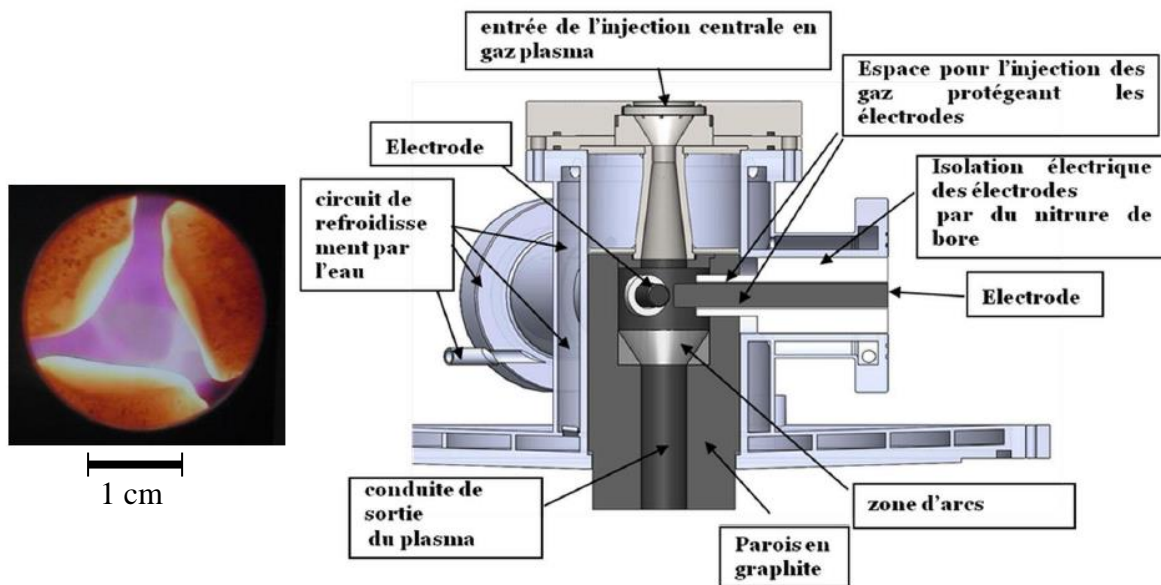


Figure 28 : Descriptif de la zone de décharge avec les électrodes coplanaires de diamètre 18 mm (à gauche une vue de dessus de l'arc)

## 2.2. Les sous-systèmes

Comme le montre la Figure 26, chacune des phases de la source électrique (A) est connectée sur un support d'électrode de la torche. Le réacteur et la torche plasma sont refroidis par eau grâce au système de refroidissement (B). L'injecteur de poudre (C) connecté à la torche permet l'injection de différents combustibles solides. Le compresseur d'air (D) assure le refroidissement des hublots du réacteur et l'évacuation d'énergie en cas de fonctionnement à

faible débit. Tous les gaz d'échappement sont évacués via un dispositif d'aspiration et de filtration. Dans la salle expérimentale des détecteurs de CO, H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> sont mis en place pour la sécurité du personnel et du procédé. Les solutions technologiques utilisées ont été développées pour assurer une parfaite étanchéité au gaz dans la chambre de décharge. Les pressions et les températures d'eau et de gaz en sortie du procédé sont mesurées en continu via 60 voies d'enregistrement.

Le système d'alimentation électrique se compose de deux éléments : un transformateur triphasé connecté au réseau électrique et un régulateur de courant (ASI ROBICON). Le transformateur électrique, de marque Hunterdon, fournit une puissance maximale de 320 kVA, fonctionnant avec une tension d'entrée de 380 V et une tension maximale de sortie de 480 V.

Tableau 5: Caractéristiques techniques de la source plasma AC triphasée (ASI ROBICON)

Tension d'entrée	380 V, 3 Phases, 50 Hz $\pm$ 10 %
Conditions de sortie	500 A en court-circuit, 400 A Max et 380 V Max en charge
Fréquence de sortie	84, 168, 338 ou 675 Hz
Puissance	263 kVA Max
Facteur de puissance	> 0,9 (puissance de sortie entre 10 et 100 %)
Rendement	> 90 % à pleine charge

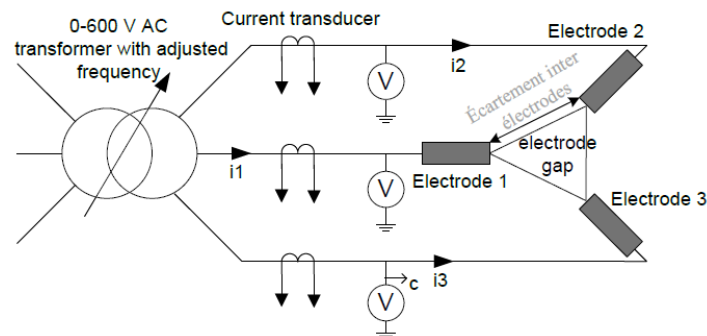


Figure 29 : Représentation simplifiée du circuit électrique du système plasma triphasé

L'injecteur de combustible solide est équipé d'un système à vis sans fin avec une vitesse de rotation variant de 100 tour.min<sup>-1</sup> à 2 000 tour.min<sup>-1</sup>. Le débit massique du combustible injecté dépend de sa masse volumique. Il est de 0,4 g.tour<sup>-1</sup> pour le noir de carbone type Y50A, de 4 g.tour<sup>-1</sup> pour des copeaux de bois et de 10 g.tour<sup>-1</sup> pour de la poudre de tournesol (les propriétés des deux derniers combustibles sont détaillées dans le tableau 2 du chapitre I). Les

particules solides sont entraînées par un flux d'air pouvant être réglé jusqu'à  $6 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et le mélange gaz-solide est injecté par le dessus de la torche en son centre.

Le système de refroidissement contient principalement un réservoir, une pompe à eau et un échangeur pour le refroidissement de l'eau. Il est connecté à 10 circuits indépendants branchés aux différents composants refroidis de la torche plasma et de l'enceinte de combustion. Le débit total d'eau est de l'ordre de  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et la pression maximale est égale à 6 bars. Chacun des circuits d'eau est équipé d'un débitmètre volumique et de deux thermocouples placés à l'entrée et à la sortie de la pièce refroidie. Avec le débit maximal, le refroidisseur peut baisser la température de  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ , ce qui revient à une puissance d'évacuation maximale de 90 kW

Le dispositif de filtration est conçu par la société Filter Media pour la filtration de particules de noir de carbone et permet la filtration des particules solides imbrulées dans les gaz de combustion.

## **2.3. Les dispositifs d'analyse et de mesure**

### **2.3.1. Le Chromatographe en phase gazeuse**

La chromatographie en phase gazeuse permet l'analyse en ligne de la composition des gaz de combustion en sortie du réacteur. Elle est basée sur la séparation non destructive des molécules d'un mélange gazeux lors de la migration de ce dernier dans une ou plusieurs colonnes de séparation. La séparation des molécules chimiques est contrôlée par la température du four dans lequel sont positionnées les colonnes et par la vitesse de migration dans les colonnes. La chromatographie en phase gazeuse utilise deux phases, une mobile, appelée gaz vecteur, qui doit être neutre dans les conditions d'utilisation (l'hélium, l'azote ou l'argon sont couramment employés) et une stationnaire, située dans les colonnes, qui permet la séparation sélective des différents éléments présents dans le gaz analysé. Nous utilisons un chromatographe Perichrom PR2100 équipé de colonnes Porapak Q et Tamis moléculaires en polymères poreux, spécialement adaptés pour la détection de composés organiques ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4 \dots$ ). Ce chromatographe contient deux détecteurs, FID (Flame Ionization Detector) et TCD (Thermal Conductivity Detector).



### 2.3.2. Le détecteur NDIR

Le détecteur NDIR (en anglais Non-Dispersive InfraRed detector) est largement utilisé dans l'industrie pour mesurer la concentration des oxydes de carbone ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) ou des molécules organiques comme le méthane, aux ppm près. Le fonctionnement de cette baie d'analyse se base sur le principe d'absorption du rayonnement infrarouge à des fréquences caractéristiques de chaque espèce. Ainsi, en envoyant un faisceau d'infrarouge à travers un échantillon contenant du  $\text{CO}$  ou du  $\text{CO}_2$ , et en mesurant la différence entre l'intensité émise et l'intensité reçue à la bonne fréquence, le détecteur NDIR permet de quantifier la proportion de certaines molécules traversant le faisceau.

La baie d'analyse utilisée dans notre banc d'essai est un NDIR-TCD ROSEMOUNT NGA 2000 MLT 4, capable de détecter en temps réel les fractions molaires de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{H}_2$  présents dans un échantillon, composé en majorité de  $\text{N}_2$ , dans les intervalles suivants : ( $\text{H}_2 \in [0, 40] \%$ ,  $\text{CO} \in [0, 24] \%$ ,  $\text{CO}_2 \in [0, 16] \%$ ,  $\text{CH}_4 \in [0, 8] \%$ ). Le détecteur NDIR mesure les quantités de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ . L'hydrogène est mesuré par un détecteur TCD. L'analyse par NDIR se base sur l'importance de l'absorption optique au centre de l'intervalle infrarouge qui peut être 100 fois plus importante qu'aux limites de l'intervalle [89]. Ainsi, même avec une courte longueur optique, en utilisant une source d'IR non sophistiquée et des capteurs non refroidis, des limites de détection satisfaisantes peuvent être atteintes (avec une précision classique de 2 ppm de  $\text{CO}_2$  [90]) et une résolution jusqu'à 0,1 ppm reste possible avec un matériel plus précis [91].

### 2.3.3. Les caméras

La première caméra utilisée est une caméra ultrarapide de type Olympus FS avec une vitesse d'acquisition pouvant aller jusqu'à 1 million d'images par seconde pour une résolution de 24 x 8 pixels. Comme la fréquence de courant pendant les essais réalisés est égale à 84 Hz, on se contente d'une vitesse d'acquisition maximale de 150 000 images par seconde permettant une résolution de 64 x 48 pixels par image. Une deuxième caméra CCD permet de visualiser au travers d'un hublot les positions des électrodes et la décharge plasma en temps réel.

#### 2.3.4. Autres moyens de mesures

Pour déterminer la puissance électrique consommée par la torche plasma, des mesures des propriétés électriques sur chaque phase (courant, tension, facteur de puissance, fréquence ...) sont réalisées à l'aide d'une boîte d'acquisition de marque VPASLite PM300. Des mesures de température par thermocouples sont également effectuées dans les circuits de refroidissement ainsi que les conduites d'évacuation des gaz. Les mesures de températures sont réalisées à la fois par sécurité pour surveiller le bon fonctionnement du procédé mais aussi pour calculer les pertes thermiques dans les différents composants et établir les bilans de puissances thermiques. Avant et après les essais, les masses des électrodes en graphite sont mesurées afin d'évaluer leurs taux d'érosion.

### 3. Analyse du fonctionnement de la torche plasma actuelle dans des conditions oxydantes

#### 3.1. Nature et géométrie des électrodes en graphite

Le carbone présente trois types d'organisation cristalline : le diamant, les variétés "noires" et les fullerènes. Le graphite appartient à la deuxième forme et représente la seule forme allotropique thermodynamiquement stable dans les conditions les plus usuelles. Il est constitué essentiellement par une association de couches de carbone, chacune étant constituée d'un réseau hexagonal bidimensionnel d'atomes de carbone. Les propriétés du graphite varient largement en fonction des procédés de fabrication. Le carbone est soumis à un traitement thermique qui est associé à un changement de phase progressif commençant à 1 000 K et passant d'une mésophase en une structure cristalline. La graphitisation s'opère de façon progressive pour des températures entre 1 900 et 3 300 K [92] où un nombre croissant de paires de couches s'alignent à une distance de 3,354 Å, caractéristique du réseau cristallin du graphite [93]. Le degré de graphitisation est la probabilité pour deux couches voisines de présenter la structure du graphite. Ce paramètre permet de caractériser un carbone partiellement graphitisé.

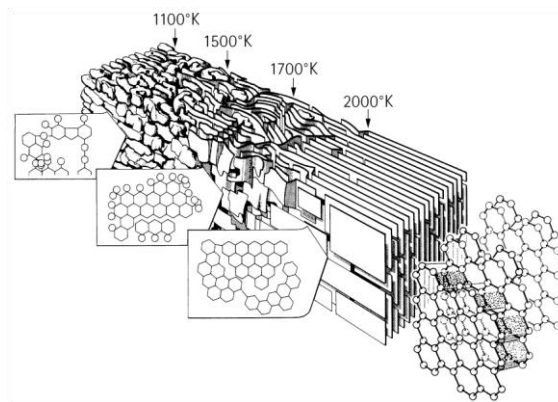


Figure 30: schématisation de la restructuration du carbone en fonction de la température de traitement et début de la graphitisation.

La capacité calorifique du graphite augmente avec la température. Pour un échantillon de graphite de type ATJ<sup>i</sup> (cf. Figure 31), elle passe de 500 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> à 300 K jusqu'à 2 500 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> à 3 000 K. Vu la structure multicouche du graphite, la conductivité thermique dans la direction parallèle aux liaisons hexagonales n'est pas la même que dans la direction perpendiculaire. Pour un même échantillon, la conductivité thermique décroît lorsque la

<sup>i</sup> Le graphite ATJ est un graphite très fin (la taille maximale des particules est de 150 µm) fabriqué par Union Carbide Corporation. Il est souvent utilisé comme une référence de comparaison dans les mesures des propriétés des graphites

température augmente : jusqu'à 1 500 K la conductivité dans la direction perpendiculaire est plus élevée que dans la direction parallèle mais au-dessus de cette température, l'ordre est inversé. Le graphite possède une conductivité thermique élevée, comparable à celle des métaux. Comme le montre la Figure 32, la résistivité électrique du graphite est relativement faible. Elle est de l'ordre de  $10^{-5}$   $\Omega.m$ . En faisant croître la température, la résistivité des graphites décroît initialement pour atteindre une valeur minimale qui varie selon la structure du graphite (entre 300 K et 1 000 K généralement) et puis croît de façon quasi linéaire. En effet, une approximation linéaire définie entre 1 000 et 2 500 K est proposée par Mal'tseva et al. [94] (cf. Figure 32) pour un graphite grade B caractérisé par une porosité de 24 % et une masse volumique de  $1,67 \text{ g.cm}^{-3}$  :

$$\rho_e = (9,2 \pm 1,4) + 0,002 (T - 1000) [\mu\Omega.m] \quad (\text{II.1})$$

Tableau 6 : Propriétés d'un carbone graphite de type ATJ [95]

Propriété	Unité	Valeur
Masse volumique	$\text{g.cm}^{-3}$	1,8-2,3
Point de sublimation	K à 1 atm	$3\,640 \pm 25$
Chaleur de sublimation	$\text{kJ.g}^{-1}$	59,9
Capacité calorifique $C_p$	$\text{J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$1,47 + 3,66 \times 10^{-4} \times T - 7,54 \times 10^{-7} T^2$
Conductivité thermique $\lambda (\perp)^*$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$170,7 - 0,1680 \times T + 6,486 \times 10^{-5} \times T^2 - 8,854 \times 10^{-9} \times T^3$
Conductivité thermique $\lambda (//)^*$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$128,3 - 0,1187 \times T + 4,814 \times 10^{-5} \times T^2 - 6,626 \times 10^{-9} \times T^3$
Pression de vapeur $\log_{10}P$	Pa; torr	$-40181/T + 14,80$ ; $-40181/T + 12,68$

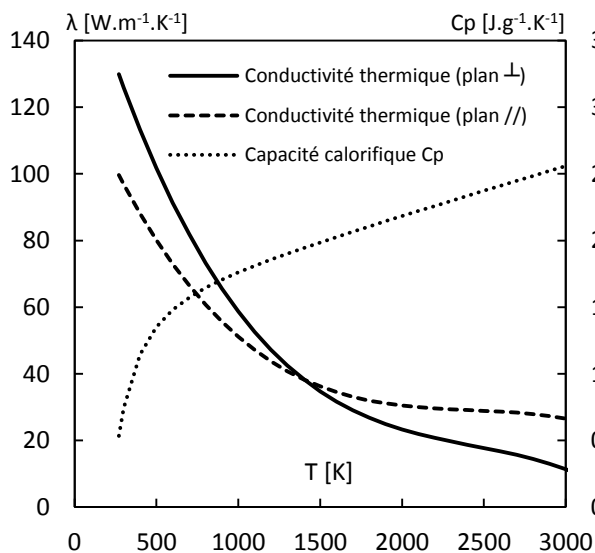


Figure 31: Capacité calorifique et conductivité thermique d'un graphite de type ATJ [95]. (\*) Les mesures de conductivités thermiques sont effectuées dans le plan perpendiculaire ( $\perp$ ) et dans le plan parallèle ( $//$ ) au plan de pression de moulage.

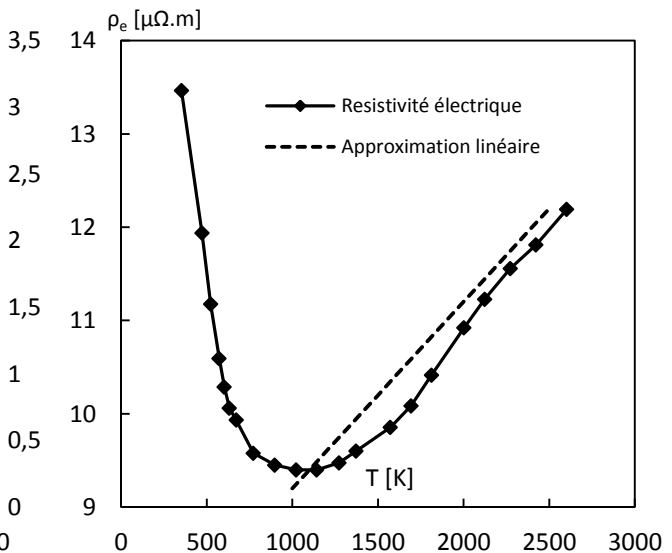


Figure 32: Résistivité électrique issue de mesures expérimentales d'un graphite grade TRA (POCO graphite) [96] et approximation linéaire entre 1 000 K et 2 500 K d'un graphite grade B (Graphitel)

Dans la torche plasma initiale, les électrodes en graphite ont une forme cylindrique avec un diamètre de 18 mm et une longueur de 450 mm. Leur masse volumique est égale à  $1,86 \text{ g.cm}^{-3}$ .

### **3.2. Processus d'érosion des électrodes**

L'érosion des électrodes est due principalement à deux mécanismes : l'ablation et les réactions chimiques. L'ablation réunit l'effet thermique résultant de la forte densité énergétique de l'arc qui se traduit par un changement de phase local sur la surface de l'électrode (la fusion dans le cas des métaux et la sublimation dans le cas du graphite) et l'effet mécanique lié à l'écoulement (pression élevée et effet Maecker) qui se traduit par l'éjection de matière. Les réactions chimiques sur la surface de l'électrode peuvent avoir lieu lorsque le gaz plasmagène est un gaz oxydant (particulièrement l'air et le dioxyde de carbone dans le cas des électrodes en graphite) [95].

#### **3.2.1. L'érosion par ablation**

L'arc électrique est caractérisé par une forte densité de courant électrique. La modélisation MHD de l'arc plasma développée par C. Rehm et al. [97] montre que pour un arc de 5 kW à pression atmosphérique, la densité de courant peut atteindre  $5.10^7 \text{ A.m}^{-2}$  au niveau de la zone cathodique. Ce même arc possède un diamètre de pied d'arc entre 1,25 et 2 mm et un diamètre de colonne d'arc entre 3 et 4 mm. Une densité énergétique élevée se trouve ainsi mise en jeu au niveau du pied d'arc. Sous l'effet de l'échauffement, le graphite est vaporisé au niveau des tâches cathodiques. Le pied de l'arc est également le lieu de détachement de matière par bombardements ionique et électronique [98].

Au cours de la décharge électrique, plusieurs espèces sont générées à proximité de la surface de la cathode. Des études de décharges sous vide, montrent que la masse perdue à la cathode est constituée d'ions, de molécules neutres et de macros particules [99]. L'analyse de la zone cathodique dans une décharge sous vide présente l'avantage d'éliminer toutes sources de contamination des électrodes et élimine l'érosion chimique par le gaz plasmagène environnant. Plusieurs modèles ont été développés pour estimer les taux d'érosion sous vide pour différents matériaux, y compris le carbone graphite. Kimblin [100] a proposé une formulation pour quantifier le taux d'érosion par effet joule. Ce taux d'érosion est exprimé en gramme par unité de charge électrique.

$$\text{Kimblin [100]} \quad E_p = 4,72. J^{-1}. M^{0,5}. T_c^{-0,5}. P_v(T) \quad [g. c^{-1}] \quad (\text{II.2})$$

Cette formulation découle directement du taux d'évaporation atomique de la surface de l'électrode dans le vide  $e(t)$ , de la loi des gaz parfaits et de l'expression de l'énergie cinétique  $E_c$ .

$$e(t) = \frac{1}{4} n v_T ; n = \frac{P_v}{r T_c} ; E_c = \frac{1}{2} n. M. v_t^2 = \frac{3}{2} n. k_B. T_c$$

Ici,  $J$  est la densité de courant (en  $A.cm^{-2}$ ),  $n$  est la densité des particules atomiques,  $v_T$  leur vitesse moyenne,  $r$  la constante des gaz parfaits,  $M$  la masse molaire,  $K_B$  la constante de Boltzmann et finalement,  $P_v$  et  $T_c$  sont la pression de vapeur et la température à l'interface du spot cathodique.

