

Chapitre I

Etat de l'art

1. La biomasse comme source d'énergie du futur

1.1. Contexte Mondial

La science montre que l'activité humaine est la principale responsable du réchauffement climatique observé depuis le 20^e siècle à cause d'une augmentation sans précédent de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère [1]. Ceci a eu pour conséquence un nombre de changements sans équivalents depuis des millénaires à l'instar de la diminution de la couverture neigeuse, principalement sur les pôles, l'augmentation des températures des océans et de l'atmosphère et l'élévation du niveau des mers et des océans. Le forçage radiatif total de notre système climatique, défini comme le bilan des flux d'énergie reçus et émis, est positif et la grande contribution de l'absorption nette d'énergie provient de l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère. Plusieurs scénarios prévisionnels dits scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) ont été développés et selon la majorité de ces RCP, d'ici la fin du 21^{ème} siècle, le réchauffement climatique aura comme conséquence une augmentation de la température à la surface du globe, probablement, supérieure à 1,5 °C, par rapport à la période allant de 1850 à 1900. L'étendue et l'épaisseur des manteaux neigeux vont continuer à baisser, de même que la banquise arctique. Les niveaux moyens des mers grimperont encore pour atteindre 1 m de plus à l'horizon de 2100 [1].

Le changement climatique est un challenge de long terme, mais qui nécessite des mesures d'urgence. La concentration de 450 ppm de CO₂ dans l'atmosphère est considérée comme le seuil à ne pas dépasser avant que le réchauffement climatique ne devienne irréversible. Ceci correspond à une augmentation de la température moyenne de 2 °C par rapport à la période préindustrielle. Seulement un seul scénario RCP permet d'atteindre cet objectif à l'horizon de 2100 [2]. Ce scénario repose sur la disponibilité et la large utilisation des technologies

utilisant des bio-fuels avec la séquestration et le stockage du CO₂ accompagné d'un grand effort d'afforestation, durant la seconde moitié du siècle.

Le transfert vers une économie à faible émission de carbone implique de nouveaux modèles d'investissements. Certaines projections financières estiment l'investissement annuel dans le secteur de l'énergie à 1 200 milliards de dollars. Les scénarios d'atténuation, ciblant une concentration de CO₂ entre 430 et 530 ppm d'ici la fin du 21^{ème} siècle, montrent des changements substantiels de l'investissement annuel dans ce secteur entre les années 2010 et 2029 : les investissements dans les centrales énergétiques à combustibles fossiles baisseront de 30 milliards de dollars contre une augmentation de 147 milliards de dollars dans des technologies à faible émission, à savoir les centrales nucléaires et les centrales thermiques à biomasse ou à séquestration et stockage de CO₂ ainsi que les diverses formes d'énergies renouvelables [3].

Tableau 1: Comparaison des coûts de production de l'électricité en 2005 et en 2030 et des émissions de gaz à effet de serre selon l'énergie primaire utilisée [3].

Sources d'énergie	Technologie considérée pour l'estimation des coûts	2005	Coût projeté 2030	Émissions de GHS (Kg eq CO ₂ /MWh)
		Coût (€/MWh)	(€/MWh avec 20-30 €/tCO ₂)	
<i>Source : IEA</i>				
Gaz naturel	Open cycle gas turbine	45 – 70	55 – 85	440
	CCGT (Combined Cycle Gas Turbine) turbine à gaz cycle combiné	35 – 45	40 – 55	400
Pétrole	Moteur diesel	70 – 80	80 – 95	550
Charbon	PF (Pulverised Fuel with flue gas desulphurisation)	30 - 40	45 – 60	800
	CFBC (Circulating fluidized bed combustion)	35 - 45	50 – 65	800
	IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)	40 - 50	55 – 70	750
Nucléaire	Réacteur à eau légère	40 - 45	40 – 45	15
Biomasse	Production à partir de biomasse	25 - 85	25 – 75	30
Éolien	On shore	35 - 175	28 – 170	30
		35 – 110	28 – 80	
	Off shore	50 - 170	50 – 150	10
	60 – 150	40 – 120		
Hydraulique	Grand	25 - 95	25 – 90	20
	Petit (<10MW)	45 - 90	40 – 80	5
Solaire	Photovoltaïque	140 - 430	55 -260	100