Daalder [101] a proposé une autre expression pour quantifier l'érosion au niveau de la cathode, avec  $\chi_0$  le coefficient direct dans l'approximation linéaire de la résistivité électrique décrite par l'équation (1),  $\lambda$  et  $C_p$  sont respectivement la conductivité thermique et la capacité calorifique à la température  $T_c$  et  $T_0$  la température loin du spot cathodique :

$$\text{Daalder [101]} \quad E_p = \frac{1}{3} \chi_0^{0,5}. \lambda^{0,5}. C_p^{-1}. \left( \ln \left( \frac{T_c}{T_0} \right) \right)^{-0,5} \quad [g. c^{-1}] \quad (\text{II.3})$$

L'analyse du comportement de l'arc électrique, dans la majorité des cas étudiés, montre que le spot cathodique est caractérisé par un mouvement rapide et de façon quasi-chaotique. En effet, l'existence du spot nécessite des conditions spéciales et extrêmes comme une température de surface très élevée, un champ électrique puissant et un nuage dense de plasma [102]. Ces conditions ne se réunissent pas à n'importe quel endroit de l'extrémité de l'électrode et pourtant, une fois réunies dans une zone optimale, le spot a tendance à s'en éloigner. E. Hantzsche [102] propose deux explications possibles. La première est que le spot dégrade lui-même ses conditions d'existence : le spot crée un cratère qui s'élargit et s'approfondit au cours du temps. Ceci rend sa surface d'action plus large et réduit la densité de courant, ce qui a pour conséquence de réduire également la température, le potentiel électrique et la densité du plasma. Au moment où les conditions d'existence ne sont plus satisfaites, le spot se déplace. La deuxième possibilité est que les conditions d'existence du spot ne se détériorent pas à son emplacement initial mais que de meilleures conditions se présentent aux voisinages et poussent le spot à bouger vers cette nouvelle position. La

formation d'une protrusion à côté du spot, parfois créée par le spot lui-même, peut être à l'origine de ce mouvement.

Litvinov et Daalder ont également proposé une formulation du rayon  $r$  du cratère formé par le spot cathodique et de son temps de formation  $\tau$  :

$$\text{Litvinov et Daalder [101]} \quad r = (2\pi)^{-1} \cdot \chi_0^{0,5} \cdot \lambda^{-0,5} \left( \ln \left( \frac{T_c}{T_0} \right) \right)^{-0,5} \cdot I \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Litvinov et Daalder [101]} \quad \tau = (2\pi)^{-2} \cdot \chi_0 \cdot \rho \cdot C_p \cdot \lambda^{-2} \left( \ln \left( \frac{T_c}{T_0} \right) \right)^{-1} \cdot I^2 \quad (\text{II.5})$$

Des équations (4) et (5) on peut déduire le ratio  $r^2/\tau$  qui caractérise le déplacement macroscopique du spot cathodique.

$$\text{Litvinov et Daalder [101]} \quad r^2/\tau = \lambda \cdot C_p^{-1} \cdot \rho^{-1} \quad (\text{II.6})$$

### 3.2.2. L'érosion chimique

En ce qui concerne l'érosion chimique [103], la réaction entre l'oxygène de l'air et le graphite des électrodes a lieu sur la surface de l'électrode. L'adsorption joue un rôle primordial dans ce mécanisme d'érosion [98], car le graphite est caractérisé par une température de sublimation très élevée (~3 600 K). Pour des températures inférieures à 1 000 K, les vitesses de réaction impliquant l'oxygène sont relativement faibles. Le principal produit de la réaction de l'oxygène avec le carbone graphite est le CO, la formation de CO<sub>2</sub> est plus faible de deux ordres de grandeur. Néanmoins, la réactivité de l'oxygène atomique est plus élevée, même à faible température. L'érosion chimique du graphite dans un plasma d'oxygène est due à deux facteurs : la température et la présence d'ions.

Lorsque la surface du graphite est exposée à l'oxygène, le carbone commence à réagir avec l'oxygène par chimisorption à partir de 70 °C. L'oxygène capturé est irréversiblement lié à la surface et n'est libéré que dans les molécules de CO et de CO<sub>2</sub>, lorsque la température de la surface dépasse les 200 °C [104]. Les productions de CO et de CO<sub>2</sub> croissent de façon exponentielle avec la température [105]. Lorsque l'oxygène s'attaque aux atomes de carbone,

les réactions (7), (8) et (9) peuvent décrire tout le mécanisme réactionnel. Dans certaines circonstances, les réactions (10) et (11) peuvent avoir lieu (cf. Tableau 7) [106].

Tableau 7 : Les principales réactions intervenant dans l'érosion chimique du carbone

Réactions	$\Delta h_r$ à 298 K (kJ.mol <sup>-1</sup> )	
$C + 0,5 O_2 \rightarrow CO$	-110,58	(7)
$C + O \rightarrow CO$	-110,58	(8)
$C + 2 O \rightarrow CO_2$	-393,52	(9)
$0,5 C + 0,5 CO_2 \rightarrow CO$	86,18	(10)
$CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$	-282,94	(11)

De nos jours, la réaction entre le carbone et l'oxygène est sans doute la réaction la plus importante et la plus étudiée [106]. L'un des objectifs de l'étude de cette réaction est de normaliser la quantification des espèces produites et du taux de la réaction. Ceci requiert une mesure précise de la surface carbonée participant à cette réaction ce qui s'avère difficile, surtout lorsque la structure n'est pas totalement cristallisée. La superficie de la surface active (en anglais ASA pour Active Surface Area) est un paramètre qui caractérise l'érosion du graphite. La valeur de la « ASA » est généralement mesurée par la méthode BET (Brunauer-Emmett-Teller).

L'expression suivante est utilisée pour décrire la consommation de carbone (par gazéification) dans le graphite:

$$[106] \quad -\frac{d[C]}{dt} = k \cdot P_{O_2} \cdot ASA \cdot (1 - \theta) \quad (II.7)$$

Dans cette expression, [C], k,  $P_{O_2}$  et  $\theta$  représentent, respectivement, la concentration de carbone, une constante de vitesse pour les réactions de gazéification dépendant de la température, la pression partielle de l'oxygène dans l'air et la fraction de la ASA occupé par des complexes oxygénés comme le CO et le CO<sub>2</sub>.

Dans une géométrie complexe avec un débit d'air turbulent et la présence de plusieurs espèces gazeuses, relier la vitesse d'érosion à la surface active est une tâche très difficile. Pour comparer des taux d'érosion pour des électrodes de différentes dimensions, on rapporte le taux d'érosion à la surface exposée à l'oxygène. Même lorsque le gaz est considéré comme neutre, l'influence de la surface est non négligeable. Pour un fonctionnement à l'azote, F. Fabry et al. [79] a montré qu'en diminuant la section des électrodes en graphite, l'érosion augmente. Ceci est certainement dû à la densité de courant qui augmente dans les électrodes de faible section, ce qui accentue l'érosion par ablation. Par contre, pour des électrodes de



même section, c'est différent si l'une d'elles présente une surface plus importante exposée au gaz plasma. Dans le cas de la plus grande surface, l'érosion est plus importante, ce qui montrerait une érosion chimique plus importante en présence d'azote. Dans notre cas, s'ajoute à cela l'influence du débit d'air. En effet, jusqu'à ce que la surface exposée du graphite soit totalement saturée en oxygène, l'augmentation du débit d'oxygène au voisinage de la surface implique une augmentation du taux d'érosion. Néanmoins, il est difficile de rapporter le taux d'érosion directement au débit d'air pour deux raisons. En premier lieu, il est possible qu'à fort débit d'air, il existe une valeur asymptotique du taux d'érosion. En deuxième lieu, l'écoulement est généralement turbulent au voisinage de la surface des électrodes, ce qui nous empêche de quantifier la quantité d'oxygène en contact avec cette surface.

### **3.3. Comparaison et quantification de l'érosion en fonction des conditions expérimentales**

#### **3.3.1. Nature du gaz plasma**

Plusieurs essais ont été réalisés avec différents gaz plasmagènes. Tout d'abord, le taux d'érosion à l'azote est déterminé. Ceci permet d'évaluer la solution du gainage des électrodes à l'azote. Ensuite, des essais à l'air ont été réalisés afin d'évaluer le taux d'érosion initial qu'il faudrait baissé. Une stratégie pour minimiser l'érosion consiste à changer localement la nature oxydante du gaz plasmagène par réaction chimique. Un élément carboné est injecté pour réagir avec l'air et créer du monoxyde de carbone autour de la zone exposée des électrodes. Un essai au monoxyde de carbone permet de vérifier l'effet de ce gaz sur l'érosion. Par la suite, plusieurs tests à l'air avec des débits différents de noir de carbone sont réalisés pour changer la nature du gaz plasmagène autours des électrodes par réaction chimique.

##### **3.3.1.1. Erosion à l'azote**

Si l'on néglige la formation de cyanures (CN) qui peut avoir lieu à des taux très faibles et à des températures supérieures à 3 000 K, l'azote est considéré chimiquement neutre vis-à-vis du carbone. Par conséquent, la masse érodée durant le fonctionnement à l'azote est principalement une érosion par ablation. Un test de fonctionnement à l'azote est effectué pour quantifier l'érosion. Les conditions opératoires et les résultats de l'érosion sont résumés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Bilan de l'essai de quantification de l'érosion à l'azote

Paramètres	Unités	Valeurs
Débit d'azote	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	5
Diamètre des électrodes	mm	18
Longueur exposée	mm	15
Courant	A	200
Puissance	kW	15
Masse érodée par électrode	g.h <sup>-1</sup>	5,10
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	µg.c <sup>-1</sup>	7,08
Taux d'érosion rapporté à la puissance	g.kWh <sup>-1</sup>	0,283
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	g.kWh <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	0,026
Pertes thermiques au travers des parois de la torche	%	58

Le taux d'érosion du graphite dans une atmosphère d'azote est de l'ordre de  $7,1 \mu\text{g}\cdot\text{c}^{-1}$ . En utilisant les formulations (2) et (3), on peut comparer cette valeur aux estimations analytiques. On suppose que la température de la surface du spot est égale à la température de sublimation  $T_c = 3\,640 \text{ K}$  et que la pression de vapeur de graphite à cette pression  $P_v$  est égale à  $5\,839 \text{ Pa}$  (déduite du Tableau 6). La Figure 33 montre une vue de face de l'extrémité de l'électrode sur laquelle on voit plusieurs spots. Pour un diamètre moyen des spots égal à  $1,07 \text{ mm}$  et un courant de  $200 \text{ A}$ , la densité de courant est égale à  $2,22 \cdot 10^8 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ . Pour la formulation de Kimblin (3), ces valeurs donnent un taux d'érosion de  $7,12 \mu\text{g}\cdot\text{c}^{-1}$  (cf. Tableau 9).

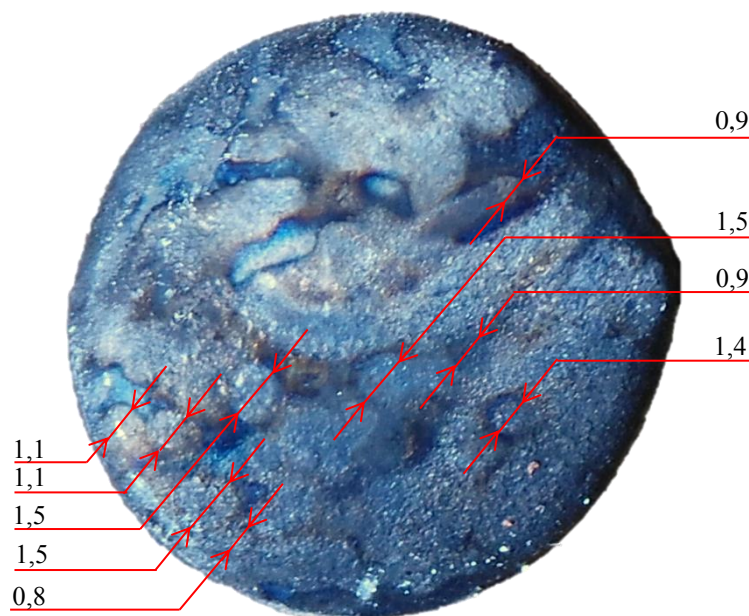


Figure 33 : Diamètre des spots sur une photo d'une électrode en graphite prise après un fonctionnement à l'azote. Le diamètre de l'électrode est égal à  $18 \text{ mm}$  et le diamètre moyen des spots repérés est de  $1,07 \text{ mm}$ .

Pour des valeurs de la conductivité thermique et de la capacité calorifique, respectivement, de l'ordre de  $20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $2,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  à des températures supérieures à  $3\,000 \text{ K}$ , le diamètre des spots, leur temps de formation ainsi que leur déplacement caractéristique sont calculés avec les équations (4), (5) et (6) et détaillés dans le Tableau 9. Tandis que la formulation de Kimblin du taux d'érosion donne une valeur très proche de la mesure expérimentale, celle de Daalder donne une valeur 3 fois plus élevée. Le diamètre mesuré des spots est le double de la valeur calculée. Ceci peut être lié au fait que nous avons supposé que le diamètre du spot est égal au diamètre du cratère. Or, le cratère s'élargit au cours de la durée de vie du spot jusqu'à son extinction. Le diamètre final du cratère est en réalité le diamètre maximal que peut atteindre le spot.

Tableau 9 : Valeurs analytiques du taux d'érosion, rayon, temps de formation et déplacement macroscopique du spot cathodique.

Paramètres	Références	Unités	Valeurs
$E_p$	Kimblin [100]	$\mu\text{g}.\text{c}^{-1}$	7,12
$E_p$	Daalder [99]	$\mu\text{g}.\text{c}^{-1}$	22,6
$r$	Litvinov et Daalder [101]	mm	0,28
$\tau$	Litvinov et Daalder [101]	$\mu\text{s}$	20,4
$r^2/\tau$	Litvinov et Daalder [101]	$\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$	38,5

La Figure 34 montre une vue de dessus de la zone de décharge après un fonctionnement pendant 30 minutes à l'azote. L'érosion est quasi homogène sur la surface transversale de chacune des trois électrodes. Sur les pièces de protection en nitrure de bore, initialement blanche, on voit un dépôt de carbone dû à la condensation du carbone sublimé. Nous pouvons observer aussi que la surface latérale des 3 électrodes n'a pas été érodée chimiquement par l'azote, ce qui atteste que l'érosion des électrodes est majoritairement due à un phénomène d'ablation.



Figure 34 : Vue de dessus de la zone de décharge électrique de la torche triphasée, après un fonctionnement de 30 minutes à l'azote.

#### 3.3.1.2. Erosion à l'air

En présence d'air, l'érosion par réaction chimique entre l'oxygène et le carbone graphite s'ajoute à l'érosion thermomécanique. Sur la Figure 35, on peut voir l'érosion par ablation identifiée par les cratères sur les extrémités des électrodes et l'érosion chimique identifiée par l'enlèvement de matière sur les surfaces latérales des électrodes. On note que le phénomène d'ablation est plus intense en présence d'oxygène. Dans cet essai, l'air est injecté du haut vers le bas. Pour des raisons de sécurité, l'injection d'un faible débit d'azote autour des électrodes est toujours fonctionnelle pendant les tests à l'air. Pour cette raison, on voit dans la Figure 35, sur les surfaces latérales des trois électrodes, juste après la sortie des isolants électriques, quelques millimètres non érodés par l'air grâce au gainage d'azote. Comme le montre le Tableau 10, la présence de l'air fait passer le taux d'érosion à  $25,6 \mu\text{g}\cdot\text{c}^{-1}$ . Si on suppose que le taux d'érosion par ablation à l'air est le même qu'à l'azote, on déduit qu'à peu près  $18,5 \mu\text{g}\cdot\text{c}^{-1}$  sont dus à l'érosion chimique pour ce débit d'air.

Tableau 10 : Bilan de l'essai de quantification de l'érosion à l'air

Paramètre	Unité	Valeurs
Débit d'azote (gainage des électrodes)	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	3
Débit d'air	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	2
Diamètre des électrodes	mm	18
Longueur exposée	mm	15
Courant	A	200
Puissance	kW	17,5
Masse érodée par électrode	g.h <sup>-1</sup>	18,5
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	μg.c <sup>-1</sup>	25,6
Taux d'érosion rapporté à la puissance	g.kWh <sup>-1</sup>	1,06
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	g.kWh <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	0,095
Pertes thermiques au travers des parois de la torche	%	53



Figure 35: Vue de dessus de la zone de décharge électrique de la torche triphasée, après un fonctionnement d'une heure à l'air.

### 3.3.1.3. Erosion au monoxyde de carbone

Dans la Figure 36, les fractions molaires, à l'équilibre thermodynamique, des différentes espèces issues d'un mélange initial (C, O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>) sur l'intervalle de température [273 K, 5 000 K] sont représentées pour 4 valeurs différentes du ratio C/O. Lorsque l'oxygène est en excès, il réagit avec toute la quantité disponible d'atomes de carbone pour former du CO<sub>2</sub> jusqu'à 2 000 K qui se dissocie ensuite en molécules de CO et en oxygène atomique. Si la quantité d'oxygène dans le mélange vérifie le ratio C/O = 1, alors l'oxygène disponible réagit avec les atomes de carbone pour former du CO<sub>2</sub> jusqu'à 700 K puis à partir de cette

température, le CO persiste comme l'espèce la plus stable. En cas d'excès d'atomes de carbone et pour l'intervalle de température entre 1 200 K et 3 000 K, le CO coexiste avec les atomes restants de carbone.

Afin de réduire le taux d'érosion, il apparaît clairement que les conditions les plus favorables dans la zone de décharge pour minimiser l'érosion des électrodes en graphite sont celles où le ratio C/O est supérieur à 1. Afin de créer ces conditions favorables dans la zone de décharge, nous avons injecté un mélange composé d'air et d'un vecteur carboné avec un ratio C/O supérieur à 1 en amont de la zone de décharge. Ceci permet de faire réagir chimiquement les atomes d'oxygène dans l'air à basse température (à partir de 1 000 K) pour produire du monoxyde de carbone. Cette molécule étant stable à haute température (jusqu'à 3 000 K), ceci devrait permettre de réduire le taux d'érosion des électrodes. L'élément carboné peut être gazeux comme du méthane ou solide comme de la biomasse ou du noir de carbone. Comme la torche plasma servira pour générer une flamme à partir d'un combustible solide, notre choix s'oriente vers le noir de carbone. Cet élément à haute pureté en carbone permet de bien évaluer l'intérêt de cette solution. Si les résultats sont concluants, le noir de carbone sera remplacé par de la biomasse. De plus, dans un contexte industriel, où la réduction des dépenses opérationnelles est d'une importance de premier ordre, l'injection de méthane ne s'impose pas alors comme un premier choix. Néanmoins, l'efficacité du gainage au méthane est évaluée dans le chapitre III par le biais de la modélisation.

Un premier essai a été réalisé avec l'injection de monoxyde de carbone seul (Figure 37). Cet essai nous a permis d'évaluer le taux d'érosion minimal pouvant être atteint dans le cas où tout l'oxygène aurait réagi avec le carbone injecté. Un débit de  $0,85 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  de monoxyde de carbone fut injecté tout en gardant le gainage d'azote, comme pour les essais précédents. On obtient un taux d'érosion de  $3,78 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{c}^{-1}$ . Cette valeur est proche de la moitié de celle obtenue pour un fonctionnement à l'azote. En effet, on peut déduire de la Figure 38, qu'à énergie égale par mole de gaz, si le gaz plasmagène est du monoxyde de carbone, la température de l'arc est plus basse que lorsque le gaz plasmagène est de l'azote (la température de l'arc étant supposée supérieure à 10 000 K). Cette différence de température peut expliquer la différence dans les taux d'érosion qui sont essentiellement dus au phénomène d'ablation.

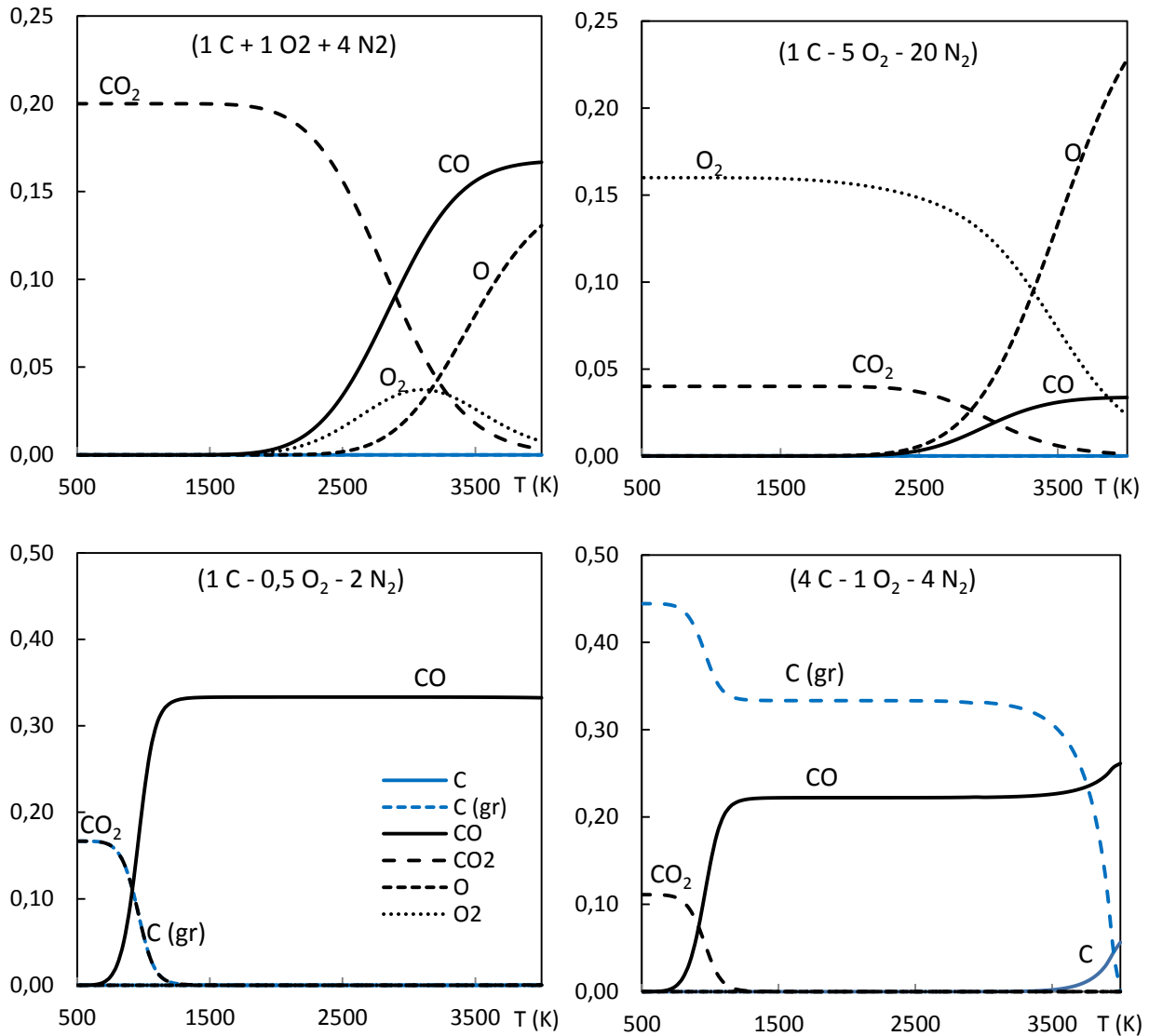


Figure 36 : Fractions molaires des différentes espèces à l'équilibre thermodynamique du mélange (C / O<sub>2</sub> / N<sub>2</sub>) pour 4 ratios C/O différents

Tableau 11 : Bilan de l'essai de quantification de l'érosion au monoxyde de carbone

Paramètres	Unités	Valeurs
Débit d'azote (gainage des électrodes)	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	3
Débit de monoxyde de carbone	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	0,85
Diamètre des électrodes	mm	18
Longueur exposée	mm	15
Courant	A	200
Puissance	kW	16
Masse érodée par électrode	g.h <sup>-1</sup>	2,72
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	µg.c <sup>-1</sup>	3,78
Taux d'érosion rapporté à la puissance	g.kWh <sup>-1</sup>	0,17
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	g.kWh <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	0,015
Pertes thermiques au travers des parois de la torche	%	57



Figure 37 : Vue de dessus de la zone de décharge électrique de la torche triphasée, après un fonctionnement pendant 30 minutes au monoxyde de carbone.

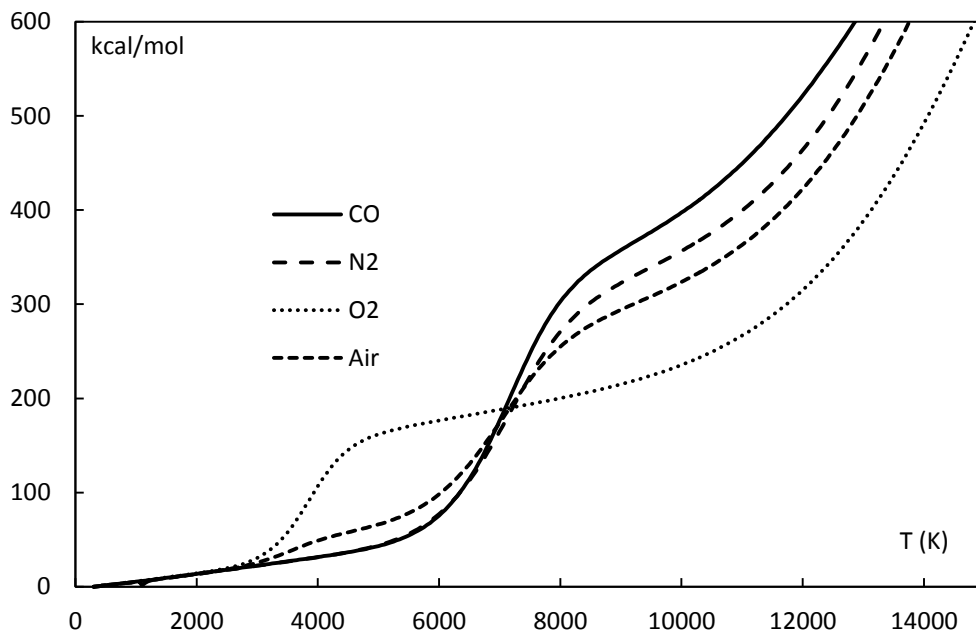


Figure 38 : Courbes enthalpie-température pour le monoxyde de carbone, l'azote, l'oxygène et l'air



### 3.3.1.4. Erosion à l'air avec injection de noir de carbone

Le Tableau 12 montre les essais effectués pour évaluer les taux d'érosion avec injection d'air et de noir de carbone pour différents ratios  $n_C / n_{O_2}$ . Contrairement à ce qu'on peut attendre, le taux d'érosion des électrodes croît avec la quantité de noir de carbone injectée. En faisant passer le ratio  $n_C / n_{O_2}$  de 2,1 à 3,75 le taux d'érosion passe de 23,7 à 51,8 en  $\mu\text{g}\cdot\text{c}^{-1}$  et de 0,081 à 0,169 en  $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Ceci peut-être dû au fait que faire croître le débit de noir de carbone pour une même puissance électrique rende plus opaque le milieu et que par conséquent le rayonnement s'intensifierait au niveau des arcs, ce qui augmenterait la température au cœur de la torche et favoriserait l'érosion des électrodes en présence d'oxygène. De plus, l'injection de particules solides directement au centre de la torche peut provoquer un nouveau type d'érosion mécanique avec l'impact direct de ces dernières sur les électrodes (Figure 39). Dans le cas d'une augmentation du débit de carbone solide injecté, cette érosion serait alors accentuée, ce qui pourrait expliquer dans ce cas l'augmentation des taux d'érosion en fonction du débit de carbone solide.

Tableau 12 : Bilan des essais de quantification de l'érosion avec injection de noir de carbone

Paramètre	Unité	Valeurs			
Ratio $n_C / n_{O_2}$	--	2,1	2,5	3	3,75
Débit de noir de carbone	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	0,433	0,5	0,6	0,75
Débit d'azote (gainage des électrodes)	$\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$	3	3	3	3
Débit d'air	$\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$	2	2	2	2
Diamètre des électrodes	mm	18	18	18	18
Longueur exposée	mm	15	15	15	15
Courant	A	200	200	200	200
Puissance	kW	19	18	18	20
Masse érodée par électrode	$\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	17,1	29,2	30,0	37,3
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	$\mu\text{g}\cdot\text{c}^{-1}$	23,7	40,6	41,7	51,8
Taux d'érosion rapporté à la puissance	$\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$	0,9	1,62	1,7	1,87
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	$\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$	0,081	0,147	0,151	0,169
Pertes thermiques au travers des parois de la torche	%	45	46	50	52

Les résultats de l'analyse des gaz à la sortie du filtre par chromatographie en phase gazeuse, détaillés dans le Tableau 13, montrent que l'injection de la poudre de noir de carbone à faible ratio ( $n_C/n_{O_2} = 2,1$ ) permet de créer du monoxyde de carbone à hauteur de 18,8 % dans le gaz échantillonné. En augmentant le ratio  $n_C/n_{O_2}$ , le pourcentage de CO baisse à moins de 1 %. Un faible débit de noir de carbone peut aider à réduire le taux d'érosion sans atteindre un taux aussi bas que celui avec du CO comme gaz plasmagène d'entrée.



Figure 39 : Vue de dessus de la zone de décharge électrique de la torche triphasée, après un fonctionnement pendant une heure à l'air avec un débit de noir de carbone de 0,433 kg.h<sup>-1</sup>.

Tableau 13 : Composition du gaz à la sortie du réacteur mesurée par chromatographie en phase gazeuse

	Débits des gaz (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )			Composition du gaz (mol %)			
	Air	Azote	CO	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Test au monoxyde de carbone	0	3	0,85	14,1	0,5	--	84
Test à l'air	2	3	0	0,21	3,54	3,4	92,9
Test à l'air (ratio $n_C/n_{O_2} = 2,10$ )	2	3	0	18,8	0,04	1,82	79,3
Test à l'air (ratio $n_C/n_{O_2} = 3,75$ )	2	3	0	0,78	0	16,1	83,2

### 3.3.1.5. Conclusion

Dans le Tableau 14 sont résumés les taux d'érosion obtenus avec les différents gaz plasmagènes testés. Le taux le plus bas, d'une valeur de 0,015 g.kWh<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>, est obtenu avec l'injection de monoxyde de carbone. Bien que le taux d'érosion à l'azote soit presque le double de celui au monoxyde de carbone, ce taux est relativement faible et l'azote peut toujours être considéré comme un gaz de gainage pour les électrodes.

En injectant de l'air, le taux d'érosion augmente jusqu'à 0,095 g.kWh<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>. L'injection de noir de carbone ne permet pas de réduire le taux d'érosion des électrodes comme souhaité. Le temps de séjours des particules injectées et les échanges thermiques entre ces particules et le gaz plasmagène sont des paramètres difficiles à maîtriser. Les résultats obtenus montrent que

les conditions d'écoulement en amont de la zone de décharge ne sont pas favorables à l'oxydation partielle du noir de carbone pour la création d'une atmosphère riche en monoxyde de carbone autour des électrodes. La solution d'injection de particules carbonées n'est pas totalement éliminée car pour le ratio  $n_C/n_{O_2}$  de 2,1, le taux d'érosion a été réduit de 10 %.

Tableau 14 : Taux d'érosion avec les différents gaz plasmagènes testés. Tous les essais réalisés contiennent une injection d'azote pour le gainage des électrodes avec un débit total de  $3 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

Gaz plasmagènes	Unités				Valeurs			
	--	N2	CO	Air	Air avec injection de noir de carbone ; $n_C/n_{O_2} =$			
					2,1	2,5	3	3,75
Masse érodée par électrode	$\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$	5,1	2,72	18,5	17,1	29,2	30,0	37,3
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	$\mu\text{g} \cdot \text{c}^{-1}$	7,1	3,78	25,6	23,7	40,6	41,7	51,8
Taux d'érosion rapporté à la puissance	$\text{g} \cdot \text{kWh}^{-1}$	0,283	0,17	1,06	0,9	1,62	1,7	1,87
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	$\text{g} \cdot \text{kWh}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	0,026	0,015	0,095	0,081	0,147	0,151	0,169

### 3.3.2. Débit du gaz plasma

Trois essais à l'air ont été réalisés pour étudier l'influence de la vitesse du gaz sur le taux d'érosion. Le premier essai a été effectué en doublant le débit d'air et le deuxième essai en conservant le débit initial mais en élargissant le diamètre de la zone plasma. Les différentes conditions et les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 15. On note qu'en doublant le débit d'air, le taux d'érosion n'est pas multiplié par deux. Ceci étant naturel puisque ce n'est pas toute la quantité d'air qui vient impacter les électrodes en graphite. Le même débit sur une section de passage plus large permet de réduire notablement le taux d'érosion. On peut dire qu'une vitesse d'air plus faible permet de réduire le taux d'érosion.

Pour un débit d'air plus important de l'ordre de plusieurs dizaines de  $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , comme celui dont on a besoin pour la combustion dans le premier étage d'un électrobrûleur, il est indispensable que toute cette quantité d'air puisse passer par la zone de décharge. Ainsi, l'air sera en prépondérance au voisinage des surfaces exposées du graphite. Il faut alors trouver une solution pour contrôler l'aérodynamique autour des électrodes de façon à baisser la vitesse de l'air au voisinage des surfaces exposées du graphite sans réduire le débit traversant l'arc.

Tableau 15 : Paramètres des essais de quantification de l'érosion en fonction du débit d'air et de la géométrie interne de la zone de décharge

Paramètres	Unités	Valeurs		
Débit d'azote (gainage des électrodes)	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	3	3	3
Débit d'air	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	2	4	2
Diamètre de la zone plasma	cm	6,2	10	10
Vitesse moyenne du gaz dans la zone de décharge	m.s <sup>-1</sup>	0,51	0,27	0,20
Diamètre des électrodes	mm	18	18	18
Longueur exposée	mm	15	15	15
Courant	A	200	210	200
Puissance	kW	17,5	15	16,5
Masse érodée par électrode	g.h <sup>-1</sup>	18,5	10,8	6,8
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	μg.c <sup>-1</sup>	25,6	14,3	9,4
Taux d'érosion rapporté à la puissance	g.kWh <sup>-1</sup>	1,05	0,72	0,41
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	g.kWh <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	0,095	0,065	0,037
Pertes thermiques au travers des parois de la torche	%	53	64	67

### 3.4. Bilans énergétique en fonction des conditions expérimentales

Avec la configuration de départ, les pertes thermiques sont supérieures à 45 % de la puissance totale et ceci pour des puissances allant de 15 à 20 kW. Il est indispensable de réduire ces pertes thermiques pour rendre disponible le maximum de puissance dans la chambre de combustion. La Figure 40 montre le bilan de puissance pour un essai de fonctionnement à l'air. Les oscillations avec des périodes inférieures à une minute sont principalement dues à de faibles fluctuations de la puissance électrique sous l'effet des forces hydrodynamiques. Ces deux facteurs sont liés, car les perturbations hydrodynamiques affectent directement la zone inter-électrodes, ce qui peut changer par exemple la température locale et par conséquent la conductivité du gaz. La puissance de l'arc change en conséquence. Les fluctuations avec des périodes de plusieurs minutes sont liées à la variation de la distance inter-électrodes. En effet, à cause de l'érosion des électrodes la distance inter-électrodes augmente au cours du temps et la colonne d'arc est étirée d'avantage. Plusieurs formulations empiriques ont été présentées pour lier la longueur de la colonne d'arc à la tension d'arc. L'équation de Ayrton et la formule de Warrington, supposent que la tension d'un arc, dans des conditions stationnaires, croit en fonction de la longueur de sa colonne [107].

Equation d'Ayrton

$$U_a = A + E_a \cdot L + \frac{C + D \cdot L}{I} \quad (13)$$

Formule de Warrington 
$$U_a = E_a \cdot L = \frac{K}{I^n} L \quad (14)$$

$U_a$ ,  $E_a$ ,  $A$ ,  $L$  et  $I$  sont respectivement la tension de l'arc, le gradient de tension dans l'arc, la chute de la tension cathodique, la longueur de la colonne d'arc et le courant parcourant l'arc.  $C$ ,  $D$ ,  $K$  et  $n$  sont des constantes empiriques.

Ainsi, lorsque la distance inter-électrodes augmente, la puissance de l'arc augmente aussi. A une certaine longueur, les forces hydrodynamiques peuvent venir éteindre l'arc. Nous intervenons alors pour faire avancer les électrodes et les rapprocher. L'intervention est effectuée en surveillant la tension de la torche, à partir d'une limite propre aux conditions de fonctionnement (principalement, le débit d'air, le courant et la durée de fonctionnement). La chute de la tension liée au rapprochement des électrodes se traduit par une chute de la puissance thermique mesurée. Le calcul en temps réel de la puissance thermique perdue au travers des parois de la torche, peut être un moyen d'ajustement de la position des électrodes. L'analyse des pentes de croissance de la puissance peut également donner une estimation du taux d'érosion des électrodes en cours de fonctionnement.

Comme on peut le voir dans le Tableau 15, les variations du débit d'air et de la section de passage montrent que lorsque la vitesse moyenne du gaz plasmagène baisse les pertes thermiques croissent et peuvent atteindre 67 % de la puissance totale. Comparée aux essais à l'azote, au monoxyde de carbone et à l'air, l'injection de poudre de noir de carbone permet de baisser les pertes thermiques dans la torche (cf. Tableau 12). La température dans la zone de décharge diminue en présence de ces particules, car elles jouent le rôle d'un vecteur d'énergie qui l'absorbe dans la zone de décharge pour l'émettre par rayonnement plus loin. Néanmoins, l'augmentation du débit de noir de carbone a tendance à réduire cet effet.

Dans la configuration actuelle de la torche plasma, le débit d'air total ne peut pas dépasser  $10 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . En effet, nous avons noté qu'avec un débit plus élevé, la décharge devient difficile à stabiliser et l'arc s'éteint régulièrement car l'écoulement induit des forces hydrodynamiques importantes et un refroidissement rapide de la zone inter-électrodes. Les conditions d'existence de l'arc ne sont plus satisfaites.

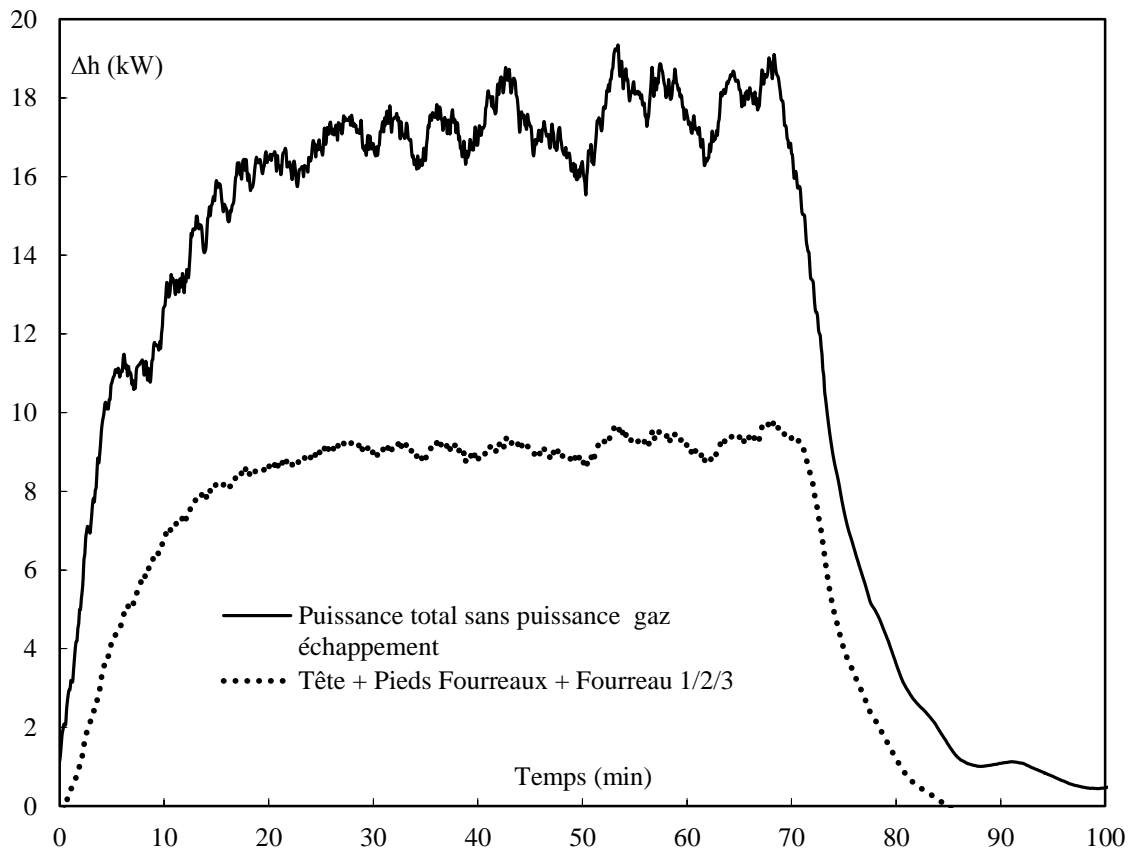


Figure 40 : Evolutions de la puissance thermique totale et de la puissance perdue au travers des parois de la torche. Plasma d'azote ( $3 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) et d'air ( $2 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ). Essai d'une durée de 70 minutes.