La consommation d'énergie primaire à l'horizon 2050 pourrait monter à 22,6 Gtep, soit trois fois la consommation de l'année 2000 (7,38 Gtep) et la part du secteur de production d'électricité passerait de 34 % à 42,5 %. Selon le scénario B1 du GIEC et le scénario IMACLIM du CIRED, bien que les pourcentages de charbon et de pétrole vont probablement diminuer, la part de la biomasse dans le mix énergétique à l'horizon 2050 serait entre 9,7 % et 14,4 % (entre 2,2 et 3,25 Gtep). Dans les centrales thermiques traditionnelles où actuellement le charbon joue un rôle primordial, la diminution de la part de cette ressource primaire pour répondre aux urgences environnementales, passera inévitablement par un rôle plus important des biomasses. D'ailleurs, comme le montre le Tableau 1, les intérêts économique et environnemental de cette ressource renouvelable primaire sont déjà démontrés : (i) un prix au MWh fortement concurrentiel par rapport aux autres énergies renouvelables (éolien, hydraulique ou solaire) et aux énergies fossiles, (ii) un coût d'investissement d'ici 2030 parmi les plus faibles du marché et (iii) des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 30 kg équivalent de CO₂ par MWh (soit environ 10 % des émissions dues aux énergies fossiles et du même ordre de grandeur que celles des autres énergies renouvelables).

1.2. Les différentes formes de biomasse

La biomasse peut être considérée comme une forme de stockage de l'énergie solaire collectée par les plantes durant la photosynthèse où le dioxyde de carbone est capturé et converti en matière végétale. A la source, la biomasse est une énergie propre. L'amalgame entre énergie propre et énergie renouvelable est fréquent. Dans certains cas, l'utilisation de la biomasse peut engendrer des déséquilibres environnementaux. Pour cette raison, il est important de préciser que la biomasse ne peut être considérée comme une énergie propre et renouvelable que si elle est soutenue par une politique écologique raisonnée.

Elle se présente sous différentes formes : les résidus de récoltes, les déchets de l'industrie du bois et de l'industrie de l'alimentaire (bagasse), les déchets animaliers, les boues des stations d'épuration, les déchets municipaux (déchets organiques), les végétations plantées pour le secteur de l'énergie et les taillis à courte rotation ... Le traitement de certains types de biomasse permet de les convertir sous d'autres formes plus facile à valoriser énergétiquement comme le biocarburant et le biogaz. Actuellement, la biomasse représente 14 % de l'énergie primaire dans le monde et est considérée comme la quatrième source d'énergie [4]. En France, 5 % de l'énergie primaire consommée provient de la biomasse et elle est répartie en

trois catégories selon son état: le biogaz, le biocarburant et la biomasse solide utilisée directement comme combustible. La France, grand pays forestier, est le premier pays européen dans la consommation de cette forme d'énergie (principalement du bois) avec 10 Mtep en 2011 [5].

1.2.1. Le biogaz

Le biogaz est le produit de la fermentation spontanée ou stimulée de matières organiques par des bactéries en l'absence d'oxygène. Il est principalement constitué de méthane (deux tiers environ), de dioxyde de carbone voire d'azote. La composition des biogaz varient selon leur origine. Ils sont généralement produits dans des méthaniseurs ou dans des *landfills* ce qui change leurs compositions. Dans un méthaniseur, les concentrations de méthane et de dioxyde de carbone sont respectivement de l'ordre de 65 % et 35 % tandis que dans les *landfills*, ces concentrations sont de l'ordre de 52 % et 28 % avec 20 % d'azote. Le biogaz sert principalement comme combustible pour la production d'électricité ou de chaleur. Sa production en France reste négligeable avec seulement 0,2 Mtep en 2004 contre 1,5 Mtep pour l'Allemagne ou le Royaume Uni.

Le coût d'installation élevé est le principal frein pour la généralisation des procédés de production de biogaz.

1.2.2. Les biocarburants de 1^{ère} génération

Le biocarburant présente un intérêt particulier, surtout pour la filière des transports routiers, en remplaçant partiellement l'essence par du bioéthanol et le diesel par des huiles végétales. Le bioéthanol est issu de la fermentation des sucres ou des amidons des plantes. En France, c'est principalement à partir du blé ou de la betterave qu'il est produit et c'est bien souvent un coproduit du raffinage du sucre. L'utilisation du bioéthanol pur permet une économie de l'ordre de 57 % en termes d'énergies fossiles et de 61 % en termes d'émissions de CO₂ par unité consommée, selon une étude réalisée par l'ADEME [6]. En France, en ce qui concerne les huiles utilisables dans les moteurs Diesel, elles proviennent principalement du colza et en quantités plus faibles du tournesol. La même étude souligne que les émissions de CO₂ chutent de 70 % pour les huiles de colza, et de 75 % pour les huiles de tournesol par rapport au gazole. D'un point de vue économique, le bioéthanol devient compétitif pour un cours du baril de pétrole supérieur à 90 \$US et les huiles pour un cours supérieur à 75 \$US [6]. Pour la

production des biocarburants de première génération, seulement une partie de la plante est transformée. Ainsi, une grande surface est nécessaire pour pouvoir récolter des quantités suffisantes de matière première. Par conséquent, l'agriculture dédiée au biocarburant vient concurrencer la culture vivrière et, dans certains cas, participe à la déforestation de certaines zones. Sur le plan socioéconomique, la concurrence avec l'agriculture alimentaire vient augmenter ses prix et aggrave la situation alimentaire des pays les plus pauvres. Sur le plan écologique, bien que le bilan en CO₂ des biocarburants soit généralement considéré comme positif, le changement d'affectation des sols peut avoir des conséquences désastreuses. En effet, la destruction des forêts tropicales s'est fortement accélérée ces dernières années à cause de la demande accrue de l'industrie des biocarburants pour le soja, le maïs et la canne à sucre.

1.2.3. La biomasse solide

Le chauffage est naturellement la forme la plus naturelle et rationnelle de l'utilisation de la biomasse solide, souvent assimilée au «bois-énergie» et intéresse en priorité les zones rurales qui sont souvent éloignées des réseaux de distribution des énergies fossiles mais proches des gisements de bois-énergie. Elle est aussi utilisée pour la production d'électricité, notamment par cogénération. En effet, les biomasses agricole et forestière constituent le gisement énergétique le plus fécond pour les années à venir. La quantité de biomasse qui peut être produite chaque année par l'industrie du bois (les déchets de scierie par exemple) ainsi que par les déchets de l'agroforesterie (plaquettes forestières, pailles, petits bois et résidus d'exploitation) est estimée à 5 Mtep. En deuxième place, on trouve les déchets organiques et en particulier les boues des stations d'épuration. En France, environ 2 millions de tonnes de matière sèche sont produites chaque année, dont on estime que 55 % restent non-valorisées, c'est-à-dire l'équivalent approximatif de 0,5 Mtep/an si ces boues faisaient l'objet d'une valorisation énergétique.

Les biomasses solides d'origine végétale peuvent avoir des caractéristiques variées, mais il y a une typologie générale de cette famille de combustibles : des PCI faibles variant entre 6 et 20 MJ/kg, des densités faibles, des teneurs en inertes excédant rarement 5 %, un contenu assez important en matières volatiles, des pourcentages de chlore et de soufre généralement inférieurs à 0,1 % mais aussi des teneurs en eau élevées (typiquement entre 30 et 50 % de la masse brute) d'où la nécessité de les sécher avant leur utilisation dans des chaudières à combustion [7]. Chimiquement, le carbone et l'oxygène représentent approximativement 50

% et 40 % de la masse de la matière sèche d'une biomasse typique. On peut également y trouver des traces d'hydrogène (~ 5 %) et d'azote (~ 1 %) [8]. Le Tableau 2 et la Figure 1 montrent les caractéristiques de différents types de biomasses végétales utilisés dans une centrale thermique en Pologne pour la co-combustion avec du charbon et/ou dans un lit fluidisé de biomasse.

Tableau 2 : Caractéristiques des biomasses utilisées dans la centrale de Poloniec, Pologne (pourcentages massiques).