### 3.5. Caractérisation du comportement de l'arc

Pour mieux comprendre le comportement de l'arc dans la configuration coplanaire, nous nous sommes intéressés à l'analyse du mouvement de l'arc en exploitant les vidéos prises par caméra rapide. L'étude du mouvement des arcs électriques dans les torches plasma se limite souvent à des analyses cognitives qualitatives, ne permettant pas une caractérisation objective à l'échelle locale des arcs électriques ainsi que des phénomènes qui les influencent.

Afin de permettre une étude quantitative des principales caractéristiques de l'arc électrique (vitesse et direction du déplacement d'arc, point d'accroche sur la cathode, rayon de courbure et longueur de l'arc ...), un algorithme de traitement et d'analyse d'images a été développé sur la base du logiciel Matlab. Cet algorithme appliqué à une vidéo acquise par caméra haute vitesse permet de mieux appréhender le comportement de l'arc mais aussi d'effectuer une analyse statistique sur la vitesse et la direction du déplacement de l'arc ainsi que sur sa géométrie.

### 3.5.1. Algorithme de détection et d'analyse des arcs

L'algorithme se divise en trois parties principales. La première partie permet de détecter la position des électrodes et de compléter les parties invisibles. La deuxième partie traite la vidéo image par image et permet de différencier l'arc des électrodes ou d'une simple zone chaude. Les éléments qui définissent la position, comme les pieds de l'arc et la ligne moyenne sont également extraits dans cette partie. La dernière partie de l'algorithme permet de traiter les informations obtenus précédemment afin d'effectuer des analyses statistiques sur la vitesse, la direction de déplacement, le rayon de courbure de l'arc, la durée de vie et le profil d'intensité de l'arc.

#### *Détection des électrodes*

Basé sur la différence de luminescence entre l'arc et les électrodes, l'algorithme permet de déduire, à partir de la moyenne des matrices d'intensité lumineuse acquise sur une durée supérieure à une période du courant, la position et la géométrie des électrodes dans chaque image.

#### *Détection des arcs*

On suppose l'existence d'une température spécifique  $T_s$  qui délimite le volume de l'arc. Cette température sera atteinte une fois que l'arc est amorcé et la jonction est réalisée entre l'anode et la cathode. L'équivalent de cette surface à température  $T_s$  sur la matrice de luminosité sera une iso-ligne avec un seuil de luminosité  $I_s$  déterminée empiriquement.  $I_s$  correspond à une intensité lumineuse supérieure à celle des électrodes, mais suffisamment proche pour obtenir une distance minimale entre l'arc et l'électrode, permettant de détecter également les pieds d'arc. La détection de l'arc est réalisée sur chaque image de la vidéo. La Figure 41 illustre le traitement d'image réalisé par cet algorithme.

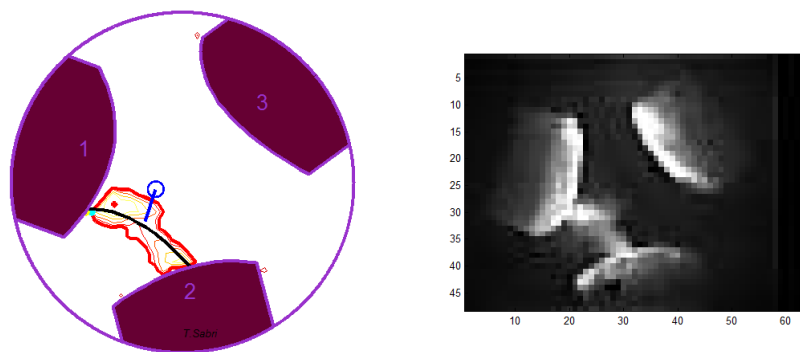


Figure 41. Images extraites de la vidéo prise par caméra rapide (droite) et de la vidéo traitée (gauche)

### 3.5.2. Analyse statistique des propriétés de l'arc

Cet algorithme est codé sur la base du logiciel Matlab. Il reçoit en entrée la vidéo acquise et envoie en sortie une deuxième vidéo traitée avec différents graphiques de distribution de densité de probabilité des paramètres qu'on juge pertinents pour caractériser le comportement des arcs de la torche triphasée. Les résultats présentés ci-dessous découlent du traitement d'une vidéo prise par la caméra rapide avec une vitesse d'acquisition de 100 000 images par seconde et une résolution de 64 X 48 pixels. La vidéo est enregistrée durant un fonctionnement à l'azote avec un débit totale de  $2,6 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ , un courant de consigne de 200 A et une puissance de plasma de l'ordre de 15 kW. La fréquence du courant est égale à 680 Hz.

L'angle de la direction du vecteur vitesse instantanée est calculé par rapport à la droite qui relie les deux électrodes jouant les rôles d'anode et de cathode Si cet angle est égal à  $90^\circ$ , ceci veut dire que le centre de l'arc se déplace vers la troisième électrode. Si l'angle est égal à  $-90^\circ$ , l'arc s'éloigne de la zone inter-électrodes. La Figure 42 montre que la distribution de la densité de probabilité présente une forme gaussienne sur l'intervalle  $[40^\circ, 160^\circ]$  comprenant 80 % de la probabilité. L'angle le plus probable est  $95^\circ$  ce qui montre que le centre de l'arc a tendance à se déplacer vers la troisième électrode. Cette observation est confirmée par la distribution spatiale de la probabilité du positionnement du centre de l'arc montrée dans la Figure 43.

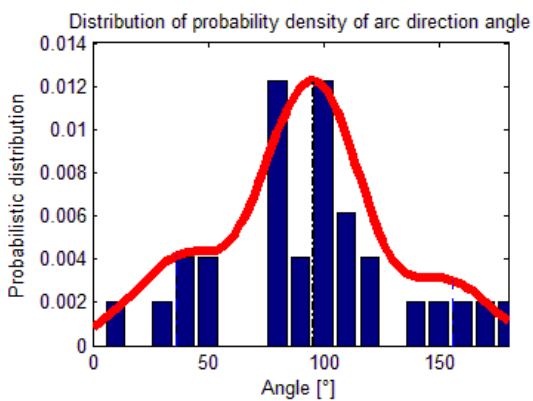


Figure 42. En rouge, courbe de la densité de probabilité de l'angle du vecteur vitesse instantanée du centre de la colonne d'arc. En bleu, histogramme statistique.

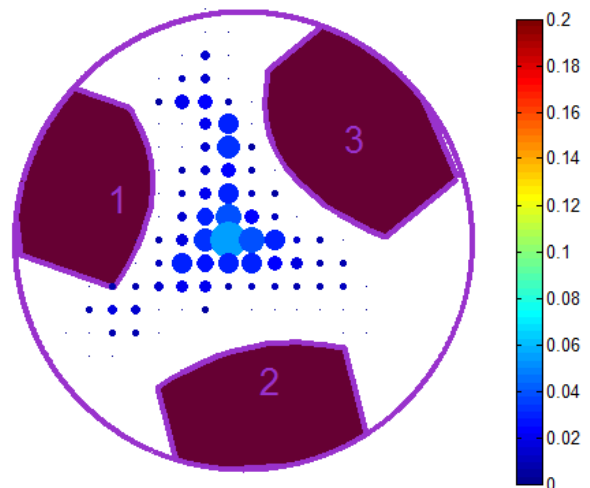


Figure 43 : distribution spatiale de la probabilité de positionnement du centre de la colonne d'arc. La couleur et le diamètre de chaque cercle représentent la valeur de la probabilité pour que le centre de l'arc soit dans ce cercle. (électrodes de 17 mm de diamètre)



En ce qui concerne la vitesse, l'allure de la distribution gaussienne s'étale sur l'intervalle  $[0, 40]$  m.s<sup>-1</sup> selon la Figure 44. Statistiquement, la vitesse moyenne la plus probable est de 15 m.s<sup>-1</sup>. On note aussi que la distribution de densité de probabilité est quasi-symétrique par rapport à cette valeur moyenne. Cette vitesse rapportée aux conditions de température et de pression dans la zone inter-électrodes donne un nombre de mach de 0,012, montrant que l'arc est relativement stable durant sa durée de vie. Selon la Figure 45, le rayon de courbure le plus probable est de 8 mm. On peut déduire que les forces électromagnétiques ne parviennent pas alors à allonger suffisamment l'arc.

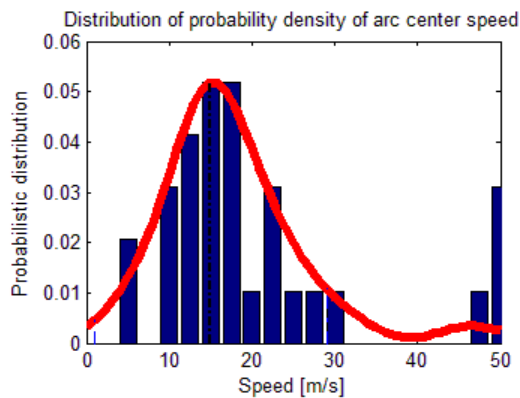


Figure 44. En rouge, courbe de la densité de probabilité de la vitesse moyenne du centre de la colonne d'arc. En bleu, histogramme statistique.

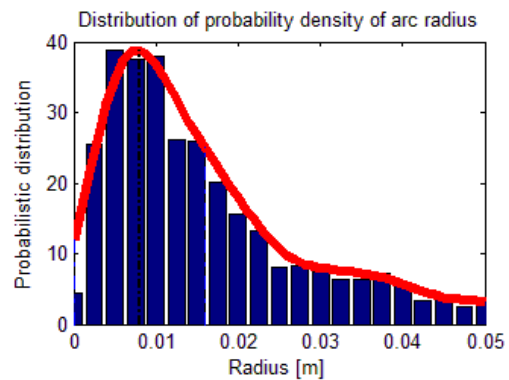


Figure 45. En rouge, la courbe de la densité de probabilité du rayon de courbure de la ligne moyenne de la colonne d'arc. En bleu, histogramme statistique.

Sachant qu'une période est de l'ordre de 1,5 ms et que pendant une période, on a 6 arcs [108], la durée de vie théorique d'un arc est de 250  $\mu$ s. Contrairement aux observations précédentes, le profil de la distribution de la densité de probabilité de la durée de vie des arcs ne peut pas être approximé à une gaussienne. La valeur la plus probable qui est de 190  $\mu$ s représente 76 % de la durée de vie théorique de l'arc. Nous en déduisons que les arcs ne s'enchainent pas.

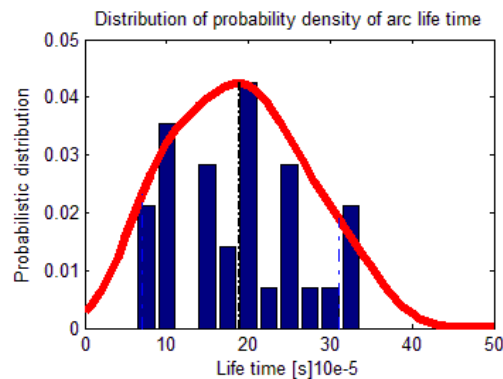


Figure 46. En rouge, courbe de la densité de probabilité de la durée de vie des arcs. En bleu, histogramme statistique.

Nous avons pu également tracer le profil moyen de l'intensité lumineuse sur une section de l'arc. Si on considère qu'il y a une relation linéaire entre l'intensité lumineuse et la température de l'arc, nous pouvons en déduire un diamètre moyen de l'arc. Comme le montre le Figure 47, le diamètre correspondant à la mi-hauteur est égal à 9 mm et le diamètre correspondant aux points d'inflexion est de l'ordre de 4 mm. Nous nous basons sur cette dernière valeur pour la simplification de la colonne d'arc détaillée dans le chapitre III.

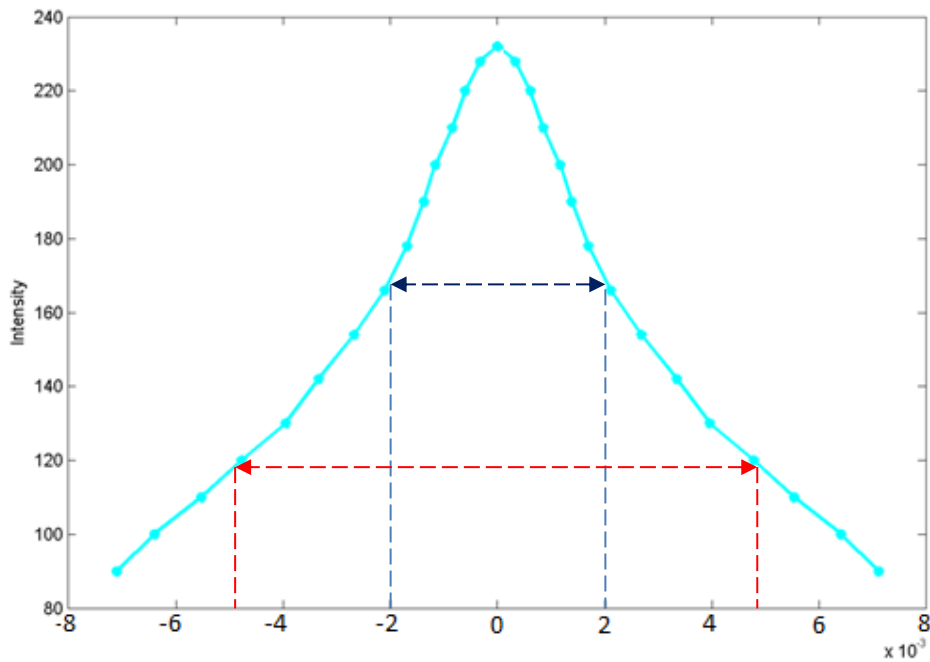


Figure 47 : Profil d'intensité lumineuse moyen sur la section d'un arc.

## **4. Développement d'une nouvelle torche adaptée à la combustion assistée par plasma**

### **4.1.Objectifs**

La configuration coplanaire initiale de la torche plasma triphasée a été conçue pour un fonctionnement en milieu non-oxydant (hélium, argon, azote, gaz de synthèse, ...), pour des applications telles que la production de noir de carbone, la synthèse de nanoparticules ou la gazéification. L'intégration de la torche plasma dans un brûleur nécessite qu'elle puisse fonctionner avec de l'air comme principal gaz plasmagène. L'étude préliminaire détaillée dans la section précédente montre les limitations de cette conception en termes d'érosion des électrodes, pertes thermiques, puissance électrique et débit d'air.

Tout d'abord, la limite du débit d'air est autour de  $10 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ . Ce débit n'est pas suffisant pour l'assistance à la combustion dans un électrobrûleur de plusieurs MW (entre 5 et 10 MW). En effet, dans un électrobrûleur de 10 MW développé par Ustimenko et al., le débit d'air fourni pour la torche DC de 100 kW est égale à  $54 \text{ kg.h}^{-1}$ , soit  $45 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$  [47]. La torche triphasée actuelle fournit moins de 25 % du débit nécessaire pour l'assistance à la combustion. Il est donc nécessaire d'améliorer la conception de la torche pour garantir un débit plus important sans déstabiliser la décharge électrique.

Ensuite, la puissance de la torche doit être augmentée à 100 kW. Avec la configuration coplanaire, la limite de puissance est autour de 20 kW pour 200 A. En effet, l'arc reste confiné dans la zone inter-électrodes et les forces électromagnétiques et hydrodynamiques ne parviennent pas à l'étirer suffisamment pour faire croître la tension de l'arc. Elle ne dépasse pas les 90 V dans tous les essais réalisés. Les jets aux électrodes imposent aux pieds d'arc une direction perpendiculaire à la section de l'électrode. Dans une configuration coplanaire, cette direction est orientée vers les autres électrodes et la déviation de la colonne d'arc par les forces électromagnétiques est minimale. Le deuxième point à améliorer est l'angle entre les électrodes qui doit être optimisé pour extraire le maximum de puissance.

Le troisième élément à optimiser est l'érosion des électrodes. Actuellement, le taux d'érosion à l'air est autour  $0,095 \text{ g.kWh}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ . Pour des électrodes consommables en graphite alimentées en continu, ce taux d'érosion ne va pas contraindre le fonctionnement continu de la torche sauf si les conditions érosives deviennent plus sévères dans le cas où le débit d'air

plasma, la puissance électrique et le courant d'arc sont augmentés simultanément. Il est indispensable d'associer les solutions technologiques citées précédemment afin que le taux d'érosion ne se dégrade pas avec des conditions opératoires sévères.

Le quatrième axe d'amélioration concerne les pertes thermiques. Actuellement la torche plasma est dotée d'un revêtement en graphite sur les parois pour minimiser les pertes en conditions non-oxydantes. Cette isolation ne peut pas être utilisée pour un fonctionnement à l'air. De plus, à cause du confinement de l'arc dans un faible volume plasma, les pertes thermiques sont supérieures à 45 %, malgré l'isolation en graphite qui est en place. La géométrie de la torche doit être modifiée pour mieux transférer l'énergie du plasma vers la sortie de la torche. Il faut également identifier le matériau d'isolation le mieux adapté qui offrira une excellente tenue thermique associée à une forte résistance à l'oxydation.

#### **4.2. Solutions technologiques préconisées pour augmenter la puissance de la torche**

Les travaux de C. Rehmert portant sur la modélisation MagnétoHydroDynamique de la décharge triphasée montrent l'influence de la configuration des électrodes sur le comportement de l'arc [97]. Lorsque les électrodes sont parallèles, l'étirement de l'arc est maximal sous l'effet combiné des jets aux électrodes et de la force de Lorentz. Théoriquement, des électrodes parallèles permettent d'atteindre une puissance maximale. Néanmoins, ceci nécessite la modification de la procédure de démarrage. Avec la configuration coplanaire, le démarrage est réalisé par simple mise en contact des électrodes. Le court-circuit permet le passage de courant entre les électrodes qui ne sont pas au même potentiel, provoquant ainsi l'apparition d'un arc électrique. L'éloignement des électrodes permet d'obtenir un arc plus puissant. Dans le cas où les électrodes sont parallèles, le démarrage par mise en contact n'est pas possible et demande l'utilisation d'une électrode de relais ou d'une source secondaire de plasma pour ioniser le gaz dans la zone inter-électrodes et le rendre conducteur à faible tension. Pour des raisons technologiques tenant compte des difficultés techniques identifiées précédemment, les électrodes ne sont pas parallèles mais sont inscrites dans un cône ayant un angle de  $20^\circ$  par rapport à l'axe de la torche. Cet angle de  $20^\circ$  a été identifié comme étant l'angle le mieux adapté pour répondre au compromis puissance/complexité technologique. Un angle plus faible complexifierait la conception de la torche et nous obligerait à avancer d'avantage les électrodes pour la mise en contact lors du

démarrage, ce qui augmenterait désavantageusement la longueur de la torche et par conséquent, les pertes aux parois.

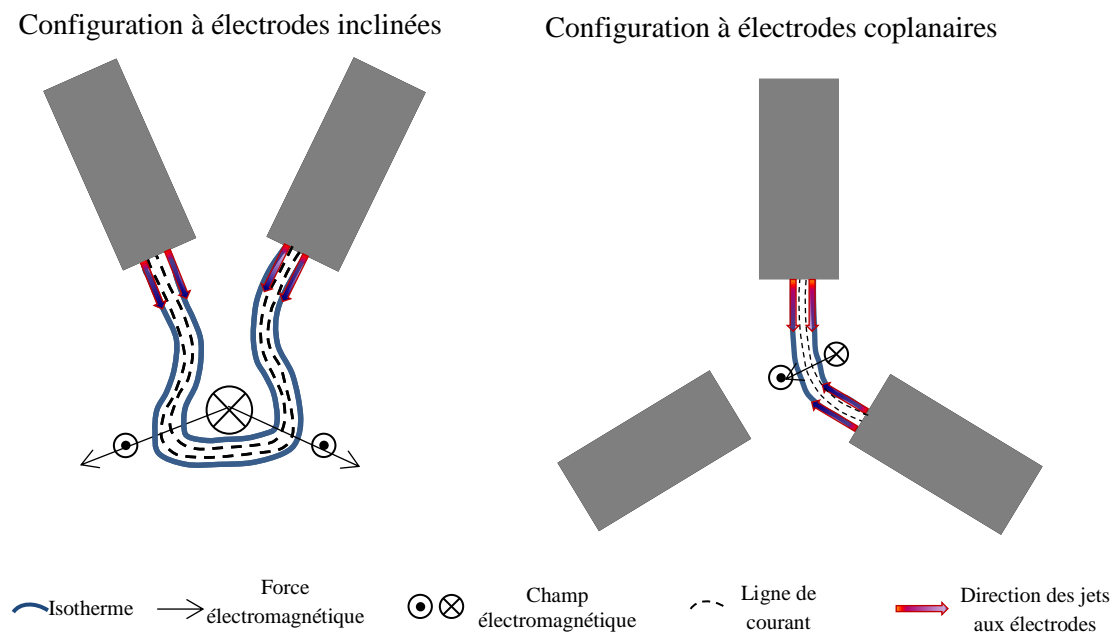


Figure 48 : Illustration des mécanismes conduisant à l'étirement de l'arc dans une configuration d'électrodes inclinées et une configuration d'électrodes coplanaires

Selon la Figure 51, la dissociation de l'oxygène commence autour de 1 600 K, la concentration d'oxygène atomique reste très faible à 2 000 K ( $6,68 \cdot 10^2$  ppm) mais dépasse les  $10^5$  ppm à 3 000 K. Pour des raisons de tenue de matériaux, cette température est choisie comme la température moyenne du gaz plasmagène à la sortie de la torche. La température est évidemment plus élevée dans la zone de décharge, ce qui permet d'augmenter la concentration d'oxygène atomique. Les Figure 49 et Figure 50 permettent de déterminer l'énergie volumique que doit contenir le gaz pour atteindre une température moyenne de l'ordre de 3 000 K en sortie. Pour l'air, cette température correspond à une énergie volumique de  $1,53 \text{ kWh} \cdot \text{Nm}^{-3}$ . Pour une puissance de 100 kW, le débit de gaz nécessaire est alors égal à  $65 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

Pour le débit et la température de sortie sélectionnés, la section de sortie est calculée en fonction du nombre de Reynolds. Si on considère l'intérieure de la torche comme un cylindre, la relation entre le nombre de Reynolds  $R_e$  et le diamètre de sortie  $D_s$  est définie par l'équation suivante :

$$Re = \frac{4 Q_{T_0}}{\pi v_s} \cdot \frac{\rho_{T_0}}{\rho_{T_s}} \cdot \frac{1}{D_s} \quad (\text{II.8})$$

Dans cette équation,  $Q_{T_0}$ ,  $\rho_{T_0}$ ,  $\rho_{T_s}$  et  $v_s$  sont respectivement le débit à la température ambiante, la masse volumique à la température ambiante et à la température de sortie et la viscosité cinématique à la température de sortie. Si le régime est laminaire dans la torche, la vitesse ainsi que la température de l'écoulement ne seront pas homogènes à cause du gradient entre les écoulements axial et périphérique. Par contre, si le régime est complètement turbulent dans la torche, des poches de turbulences et de recirculations peuvent apparaître. Ceci peut affecter le contrôle de l'écoulement sur les extrémités des électrodes, augmentant ainsi l'érosion, ou encore sur les parois de la torche, augmentant par conséquent les pertes thermiques. Un nombre de Reynolds transitoire peut être un compromis intéressant pour associer les avantages des deux modes. Pour une valeur de  $Re$  égale à 1 800, le diamètre correspondant est égal à 15 cm. Ce diamètre donne une vitesse de sortie autour de  $10 \text{ m.s}^{-1}$ .

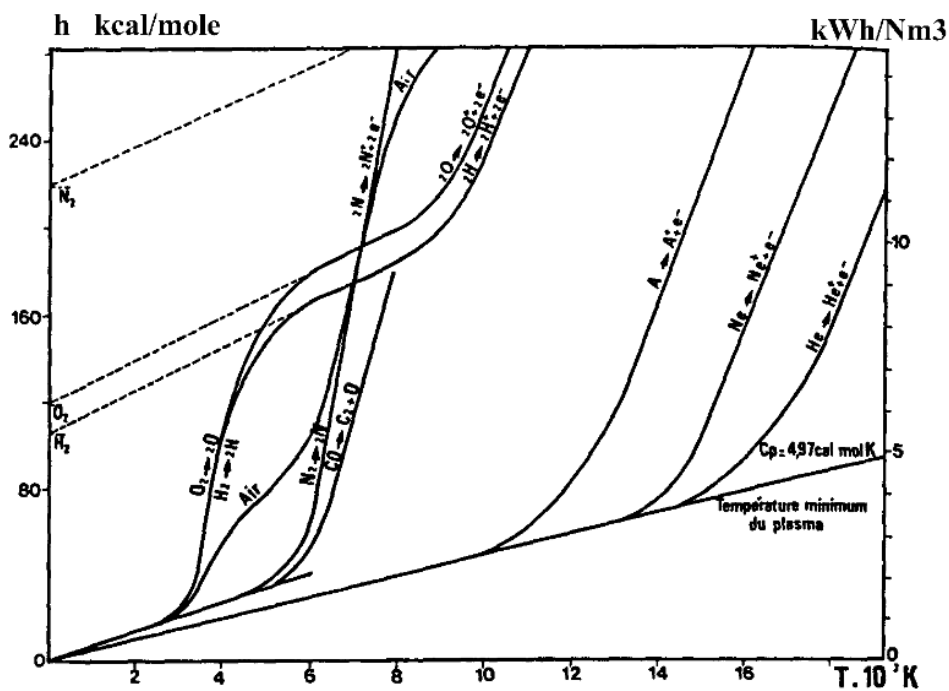


Figure 49 : Relation Enthalpie-Température pour différents gaz [9]

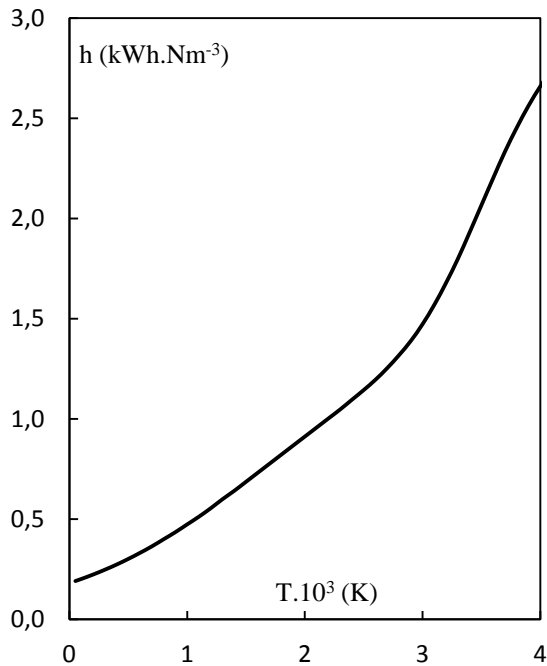


Figure 50 : Courbe Enthalpie-Température de l'air à 1 bar absolu

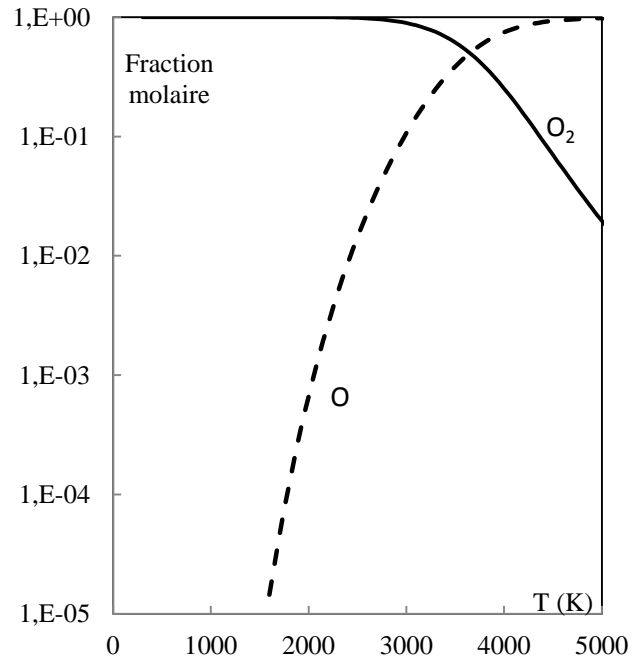


Figure 51 : Composition de l'oxygène en fraction molaire en fonction de la température à 1 bar absolu

### 4.3. Solutions technologiques préconisées pour réduire l'érosion des électrodes

#### 4.3.1. Gainage des électrodes par un gaz neutre ou réducteur

Les essais préliminaires sur la torche initiale montrent que l'azote offre un taux d'érosion relativement bas ( $0,026 \text{ g.kWh}^{-1}.\text{cm}^{-2}$  à l'azote contre  $0,095 \text{ g.kWh}^{-1}.\text{cm}^{-2}$  à l'air). L'azote est gardé comme gaz de gainage pour les électrodes. Afin d'amener le gainage jusqu'au plus proche de la zone de formation de l'arc, le débit d'azote est porté à  $10 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ . Le débit d'air passe à  $55 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$  pour conserver le même débit total et les mêmes conditions de sortie soit une température de  $3\,000 \text{ K}$ , une vitesse de  $10 \text{ m.s}^{-1}$  et un nombre de Reynolds de  $1\,800$ . Le prix du  $\text{Nm}^3$  d'azote étant estimé à  $0,3 \text{ €}$ , les frais supplémentaires liés au gainage à l'azote sont acceptables.

#### 4.3.2. Protection chimique des électrodes

L'injection de noir de carbone avec un ratio  $n_C/n_{O_2}$  de l'ordre de 2 a permis de réduire le taux d'érosion de  $10 \%$ . Le contrôle de l'équilibre thermochimique autour des électrodes peut être efficace si les conditions aérodynamiques et thermiques dans cette zone sont favorables. Pour l'application visée de combustion de biomasse, l'injection de noir de carbone pour contrôler l'équilibre chimique autour des électrodes sera remplacée par une injection de

biomasse qui se fera via une buse placée au-dessus de la zone de décharge avec un débit autour du kg par heure. De plus, pour la fabrication des électrodes, du graphite imprégné de phosphate nous a été préconisé par la société SGL Carbon. Cette imprégnation permet d'améliorer la résistance à l'air jusqu'à 1 100 K. Les caractéristiques de ce graphite sont résumées dans le Tableau 16.

Tableau 16: Propriétés du graphite des électrodes de la nouvelle torche plasma triphasée

Propriété	Unité	Valeur
Masse volumique	$\text{g.cm}^{-3}$	1,77
Porosité	%	14
Diamètre moyen des porosités	$\mu\text{m}$	1,8
Coefficient de perméabilité	$\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$	0,25
Conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	90
Résistivité électrique	$\mu\Omega.\text{m}$	14
Résistance à l'oxygène	K	Jusqu'à 1 100

#### 4.3.3. Augmentation du diamètre des électrodes

Comme précisé précédemment [79], il a été démontré que le taux d'érosion augmente lorsque la section de passage du courant diminue. Pour une puissance de 100 kW, il est judicieux d'utiliser des électrodes de plus gros diamètre. Ceci permet d'avoir une densité de courant plus faible et par conséquent moins d'échauffement par effet joule. La Figure 52 montre la relation courant-tension en fonction de l'angle entre les deux électrodes d'une torche jumelle DC. Bien que dans notre cas le courant soit alternatif, le comportement de l'arc sur un temps très court (durée de vie de l'arc pour un courant triphasé est un sixième de la période du courant) est semblable à celui d'un arc DC. Ainsi, pour une puissance de 100 kW, on peut estimer le courant à 360 A et la tension à 260 V dans une configuration à  $22,5^\circ$  en DC. Pour une densité de courant maximal de  $1 \text{ A.mm}^{-2}$ , le diamètre minimal pour pouvoir supporter 360 A est de 21 mm. En gardant une marge de sécurité, le diamètre des électrodes est amené à 25 mm. Pour la même densité de courant, le courant maximale toléré pour des électrodes de diamètres 25 mm est de 490 A. La modification du diamètre des électrodes implique la modification technologique du système d'alimentation électrique et d'une grande partie des supports d'électrodes



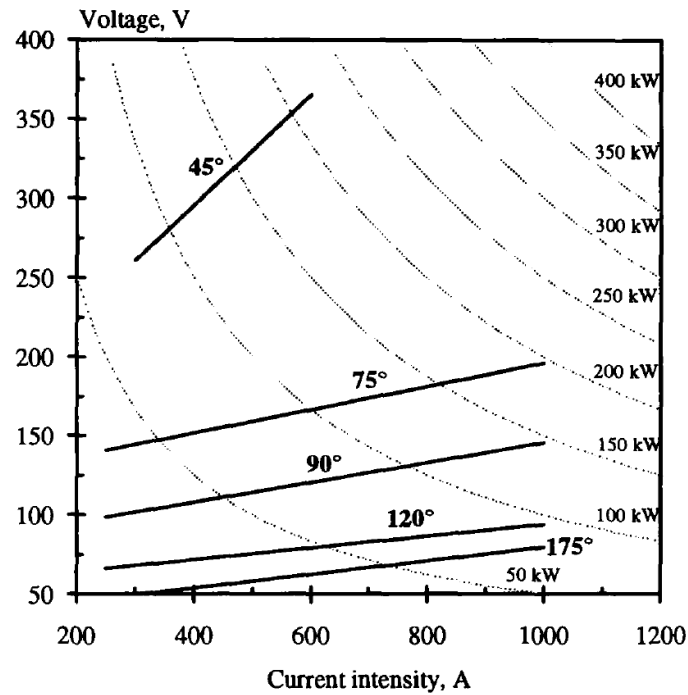


Figure 52 : Variation de la puissance électrique en fonction de l'intensité du courant et de l'angle entre les électrodes pour une torche jumelle à électrodes en tungstène. L'angle entre les électrodes est le double de l'angle entre une électrode et l'axe principal de la torche [109]

#### 4.3.4. Protection physique des électrodes

La céramique en nitrure de bore (Figure 53) qui joue le rôle d'isolant électrique est conçue pour acheminer le gaz de gainage jusqu'au plus proche de la zone de décharge. Son diamètre intérieur est également réduit pour laisser un espace de 1 mm seulement entre l'électrode et la céramique. La vitesse de l'azote est alors augmentée afin de prolonger le gainage le plus loin possible. La forme de l'extrémité de la céramique est réduite progressivement afin de garder un écoulement laminaire à la sortie du gainage et éviter le détachement de la couche limite.

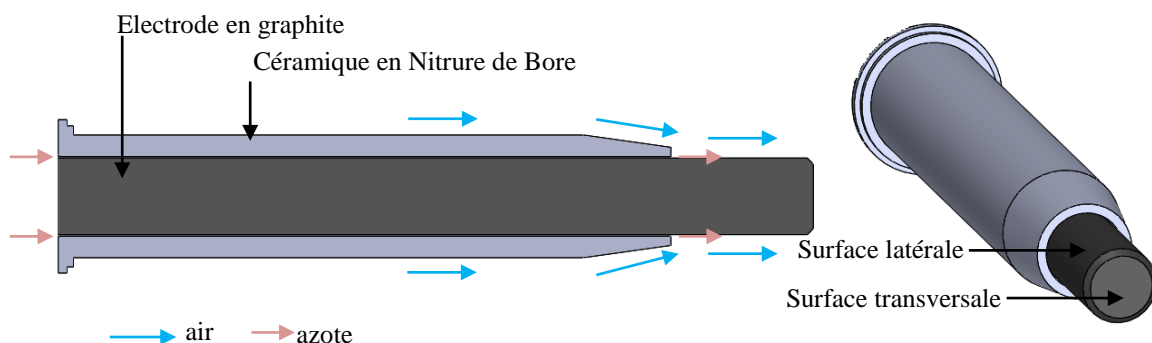


Figure 53 : vue en coupe (gauche) et vue isométrique de l'électrode en graphite avec l'isolant électrique en nitrure de bore

#### 4.3.5. Contrôle de l'écoulement du flux d'air

Avec la quantité importante d'air injecté autour des électrodes, il est indispensable de contrôler l'écoulement d'air pour éviter l'augmentation du taux d'érosion à fort débit. Nous avons vu que la vitesse de l'air joue un rôle primordial dans le phénomène d'érosion. Réduire la composante normale de la vitesse sur la surface des électrodes peut donc réduire le taux d'érosion. L'air est alors injecté autour des céramiques en nitrure de bore de manière excentrique (Figure 54) afin de minimiser le passage de l'air au-dessus de la zone de décharge et de privilégier le passage de la majorité du débit d'air en dessous des électrodes, limitant ainsi la présence d'oxygène autour de la zone chaude des électrodes.

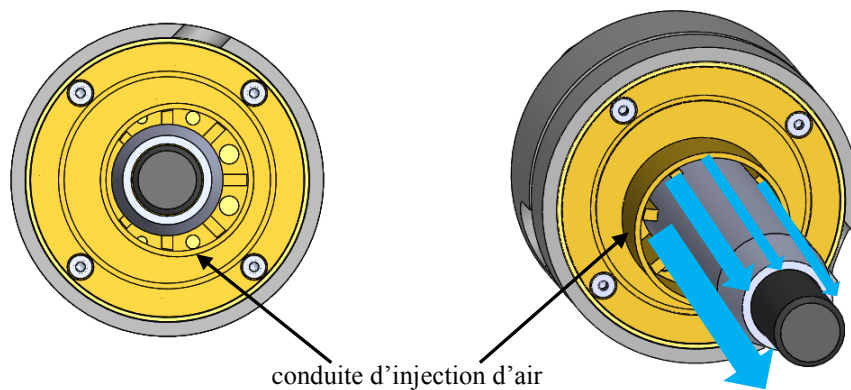


Figure 54 : Vue de face (gauche) et vue isométrique du montage excentrique de l'électrode dans la conduite d'injection d'air

#### 4.4. Solutions technologiques préconisées pour réduire les pertes thermiques

Pour améliorer le rendement thermique de la nouvelle torche, une pièce modulable en céramique moulée (oxyde de zirconium) protège les parois de la torche. Dans la configuration testée, elle a un diamètre intérieur de 15 cm. La céramique n'est pas collée aux parois, laissant ainsi un passage de quelques millimètres entre elle et la paroi intérieure en inox de la torche, ce qui permet l'écoulement d'un film d'air froid favorable pour limiter les pertes thermiques au travers des parois en acier. Cette céramique résiste thermiquement jusqu'à 2 480 K. Les parois en acier sont également refroidies par eau avec un débit de  $3 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Les propriétés de cette céramique sont résumées dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Caractéristiques de la céramique RESCOR 760 (FINAL Matériaux)

Propriétés	Unités	Valeurs
Formule chimique	--	ZrO2
Densité	kg.m <sup>-3</sup>	1 500
Résistance à la compression	MPa	27,6
Module de rupture	MPa	8,27
Dilatation thermique	E <sup>-6</sup> /K	10,1
Conductivité thermique	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	0,937
Température maximale	K	2 480

#### 4.5. Nouvelle conception de la torche plasma triphasée

Basée sur les éléments de conception détaillés précédemment, des itérations de conception et de simulation préliminaires ont été réalisées (Annexe 1). La géométrie finale est le sujet des travaux de modélisation numérique présentés dans le chapitre III. Les simulations ont permis de valider la tenue des matériaux et de vérifier l'efficacité des options de gainage. Par la suite, la conception fut finalisée en prenant en compte les contraintes de fabrication, de montage et de fonctionnement. Le résultat final, représenté Figure 55, a été monté sur le banc d'essai représenté par le P&D de la Figure 56.

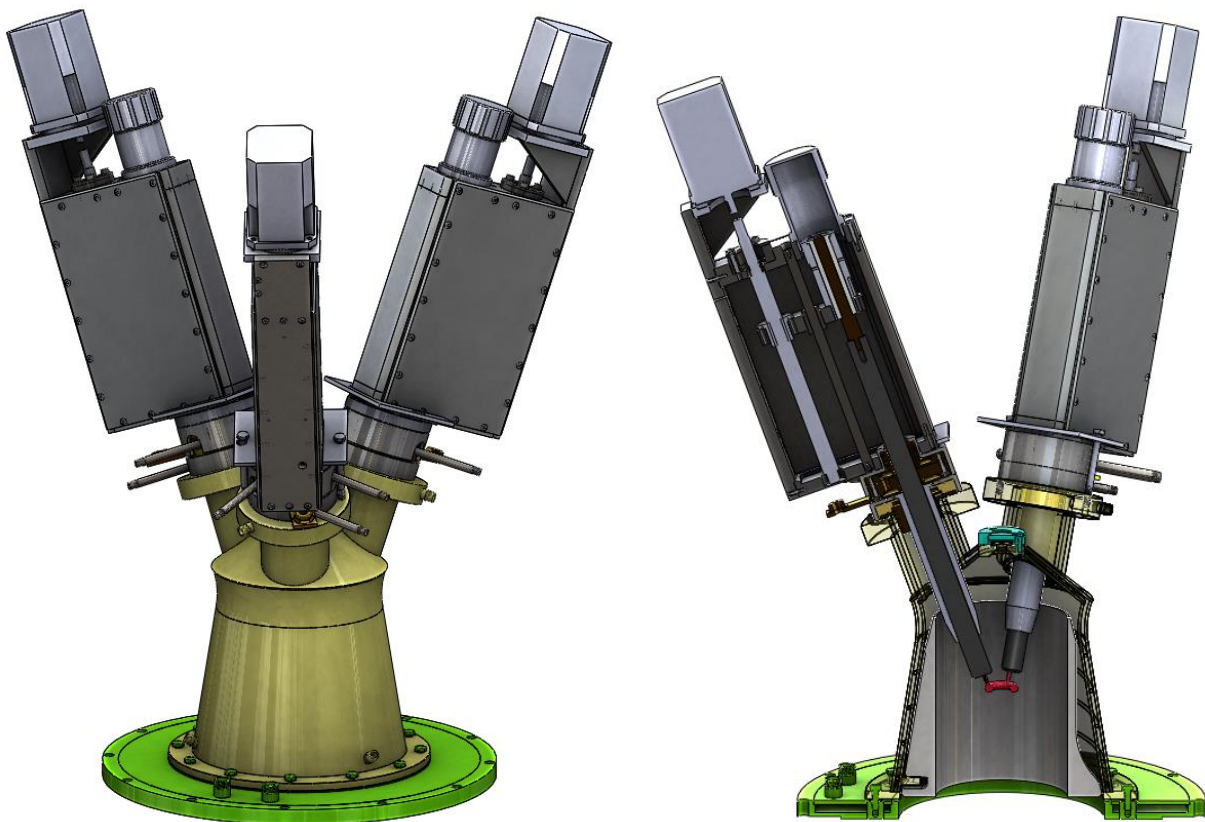


Figure 55 : Vue isométrique (gauche) et coupe transversale (droite) de la conception 3D de la nouvelle torche triphasée de 100 kW

## **5. Analyse du fonctionnement de la nouvelle torche plasma dans des conditions oxydantes**

Le banc expérimental initial a été modifié, comme le montre la Figure 56, pour intégrer la nouvelle torche. Le réacteur a été doté d'un hublot de visualisation de 1 mètre de longueur avec double parois en verre refroidi par eau. Il permet ainsi une visualisation des intérieurs de la torche et du réacteur en fonctionnement. Le dispositif de refroidissement par eau de l'ensemble du réacteur ne nous permettant pas de fonctionner à pleine charge lors de la combustion, des essais de combustion à faible débit de biomasse ont été réalisés avec pour objectif de décrire qualitativement le comportement de la nouvelle torche plasma lors de l'assistance à la combustion de biomasse.