	Mélange (80 % bois 20 % agro)	Copeaux de bois	Agro	Pailles - granulés	Tournesol	Coquille de Palme
Biomasses Brutes						
Humidité (%)	35,90	42,40	11,55	13,00	11,50	9,70
Teneur en cendre (%)	1,80	0,29	2,63	-	2,90	2,00
PCI (MJ.kg ⁻¹)	10,50	9,40	15,85	14,80	16,00	17,90
Densité (kg.m ⁻³)	350	300	437,5	600	600	300
Biomasses sèches						
Matière volatile (%)	--	80,00	80,78	83,10	80,00	80,00
Cendre (%)	2,81	0,50	3,95	6,90	3,28	2,20
C (%)	49,15	49,75	49,01	45,83	49,51	53,69
H (%)	5,96	6,12	5,86		5,91	5,80
N (%)	0,25	0,05	0,87	0,80	0,93	0,49
O (%)	--	43,50	40,25	40,63	40,21	37,78
S (%)	0,05	0,04	0,11	0,15	0,16	0,04
Cl (mg.kg ⁻¹)	--	100	550	1 000	700	300
P (mg.kg ⁻¹)	--	100	1 150	1 000	1 600	300
alkalin (Na+K) acid soluble (mg.kg ⁻¹)	--	600	6 650	10 000	11 000	1 300

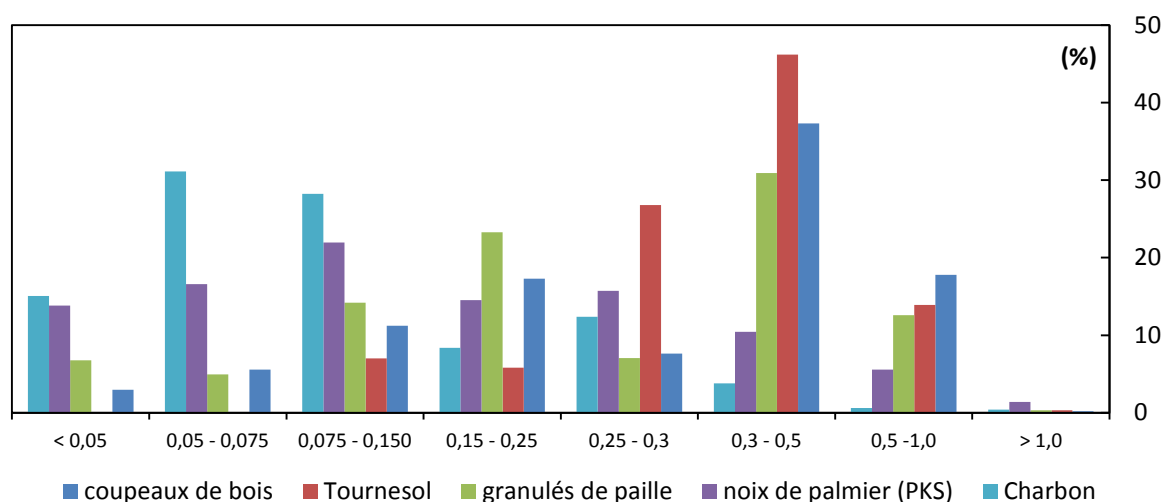


Figure 1 : Distribution massique selon la granulométrie de différents échantillons de biomasses et un échantillon de charbon (dimensions en mm)

La biomasse solide est de plus en plus utilisée dans les centrales thermiques de production d'électricité, puisqu'elle est disponible en quantités plus importantes que le biogaz ou les biocarburants. C'est une stratégie que ciblent les grands pays développés dans leur transition énergétique vers des énergies plus propres mais aussi pour réduire leur dépendance aux combustibles fossiles importés. La Chine étant le plus grand consommateur d'énergie et émetteur de CO₂ au monde, elle investit massivement dans l'intégration intensive de la biomasse dans son mix énergétique. En effet, en 2010, une capacité de 5,5 GW provenant des biomasses a été atteinte dont 62 % provenant directement de l'utilisation de bois-énergie [9]. L'objectif pour l'horizon 2020 est d'atteindre 30 GW de puissance électrique produite à partir de la biomasse avec un investissement totale qui s'élèvera à 3,1 milliards de dollars pour l'installation de ce type de centrale thermique. A ce jour, le nombre de centrales thermiques à biomasse en fonctionnement en chine se situe entre 500 et 700 [9]. En Chine, afin d'assurer leur viabilité économique, un prix subventionné au kWh de 0,039 \$US a été fixé pour l'électricité produite à partir de la biomasse.

1.3. Les différents procédés thermiques de valorisation de la biomasse

Les principaux procédés thermiques utilisés pour la production d'énergie à grande échelle à partir de la biomasse sont la pyrolyse, la gazéification et la combustion.