### **5.1. Essais préliminaires sans combustion**

Les premiers essais réalisés sur la nouvelle torche ont été faits sans combustion de biomasse. Le but de ces essais était de valider le fonctionnement continu de la torche pour différentes conditions opératoires. Les données des essais sont résumées dans le Tableau 18. L'essai à l'argon est le premier essai réalisé pour tester la nouvelle torche. Pour des raisons de sécurité, l'argon et l'azote sont choisis comme gaz plasmagènes et le test a duré une dizaine de minutes. Cet essai a été réalisé sans l'isolation thermique en céramique afin de valider le circuit de refroidissement de la torche dans les conditions thermiques les plus sévères. Suite à ce premier test, la torche a été entièrement démontée et le diagnostic des différentes pièces n'a pas montré d'anomalies. Pour le deuxième essai, le débit de gaz plasma (azote) a été augmenté jusqu'à  $21 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Cet essai a permis de vérifier si le contrôle de l'écoulement du flux de gaz plasmagène - avec les différentes solutions technologiques apportées – permet de réduire l'impact des forces hydrodynamiques sur l'arc et d'éviter son extinction. L'excentricité de l'entrée principale du gaz plasma par rapport à l'axe des électrodes permet la déviation du flux de gaz en direction de la zone avale de la torche et la stabilité de l'arc plasma ne semble pas être très perturbée par l'augmentation du débit de gaz plasma. Pour le troisième essai, le gaz plasmagène utilisé est de l'air avec un gainage des électrodes à l'azote. La puissance a été augmentée progressivement avec le débit jusqu'à 54 kW pour un débit total de  $30 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  de gaz (air + azote). Le dernier essai est réalisé pour tester le fonctionnement à débit et à puissance constants sur une durée de 30 minutes afin de valider la fiabilité de la torche et de permettre des bilans thermiques sur l'ensemble du banc expérimental.

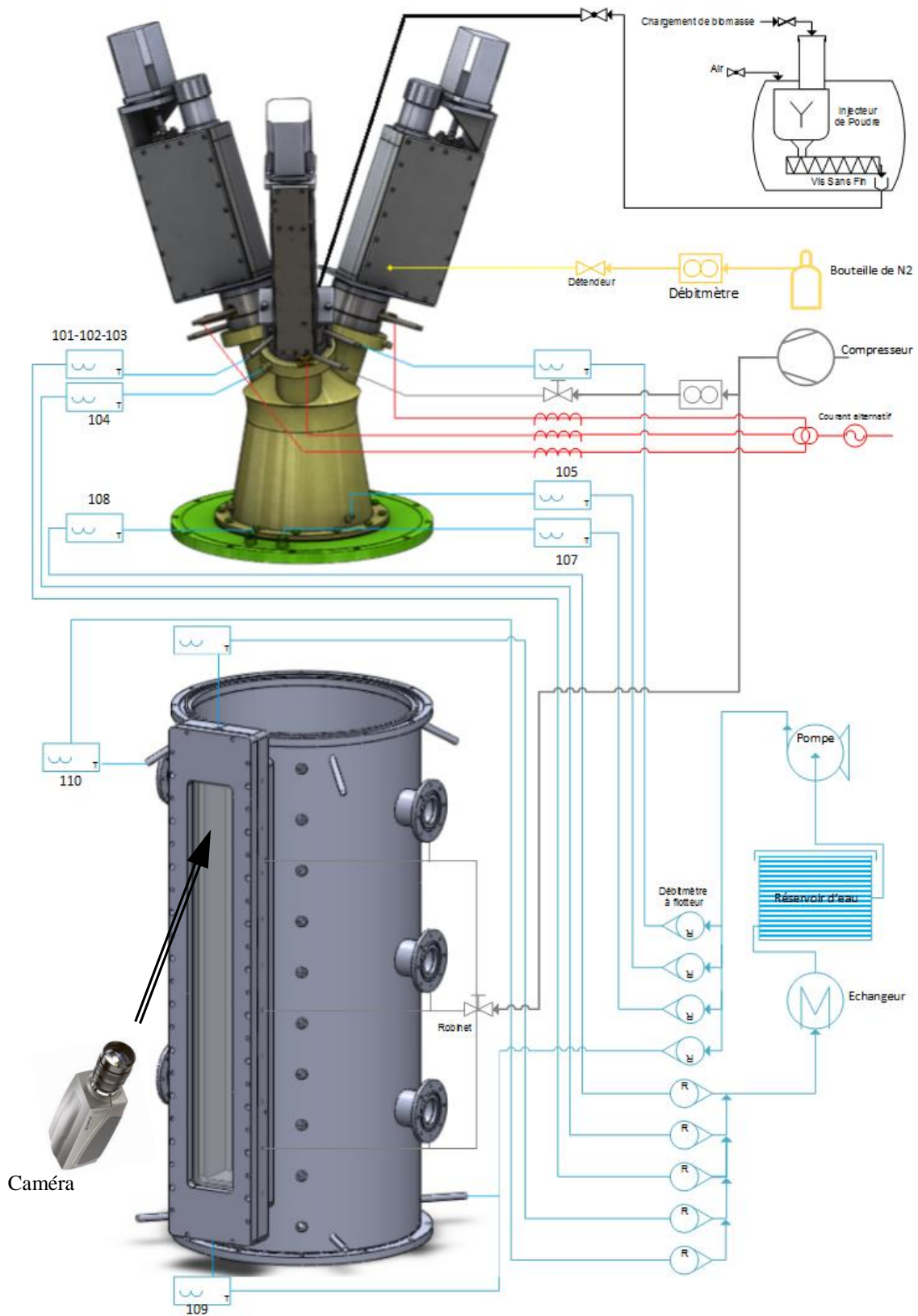


Figure 56 : P&D du banc expérimental

Tableau 18 : Conditions opératoires des essais de validation

N° de l'essai	Gaz plasmagènes	Débits des gaz (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )			Courant de consigne (A)	Puissance électrique moyenne (kW)
		Air	Azote	Argon		
1	Argon + Azote	0	3	5	200	25
2	Azote	0	21	0	200	18
3	Air + Azote	de 15 à 25	5	0	de 200 à 300	54
4	Air + Azote	22	5	0	300	57

### 5.1.1. Erosion des électrodes

#### 5.1.1.1. Erosion à l'azote

La mesure du taux d'érosion des électrodes à l'azote est réalisée durant l'essai numéro 2. Les résultats correspondants sont résumés dans le Tableau 19. Le taux d'érosion est légèrement plus faible que celui avec l'ancienne torche et est probablement dû à la densité de courant qui est plus faible avec un diamètre d'électrode de 25 mm. Dans la Figure 57, on voit les effets de l'arc sur l'extrémité de l'électrode. Quelques spots ainsi que des trajectoires de spot sont visibles sur la face transversale. Sur la vue de côté, on remarque que la face latérale de l'électrode n'est pas altérée et l'érosion se fait de façon homogène sur la face transversale. On remarque également un changement de couleur sur 4 cm de l'extrémité dû à la vaporisation de l'imprégnation sur cette partie de l'électrode dont la température est supérieure à 1 100 K.

Tableau 19: Bilan de l'essai à l'air avec la nouvelle torche

Paramètre	Unité	Valeurs
Débit d'azote	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	21
Diamètre des électrodes	mm	25
Longueur exposée	mm	80
Courant	A	200
Puissance	kW	18
Masse érodée par électrode	g.h <sup>-1</sup>	4,8
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	µg.c <sup>-1</sup>	6, 7
Taux d'érosion rapporté à la puissance	g.kWh <sup>-1</sup>	0,27
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	g.kWh <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	0,004



Figure 57 : Vue de face et vue de côté d'une électrode en graphite érodée après un fonctionnement à l'azote (nouvelle torche plasma)

#### 5.1.1.2. Erosion à l'air

La mesure du taux d'érosion à l'air est réalisée pendant l'essai numéro 4. Les résultats correspondants sont résumés dans le Tableau 20. Certes, la quantité de graphite érodée est 4,5 fois plus importante qu'avec l'ancienne torche, mais les conditions opératoires ne sont pas les mêmes : un débit d'air 11 fois plus important et une surface exposée 6 fois plus grande. Le taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface exposée est au contraire nettement inférieur avec une valeur de  $0,021 \text{ g.kWh}^{-1}.\text{cm}^{-2}$  pour la nouvelle torche contre  $0,095 \text{ g.kWh}^{-1}.\text{cm}^{-2}$  pour l'ancienne.

Tableau 20: Bilan de l'essai à l'air avec la nouvelle torche

Paramètre	Unité	Valeurs
Débit d'azote	$\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$	5
Débit d'air	$\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$	22
Diamètre des électrodes	mm	25
Longueur exposée	mm	80
Courant	A	300
Puissance	kW	57
Masse érodée par électrode	$\text{g.h}^{-1}$	81,2
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	$\mu\text{g.c}^{-1}$	75,1
Taux d'érosion rapporté à la puissance	$\text{g.kWh}^{-1}$	1,42
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	$\text{g.kWh}^{-1}.\text{cm}^{-2}$	0,021

Comme on peut l'observer dans la Figure 58, le fonctionnement à l'air est totalement différent de celui à l'azote : en plus de l'érosion thermomécanique, qui se limite à la face transversale de l'électrode, est associée une érosion chimique au niveau de la face latérale de la pointe de l'électrode. On observe que seulement 1 cm après la sortie de la céramique en nitrure de bore reste bien protégé par le gainage d'azote. L'action limitée du gainage à l'azote sera confirmée par la modélisation de la torche dont les résultats sont présentés dans le chapitre III.



Figure 58 : Vue de face et vue de côté d'une électrode en graphite érodée après un fonctionnement à l'air avec un gainage d'azote (nouvelle torche plasma).

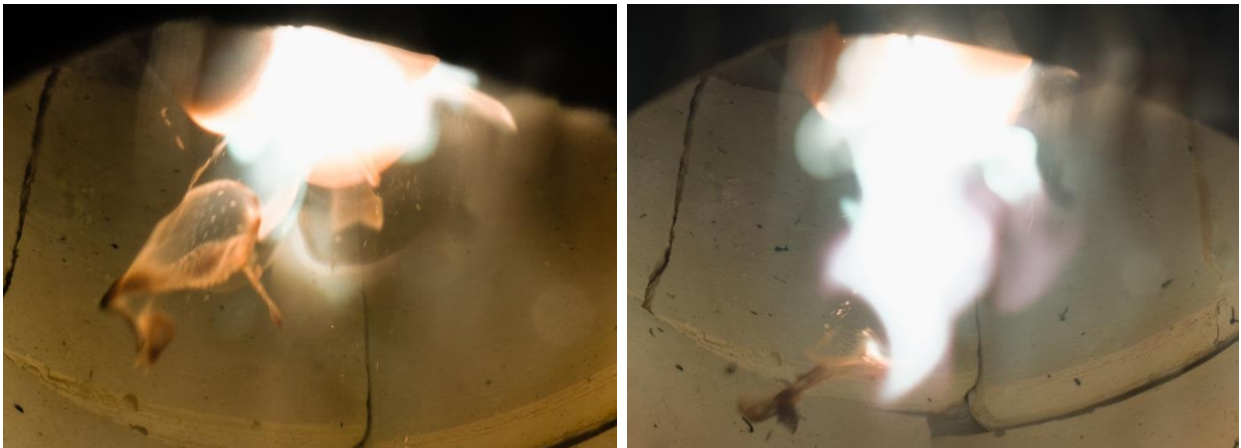


Figure 59 : Photos montrant un important arrachement thermomécanique de matière lors du démarrage du plasma (électrodes froides)

La Figure 59 illustre parfaitement le phénomène d'érosion par ablation. Les électrodes étant initialement froides, le claquage de l'arc donne lieu à un arrachement de matière par explosion. Les vidéos acquises par caméra rapide ont permis de visualiser ce phénomène d'ablation. La Figure 60 montre la trajectoire d'une particule de graphite provenant de l'ablation d'une électrode, très probablement au moment du réamorçage de l'arc. On note que la taille de la particule est conséquente, qu'elle rayonne fortement dans le visible et qu'elle suit une trajectoire rectiligne (qui peut être reliée à la direction des jets aux électrodes) jusqu'à percuter la paroi de la torche. La ligne reliant le point A au point B, représente la superposition de 300 images prises avec une vitesse d'acquisition de 15 000 images par seconde. La durée du déplacement est estimée à 20 ms. En ramenant la distance parcourue à l'échelle réelle, on trouve une vitesse de l'ordre de  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



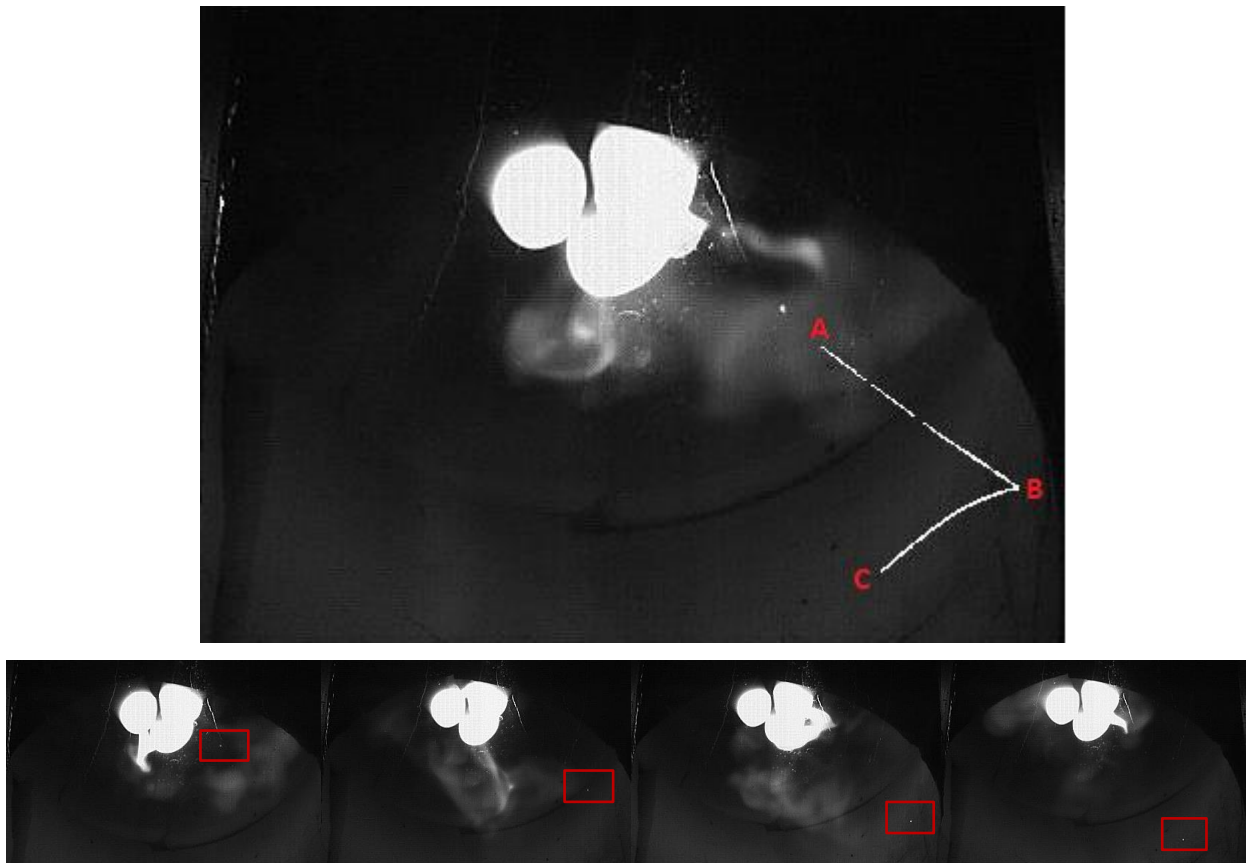


Figure 60 : Visualisation de l'érosion thermomécanique par superposition des positions d'une particule de graphite arrachée à l'une des électrodes (particule en mouvement entre A et C sur 35 ms)

### 5.1.2. Bilan énergétique

Les mesures de températures d'entrée et de sortie des circuits de refroidissement et des températures du gaz à la sortie du réacteur permettent de déterminer la répartition des pertes thermiques dans le banc expérimental. Comme le montre la Figure 61, les pertes thermiques dans la nouvelle torche ont été considérablement baissées. L'efficacité énergétique est maintenant supérieure à 85 % contre seulement 45 % avec l'ancienne torche. La Figure 62 montre le rôle important que joue la céramique dans la nouvelle conception pour baisser les pertes d'une valeur moyenne de 50 % à moins de 15 %. Vu l'inertie thermique de la céramique, l'équilibre thermique dans les circuits de refroidissement est atteint plus lentement et on estime la durée de stabilisation à 10 minutes. La nouvelle configuration permet d'atteindre des puissances plus élevées. La Figure 63 montre une amélioration du facteur de puissance qui est défini comme le ratio entre la puissance active et la puissance apparente. L'amélioration de ce paramètre montre que nous avons besoin d'une source électrique avec une puissance apparente moins élevée. Ceci permet de réduire les coûts d'investissement.

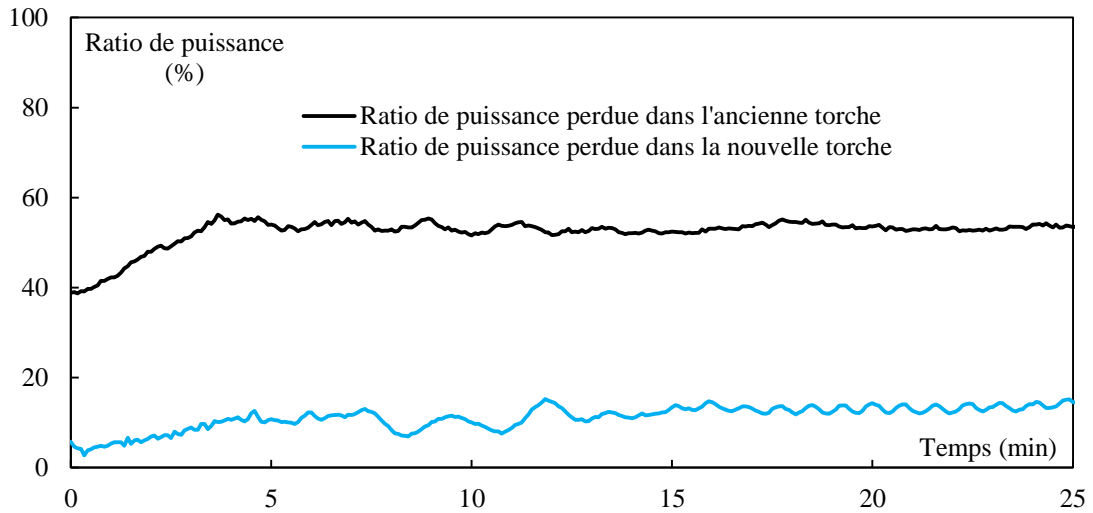


Figure 61 : Pertes thermiques dans les nouvelle et ancienne torches pour un fonctionnement à l'air

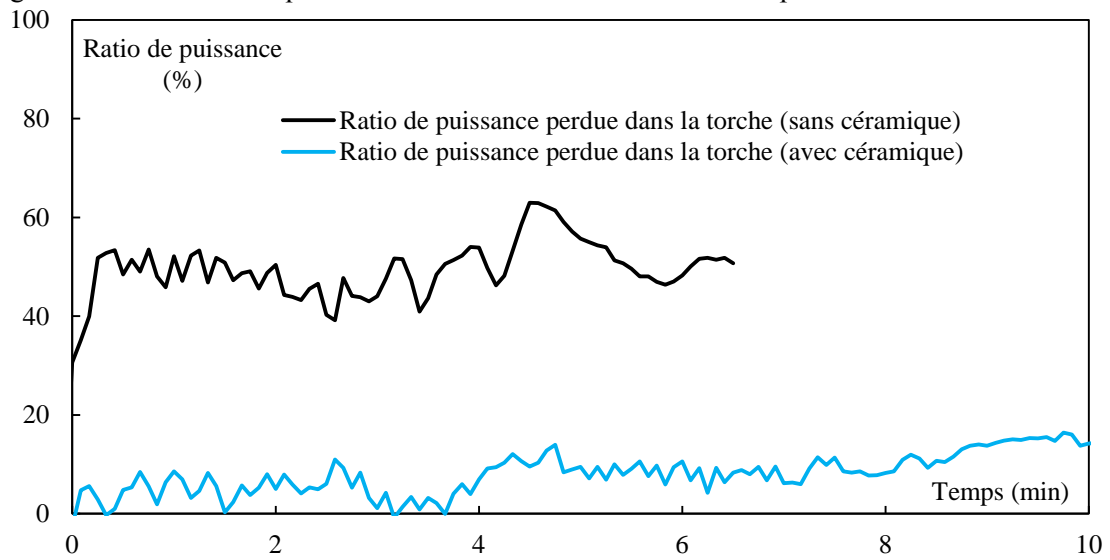


Figure 62 : Pertes thermiques dans la nouvelle torche sans et avec céramique

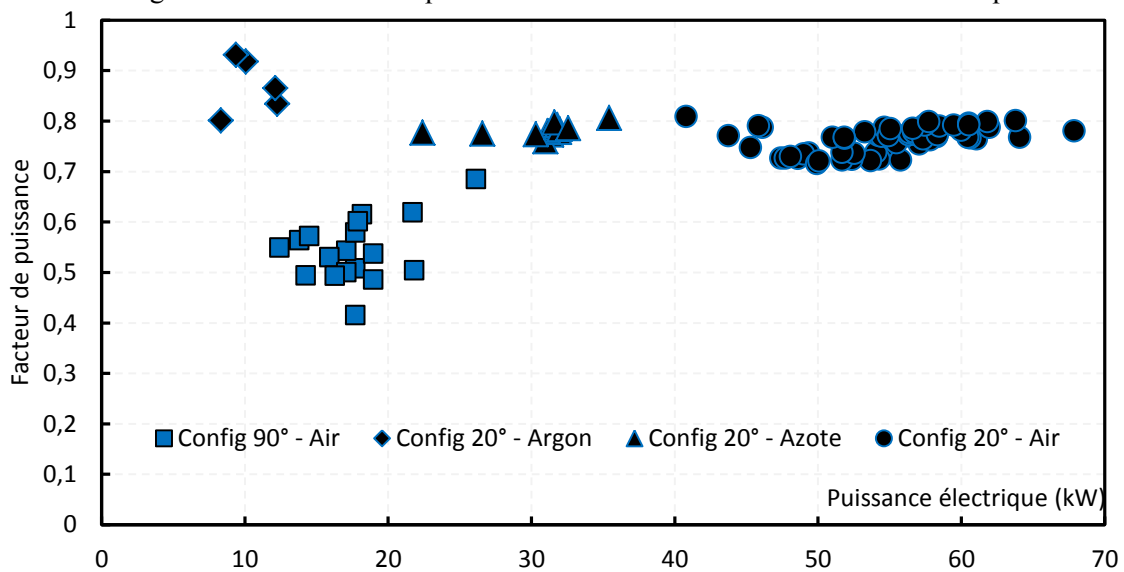


Figure 63 : Facteurs de puissance pour les deux torches en fonction de la nature du gaz plasma

## 5.2. Essais préliminaires de combustion assistée par plasma

Le dispositif de refroidissement par eau de l'ensemble du réacteur ne nous permettant pas de fonctionner à pleine charge lors de la combustion, des essais de combustion à faible débit de biomasse ont été réalisés avec pour objectif de décrire qualitativement le comportement de la nouvelle torche plasma lors de l'assistance à la combustion de biomasse. Deux essais ont été réalisés avec injection d'une biomasse (copeaux de bois) au cœur du plasma. Le premier a duré 20 minutes avec un débit de biomasse de  $1,1 \text{ kg.h}^{-1}$  et le deuxième a duré 45 minutes avec un débit allant de  $1,1 \text{ kg.h}^{-1}$  jusqu'à  $3,3 \text{ kg.h}^{-1}$ . Les conditions opératoires de ces deux essais sont résumées dans le Tableau 21.

Tableau 21: Conditions opératoires des expérimentations avec injection de biomasses solides

N° de l'essai	Gaz plasmagène	Débits			Courant de consigne (A)	Puissance électrique moyenne (kW)	Durée (min)
		Air ( $\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$ )	Azote ( $\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$ )	Biomasse ( $\text{kg.h}^{-1}$ )			
1	Air + Azote	22	5	1,1	300	53	20
	Air + Azote	22	5	1,1	300	53	
2	Air + Azote	28	5	2,2	300	57	45
	Air + Azote	28	5	3,3	300	59	

### 5.2.1. Erosion des électrodes

Les différentes valeurs des taux d'érosion en cours de combustion sont détaillées dans le Tableau 22. Comparé à l'essai sans combustion, le taux d'érosion en  $\text{g.h}^{-1}$  a augmenté. De plus, en augmentant le débit massique de biomasse, la masse érodée augmente aussi. Par contre, si on rapporte les taux d'érosion à la puissance et/ou à la surface exposée, on observe qu'il reste constant dans les 3 cas avec injection de biomasse. Sachant que ni le courant ni le facteur de puissance n'ont changé en cours de l'essai, la puissance a augmenté sous l'effet de la croissance de la tension. Ceci est probablement dû à l'augmentation de la résistivité du gaz plasmagène à cause du changement de la composition chimique du plasma avec la combustion. On en déduit que : (i) la croissance du débit de biomasse augmente la masse érodée mais pas à cause de l'effet thermique de la combustion et (ii) il y a une relation linéaire entre l'érosion et la puissance du plasma (au moins dans l'intervalle étudié). Nous n'avons pas pu identifier une relation semblable pendant les essais avec l'ancienne torche à cause de la faible variation de la puissance.

Tableau 22: Bilan du deuxième essai avec combustion

Paramètre	Unité	Valeurs		
Débit d'azote	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	5	5	5
Débit d'air	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	22	28	28
Débit de biomasse	kg.h <sup>-1</sup>	1,1	2,2	3,3
Diamètre des électrodes	mm	25	25	25
Longueur exposée	mm	80	80	80
Courant	A	300	300	300
Puissance	kW	53	57	59
Masse érodée par électrode	g.h <sup>-1</sup>	97,8	106,5	108,2
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	μg.c <sup>-1</sup>	90,6	98,6	100,2
Taux d'érosion rapporté à la puissance	g.kWh <sup>-1</sup>	1,85	1,87	1,83
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	g.kWh <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	0,027	0,027	0,027
Pertes thermiques à travers les parois de la torche	%	10	9	9

### 5.2.2. Bilan énergétique

Dans la Figure 64, les puissances thermiques ainsi que les puissances électriques de 2 essais à l'air (essais 3 et 4 du Tableau 18) et du premier essai de combustion (essai 1 du Tableau 21) sont tracées en fonction du temps. Les débits d'air et d'azote pour ces 3 essais sont les mêmes. Dans la Figure 65, on observe que le ratio des pertes thermiques dans la torche est d'avantage réduit durant la combustion. A l'équilibre thermique, ces pertes sont inférieures à 10 %. Dans la Figure 64, les essais à l'air sans injection de biomasse présentent relativement la même puissance électrique. On note que la puissance électrique dépasse toujours la puissance thermique totale. En effet, des pertes thermiques - comme les pertes dans le circuit de refroidissement du hublot ou le rayonnement qui passe au travers - ne sont pas comptabilisées dans le bilan thermique. La moyenne de ces pertes thermiques non comptabilisées est estimée à 5,15 kW. Cette moyenne est calculée pour les points de mesures prélevés après la stabilisation de la puissance, soit 10 minutes après le démarrage. Pour ces trois essais, on peut établir le bilan suivant :

$$P_{totale} = P_{thermique\ mesurée} + \Delta P_{pertes\ thermique} = P_{plasma} + P_{combustion} \quad (II.9)$$

On suppose que la combustion n'apporte pas de pertes thermiques supplémentaires. Pour l'essai de combustion, l'injection de la biomasse a commencé à la 11<sup>ème</sup> minute. L'écart entre la puissance électrique et la puissance thermique totale diminue et descend à -0,42 kW (moyenne sur 4 points de mesure). Ceci donne une puissance de combustion moyenne de 4,73 kW par kg.h<sup>-1</sup>.

La biomasse injectée est un mélange de copeaux de bois dont le PCI est égale à 18 317 kJ.kg<sup>-1</sup>. Pour un débit de 1,1 kg.h<sup>-1</sup> (+/- 0,025 kg.h<sup>-1</sup>), la puissance fournie par la combustion complète est égale à 5,48 kW. Ceci donne un rendement thermochimique de 84%. Ce calcul est basé sur un faible débit de combustible, on ne peut en aucun cas extrapoler pour estimer le rendement de combustion de la torche associée à un bruleur dans des conditions nominales de fonctionnement.

Bien que les conditions opératoires soient conservées, y compris la valeur de la consigne de courant et la distance inter-électrodes, nous observons une légère augmentation de la puissance électrique de l'arc lors de l'injection de la biomasse. Dans la Figure 65 est tracée l'évolution des puissances thermique et électrique pendant l'essai de combustion avec injection de 1,1 kg.h<sup>-1</sup> entre la 15<sup>ème</sup> et la 30<sup>ème</sup> minute, 2,2 kg.h<sup>-1</sup> jusqu'à la 45<sup>ème</sup> minute et 3,3 kg.h<sup>-1</sup> jusqu'à la 55<sup>ème</sup> minute. A 1,1 kg.h<sup>-1</sup>, les puissances thermique et électrique sont presque confondues comme dans la Figure 64. Ensuite, l'écart s'amplifie avec l'augmentation du débit de biomasse. Le même rendement thermochimique autour 84 % est déduit de ces courbes pour les trois débits de biomasse.

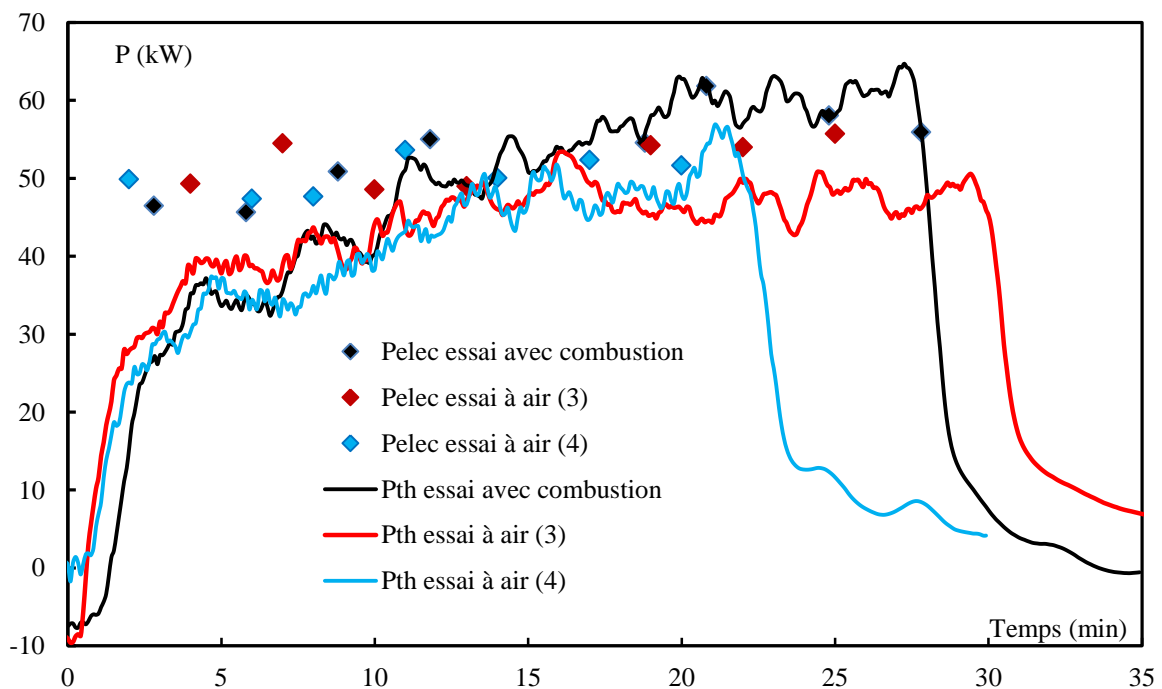


Figure 64 : Puissances thermiques et puissances électriques pour trois essais avec un mélange d'air et d'azote (Essais 3 et 4 du Tableau 18 et essai 1 du Tableau 21).

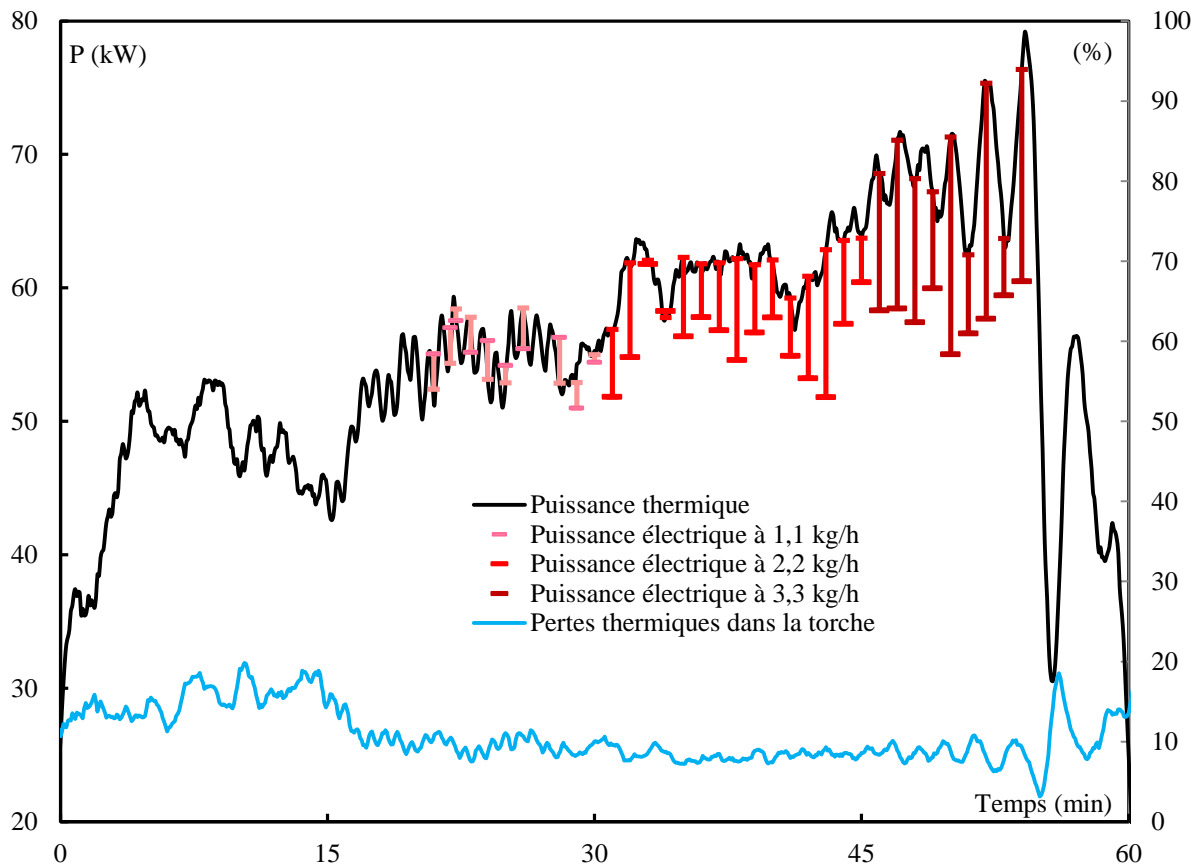


Figure 65 : Evolution de puissances thermique et électrique et des pertes thermiques dans la torche durant l'essai de combustion. Les intervalles colorés représentent l'écart entre la puissance thermique et la puissance électrique. Chaque couleur correspond à un débit de biomasse.

### 5.2.3. Analyse des gaz de combustion

L'analyse des gaz de combustion est réalisée en temps réel avec le détecteur NDIR. Comme le montre la Figure 66 et le Tableau 23, pendant les 5 premières minutes de l'essai 2, la fraction de  $\text{CO}_2$  croît progressivement jusqu'à atteindre une valeur stable de 0,35 vol%. En absence d'injection de biomasse, cette émission de  $\text{CO}_2$  provient de l'érosion des électrodes. En injectant du combustible, la valeur de  $\text{CO}_2$  croît de façon quasi-linéaire avec le débit de biomasse. La valeur moyenne par kg de bois injecté est égale à 0,37 %. Cette valeur étant proche de celle associée à l'érosion des électrodes, on peut en déduire un taux d'érosion. En effet, connaissant la concentration en atome de carbone de la biomasse testée (Tableau 2 du Chapitre I) et supposons que le rendement de la combustion est de 80 %, la concentration de 0,35 % correspond à une érosion de  $382,8 \text{ g.h}^{-1}$  pour les trois électrodes. Ceci revient à un taux d'érosion de  $127,6 \text{ g.h}^{-1}$ , ou un taux d'érosion rapporté au kWh de  $2,2 \text{ g.kWh}^{-1}$ . Cette

valeur est proche des taux d'érosion donnés dans le Tableau 22. La différence peut être due à une erreur d'étalonnage du NDIR.

On remarque également que la production d'hydrogène a la même tendance que le CO<sub>2</sub> mais avec une valeur plus faible. Le rapport entre les concentrations volumiques de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub> est de l'ordre de 15. L'hydrogène provient majoritairement de la biomasse injectée. Le profil de production de CO est semblable mais avec des valeurs relativement faibles. On note aussi un pic de production de CO d'une valeur de 0,044 % au moment de l'arrêt du plasma qui correspond à une phase de gazéification lors du refroidissement de la torche plasma.

Tableau 23 : Composition des gaz de sortie par NDIR (les valeurs sont en pourcentage par rapport au débit total à la sortie qui contient aussi les gaz de refroidissement du filtre. Le débit totale est approximativement égal à 218 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>).

		Sans	Débit de biomasse			Moyenne <sup>i</sup> par kg
		combustion	1,1 kg.h <sup>-1</sup>	2,2 kg.h <sup>-1</sup>	3,3 kg.h <sup>-1</sup>	
NDIR	CO <sub>2</sub>	0,356	0,766	1,18	1,58	0,372
	CO	--	--	0,013	0,013	0,013
	H <sub>2</sub>	0,005	0,023	0,061	0,08	0,024

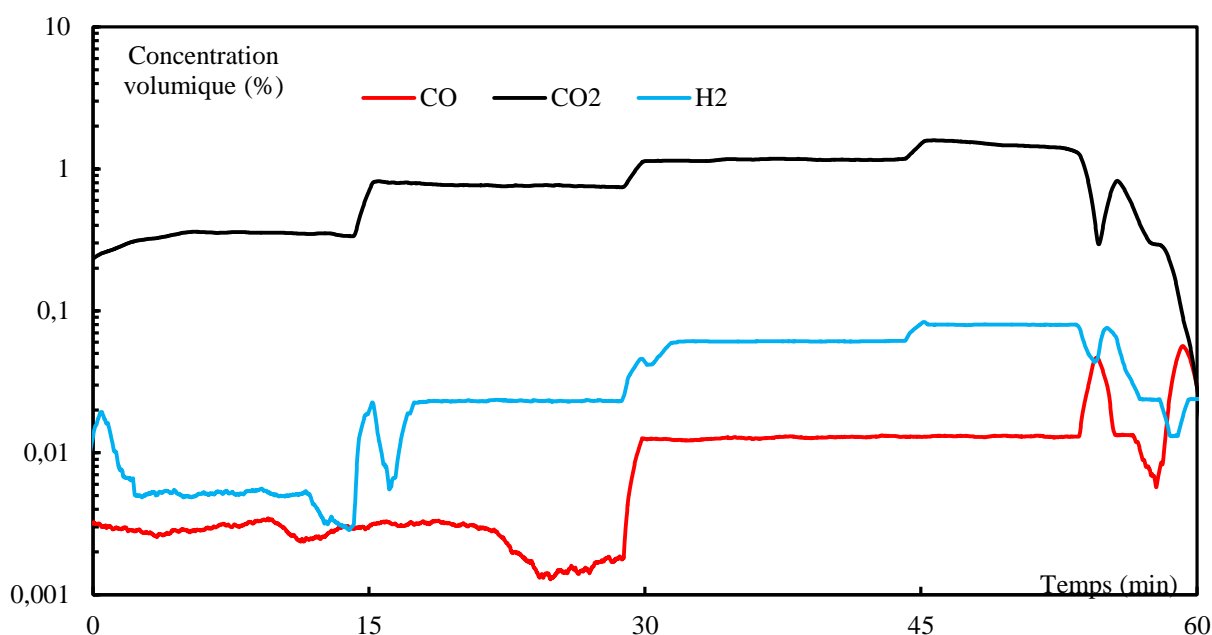


Figure 66 : Evolution des concentrations volumiques (%) du CO, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub> dans les gaz à la sortie du filtre pendant le deuxième essai de combustion

<sup>i</sup> La moyenne par kg de combustible est calculée après soustraction de la fraction de gaz mesurée pendant la phase de fonctionnement sans combustion.

#### 5.2.4. Analyse par imagerie de la combustion de la biomasse

En passant par la zone de décharge, une grande partie de la biomasse injectée réagit avec l'air en initiant leur combustion avant de quitter le champ de visualisation de la caméra rapide (Figure 67). On estime la vitesse des particules de biomasse à  $20 \text{ m.s}^{-1}$ . Sachant que la distance séparant la zone de décharge de la section de sortie est égale à 15 cm, le temps de séjour d'une particule de biomasse dans la torche est de l'ordre de 7,5 ms. Dans un brûleur, nous aurons des temps de séjours plus importants et donc une meilleure combustion.

Visuellement, l'arrivée de la biomasse dans la zone plasma est notée par un changement instantané de sa couleur passant du violet d'un plasma d'air vers la couleur orangée d'une flamme de combustion. La Figure 68 montre cette différence de couleur. Il est initialement transparent et devient partiellement opaque. En comparant les deux photos avec combustion, cette opacité augmente avec le débit de biomasse. La température devient alors de plus en plus élevée et ceci peut expliquer l'accroissement de l'érosion avec l'augmentation de la quantité de biomasse injectée. Les vidéos en couleur de la flamme de combustion montrent des foyers de combustion autour des particules de biomasse qui se déplacent vers la zone réactive (enceinte de combustion). Une autre observation qu'on peut tirer de la Figure 68 est l'allongement important de l'arc dans cette configuration des électrodes. Même avec la quantité très faible de biomasse injectée, la flamme est intense et se projette à plus de 50 cm de la sortie de la torche.

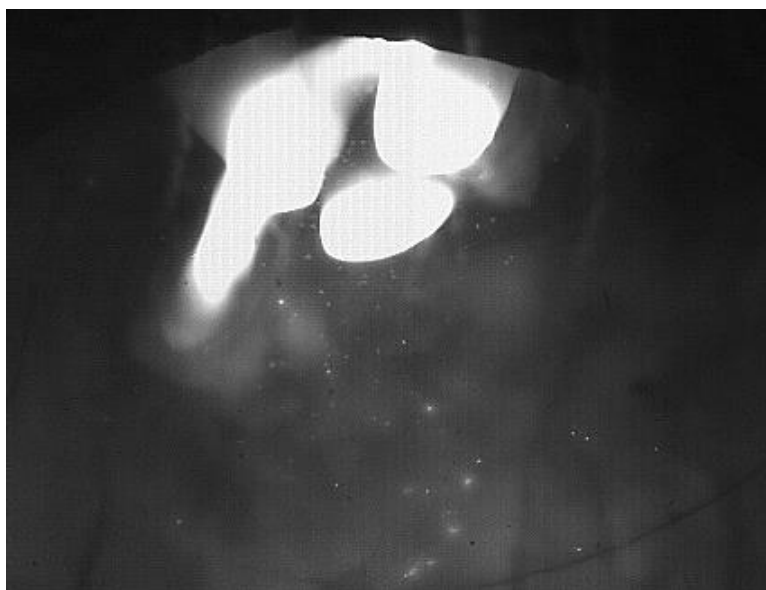


Figure 67 : Photographie de l'intérieur de la torche acquise par caméra rapide pendant l'injection de la biomasse avec un débit de  $1,1 \text{ kg.h}^{-1}$



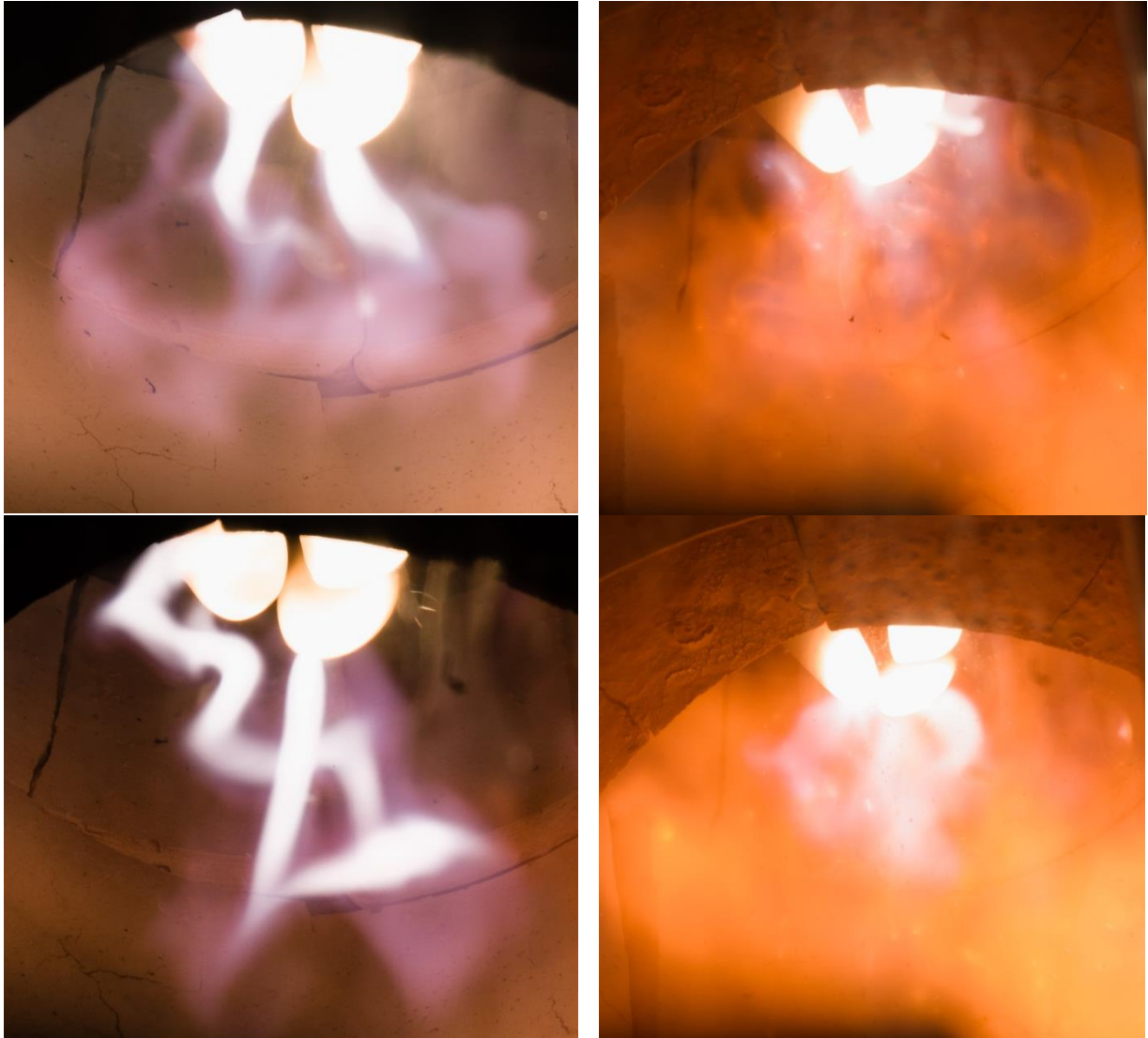


Figure 68 : Photographies de la zone d'arc dans un plasma d'air sans combustion (gauche) et avec combustion de  $1,1 \text{ kg.h}^{-1}$  (en haut à droite) et de  $2,2 \text{ kg.h}^{-1}$  (en bas à droite)

## 6. Conclusion

Les objectifs des travaux présentés dans ce chapitre consistaient à développer une nouvelle torche plasma triphasée qui réponde aux contraintes liées au fonctionnement à l'air à 100 kW: (i) minimiser l'érosion des électrodes en graphite tout en garantissant un fonctionnement à fort débit d'air et (ii) minimiser les pertes thermiques et contrôler l'écoulement plasma dans la torche pour une puissance de 100 kW.

Dans un premier temps, des essais préliminaires ont été réalisés sur la configuration initiale de la torche triphasée (électrodes coplanaires). Lors de cette étape, les taux d'érosion des électrodes en graphite ont été évalués pour différentes conditions opératoires: la nature et le débit du gaz plasmagène, les concentrations de carbone et d'oxygène au voisinage des parties chaudes des électrodes en injectant des particules de noir de carbone dans le plasma d'air. En parallèle de ces essais a été réalisée une analyse du mouvement des arcs par caméra rapide.

- *Nature du gaz plasmagène et des concentrations des espèces chimiques dans le plasma*

Dans le Tableau 24 sont résumés les taux d'érosion obtenus avec les différents gaz plasmagènes testés et avec injection de particules de noir de carbone.

Tableau 24: Taux d'érosion avec les différents gaz plasmagènes testés. Tous les essais réalisés contiennent une injection d'azote pour le gainage des électrodes avec un débit total de  $3 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

Gaz plasmagènes	Unités				Valeurs			
	--	N2	CO	Air	Air avec injection de noir de carbone ; $n_C/n_{O_2} =$			
					2,1	2,5	3	3,75
Masse érodée par électrode	$\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$	5,1	2,7	18,5	17,1	29,2	30,0	37,3
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	$\mu\text{g} \cdot \text{c}^{-1}$	7,08	3,78	25,6	23,7	40,6	41,7	51,8
Taux d'érosion rapporté à la puissance	$\text{g} \cdot \text{kWh}^{-1}$	0,283	0,17	1,06	0,9	1,62	1,67	1,87
Taux d'érosion rapporté à la puissance et à la surface	$\text{g} \cdot \text{kWh}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	0,026	0,015	0,095	0,081	0,147	0,151	0,169

Le taux le plus bas est obtenu pour l'injection de monoxyde de carbone avec une valeur de  $0,015 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Bien que le taux d'érosion à l'azote soit presque le double de celui au monoxyde de carbone, ce taux est relativement faible et l'azote peut toujours être considéré

comme gaz de gainage pour les électrodes. Parmi les solutions envisagées pour le gaz de gainage, le méthane semble une alternative possible à l'azote. Nous n'avons pas pu tester cette solution qui nécessite des dispositifs de sécurité que nous n'avons pas au laboratoire. Toutefois, nous avons fait une étude théorique du gainage des électrodes par du méthane dont les principaux résultats seront présentés dans le Chapitre III. En injectant de l'air, le taux d'érosion augmente jusqu'à  $0,095 \text{ g.kWh}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ . L'injection de noir de carbone n'a pas permis de réduire le taux d'érosion des électrodes comme souhaité. Les résultats obtenus montrent que les conditions d'écoulement en amont de la zone de décharge ne sont pas favorables à l'oxydation partielle du noir de carbone pour la création d'une atmosphère riche en monoxyde de carbone autour des électrodes. Ceci est certainement dû à un passage trop rapide des particules de carbone dans le plasma qui jouent le rôle d'un vecteur d'énergie en l'absorbant dans la zone de décharge pour l'émettre par rayonnement plus loin. Le temps de séjour des particules injectées et les échanges thermiques entre ces particules et le gaz plasmagène sont des paramètres difficiles à maîtriser. De plus, les particules de carbone qui n'ont pas le temps de réagir chimiquement avec l'air forment un nuage opaque qui bloque le rayonnement du plasma et des parois en partie haute, ce qui change totalement le champ de température dans la torche et augmente les pertes aux parois.

- *Débit du gaz plasmagène*

Trois essais à l'air ont été réalisés pour étudier l'influence de la vitesse du gaz sur le taux d'érosion et sur les bilans thermiques. Dans le Tableau 25 sont résumés les résultats obtenus avec les différents débits de gaz plasmagène testés.

On note qu'une vitesse d'air plus importante au voisinage des électrodes augmente le taux d'érosion. Pour un débit d'air de l'ordre de plusieurs dizaines de  $\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$ , comme celui dont on a besoin pour la combustion dans le premier étage d'un électrobrûleur, il est nécessaire de contrôler l'aérodynamique autour des électrodes de façon à baisser la vitesse de l'air au voisinage des surfaces exposées du graphite sans réduire le débit traversant l'arc et tout en maintenant la stabilité de l'arc.

Tableau 25: Paramètres des essais de quantification de l'érosion en fonction du débit d'air et de la géométrie interne de la zone de décharge

Paramètres	Unités	Valeurs		
Débit d'azote (gainage des électrodes)	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	3	3	3
Débit d'air	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	2	4	2
Diamètre de la zone plasma	cm	6,2	10	10
Vitesse moyenne du gaz dans la zone de décharge	m.s <sup>-1</sup>	0,51	0,27	0,2
Diamètre des électrodes	mm	18	18	18
Longueur exposée	mm	15	15	15
Courant	A	200	210	200
Puissance	kW	17,5	15	16,5
Masse érodée par électrode	g.h <sup>-1</sup>	18,5	10,8	6,8
Taux d'érosion rapporté à la charge électrique	µg.c <sup>-1</sup>	25,6	14,3	9,44
Taux d'érosion rapporté à la puissance	g.kWh <sup>-1</sup>	1,06	0,72	0,41
Taux d'érosion rapporté à la puissance à la surface	g.kWh <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	0,095	0,065	0,037
Pertes thermiques au travers des parois de la torche	%	53	64	67

A l'issue de ces essais, des bilans thermiques ont permis de déterminer la répartition des pertes thermiques sur la technologie actuelle de la torche et son rendement énergétique. Globalement, les pertes thermiques sont supérieures à 45 % de la puissance totale et ceci pour des puissances allant de 15 à 20 kW.

Comme on peut le voir dans le Tableau 25, les variations du débit d'air et de la section de passage montrent que lorsque la vitesse moyenne du gaz plasmagène baisse, les pertes thermiques croissent et peuvent atteindre 67 % de la puissance totale. Or, avec la configuration actuelle de la torche plasma, le débit d'air total ne peut pas dépasser 10 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> car avec un débit plus élevé, la décharge devient difficile à stabiliser et l'arc s'éteint régulièrement.

En parallèle de cette étude paramétrique, nous avons analysé le mouvement des arcs par caméra rapide. Cette étude nous a permis de déterminer un diamètre moyen de l'arc situé autour de 4 mm. Nous nous baserons sur cette valeur du diamètre pour proposer un modèle simplifié de la colonne d'arc dans le chapitre III.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, en se basant sur l'étude précédente, nous avons détaillé les principales améliorations technologiques apportées dans la conception de la nouvelle torche triphasée afin de permettre son fonctionnement à l'air à 100 kW. Les solutions technologiques préconisées pour réduire l'érosion des électrodes sont

principalement : un gainage des électrodes par un gaz neutre ou réducteur, une protection chimique et/ou physique des électrodes, une augmentation du diamètre des électrodes, un contrôle de l'écoulement du flux d'air autour des électrodes ... Les solutions technologiques préconisées pour augmenter la puissance de la torche et réduire les pertes thermiques sont principalement : la modification de l'angle des électrodes en passant d'une configuration coplanaire à une configuration angulaire de 20°, la mise en place d'un isolant thermique dans la torche et la conception d'un design approprié pour contrôler l'écoulement du gaz plasma dans la torche.

Dans la dernière partie, des expérimentations réalisées avec la nouvelle torche ont permis dans un premier temps, de vérifier le bon fonctionnement des différents composants de la torche et dans un second temps, de la caractériser en fonction des conditions opératoires. Dans le Tableau 26 sont résumés les principaux résultats obtenus entre les deux designs de torche triphasée.

Tableau 26 : Comparaison ente les principales caractéristiques de l'ancienne torche coplanaire et la nouvelle torche à électrodes inclinées

Caractéristiques	Unités	Valeurs	
		Ancienne torche	Nouvelle torche (conditions testées/valeurs maximales fixées)*
Diamètre des électrodes	mm	18	25
Tension	V	90	140 / 180
Courant	A	200	300 / 360
Cos $\varphi$	--	~0,55	0,8 / 0,9
Puissance plasma maximale	kW	30	60 kW / 100 kW
Débit maximal	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	10	30 / 65
	g.h <sup>-1</sup>	18,5	81,2
Erosion des électrodes	μg.c <sup>-1</sup>	25,6	75,1
	g.kWh <sup>-1</sup>	1,06	1,42
	g.kWh <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	0,095	0,021
Pertes thermiques	%	> 45	< 15 / 5

\* Valeurs maximales fixées lors de la phase de conception de la nouvelle torche

Les principaux résultats sont :

- La configuration avec les électrodes inclinées de 20° par rapport à l'axe de la torche permet d'atteindre des puissances plus importantes. Dans les cas testés, la puissance a été doublée, passant de 30 kW pour l'ancienne conception à 60 kW pour la nouvelle. Ce doublement de la puissance est le résultat de l'évolution de plusieurs paramètres qui sont,

d'une part des paramètres de réglage de la source électrique ou de la torche plasma tels que le courant d'arc et le débit de gaz plasma, et d'autre part, directement fonction de la configuration des électrodes tels que la tension d'arc et le facteur de puissance. L'objectif de 100 kW n'a pas encore été testé, principalement dû à la limitation du système de refroidissement actuel. Toutefois, les réglages que sont le courant et le débit d'air devraient nous permettre, dans les conditions nominales fixées (360 A et 65 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>) le fonctionnement de la torche à 100 kW.

- L'étude de l'érosion des électrodes montre que la masse de graphite érodée des électrodes a augmenté de 18,5 g.h<sup>-1</sup> à 81,1 g.h<sup>-1</sup> mais pour des conditions opératoires plus sévères (courant de 300 A et débit d'air de 30 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>). Cependant, la prise en compte de la puissance électrique, de la surface exposée des électrodes et du débit d'air montre que le taux d'érosion, pondéré par ces paramètres opératoires, est plus faible pour la nouvelle torche. Il est de 0,021 g.kWh<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup> pour la nouvelle torche contre 0,095 g.kWh<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup> pour la torche coplanaire. L'étude faite sur l'érosion des électrodes dans le cas de la nouvelle torche montre que l'érosion principale provient de la réaction d'oxydation sur la face latérale de l'électrode qui n'est pas couverte par la protection en nitrure de bore et le gainage à l'azote. L'optimisation de la conception de la torche pour minimiser l'érosion des électrodes passera donc par une modification de cette partie afin de prolonger au maximum la protection des électrodes par un écran physique et par un gainage à l'azote avec l'isolant en nitrure de bore et aussi, par la maîtrise de l'écoulement d'air autour de la zone plasma. Cette optimisation devrait faire l'objet d'une étude ultérieure via le modèle numérique présenté dans le chapitre III.
- Les pertes thermiques ont été réduites de 55 % à moins de 15 %. Cette forte diminution des pertes est principalement due à l'intégration dans la torche d'un isolant thermique adapté aux nouvelles conditions opératoires et aussi, à l'augmentation du débit de gaz plasma, et par conséquent des vitesses du gaz dans la torche, ce qui permet de transférer le plus rapidement possible le flux d'énergie plasma dans la zone de combustion du futur brûleur sur lequel la torche sera intégrée. L'optimisation de l'efficacité énergétique de la torche passera aussi par un changement de la géométrie et des caractéristiques thermiques de cet isolant (diamètre intérieur, épaisseur, nature, ...). Cette optimisation devrait aussi faire l'objet d'une étude ultérieure via le modèle numérique présenté dans le chapitre III.

Les expérimentations réalisées avec injection de la biomasse (jusqu'à  $3,3 \text{ kg.h}^{-1}$ ) ont permis de caractériser qualitativement la combustion assistée par plasma. Les résultats montrent que nous avons une combustion quasi complète de la biomasse lors de son passage dans le plasma et que cette injection ne perturbe pas le fonctionnement de la torche, ni n'augmente l'érosion des électrodes pondérée par la puissance électrique. Au contraire, l'injection de biomasse a tendance à stabiliser le plasma ce qui permet d'écarter d'avantage les électrodes afin d'augmenter la tension d'arc et par conséquent, la puissance électrique du plasma. De plus, la combustion de la biomasse fait un apport énergétique de l'ordre de  $5 \text{ kW/kg}$ , ce qui nous permet dans notre cas, d'avoir en sortie de la torche une puissance thermique autour de  $80 \text{ kW}$  nous rapprochant ainsi de l'objectif des  $100 \text{ kW}$  initialement fixé. L'analyse par imagerie rapide nous a permis, via le suivi des particules de biomasse injectées, de visualiser les lignes de courant dans la torche. Ce sont des informations importantes sur l'écoulement dans la torche qui pourront être corrélées avec les simulations obtenues dans le chapitre III.