1.3.1. La pyrolyse

La pyrolyse est un processus de décomposition thermique en absence d'oxygène. Elle permet de convertir la biomasse en solide (charbon de bois), en liquide (des huiles) ou en gaz à haute température. La pyrolyse peut être considérée comme une phase intermédiaire de la gazéification et/ou de la combustion. Le processus de pyrolyse peut être réparti en trois étapes principales. La première étape se déroule entre 120 et 200 °C, durant laquelle a lieu l'élimination de l'eau, l'apparition de quelques radicaux et la formation de composés carbonylés. La deuxième étape est la phase principale où la décomposition de la matière solide a lieu pour former les différents produits de la pyrolyse avec une vitesse de formation élevée pour des températures entre 300 et 600 °C. Pendant la troisième étape, la partie restante du solide se décompose à faible vitesse et atteint une valeur asymptotique qui participe à l'enrichissement en carbone du bio-charbon [10]. En fonction des quantités souhaitées des produits de la pyrolyse, on peut opter pour une pyrolyse rapide (rendement plus élevé de produit liquide), pour une pyrolyse intermédiaire (ratio équivalent entre les

produits des différentes phases) ou une pyrolyse lente (produit majoritairement composé de bio-charbon) [8].

1.3.2. La gazéification

La gazéification est particulièrement adaptée pour la valorisation énergétique de la biomasse solide grâce à la flexibilité des procédés de gazéification en fonction du type de biomasse traité [11]. Il s'agit d'une oxydation incomplète des composés organiques après la pyrolyse. L'oxygène contenu dans l'agent oxydant (air, oxygène, CO₂ ou vapeur d'eau) réagit avec le carbone pour produire du gaz de synthèse. Appelé aussi syngaz, il est composé principalement de monoxyde de carbone et de dihydrogène avec des faibles quantités de dioxyde de carbone, d'eau, de méthane, de sulfure d'hydrogène et d'ammoniac et de goudrons [12]. Le gaz de synthèse peut être utilisé pour alimenter un procédé Fischer-Tropsch pour la production de carburant liquide [13], pour la production de biocarburant de deuxième génération, pour la production d'électricité ou de chaleur dans une turbine à gaz ou un moteur à combustion interne, ou pour la synthèse d'autres produits chimiques comme l'ammoniac ou le méthanol. Suivant les applications souhaitées, le gaz de synthèse nécessite d'être nettoyé de ses goudrons et autres impuretés.

1.3.3. La combustion

La combustion est le procédé le plus répandu pour la valorisation énergétique de la biomasse avec une contribution correspondant à 97 % dans la production globale de bioénergie. La grande teneur en eau est un obstacle non négligeable pour la combustion de la biomasse car, bien que la réaction de combustion soit exothermique, l'évaporation de l'eau est endothermique. Afin de maintenir une flamme stable et continue, le taux d'humidité ne peut pas dépasser 65 % [14]. Les lits fixes et les lits fluidisés sont les technologies majoritairement utilisées dans les procédés de combustion de biomasses solides [15]. D'une part, les procédés à lit fixe représentent la technologie la plus simple et la plus répandue et ceux dotés d'un cyclone sont particulièrement adaptés pour la combustion des résidus agricole et les pastilles de bois. La température de combustion se situe typiquement entre 850 et 1 400 °C [16]. D'autre part, les lits fluidisés possèdent un rendement plus élevé et sont plus adaptés pour de grandes installations. Le lit peut être composé de sable de silice, de grains de calcaire ou de dolomite et la température de combustion est relativement plus basse et comprise entre 700 et 1 000 °C, afin de ne pas vitrifier le matériau du lit.

La combustion autonome et propre de combustibles pauvres comme la biomasse n'est pas chose aisée et constitue aujourd'hui, un véritable challenge scientifique. La principale difficulté vient du fait que la combustion à l'air de combustibles pauvres ne peut se réaliser qu'à haute température, ce qui la rend dépendante des conditions thermiques de la chambre de combustion. A plus basse température, comme c'est le cas lors des phases de démarrage ou de fonctionnement en régime non-nominal des chaudières, un combustible pauvre ne peut pas être utilisé sans un apport énergétique extérieur au moyen de brûleurs. Être capable de créer et maintenir une flamme par combustion de combustibles pauvres sous des conditions thermiques défavorables dans un fourneau est donc un véritable défi scientifique et technologique. Afin de pallier à ces problèmes, trois nouveaux procédés thermiques d'assistance à la combustion de combustibles pauvres sont actuellement développés : l'oxy-combustion, la co-combustion et l'activation thermochimique par plasma.

1.3.3.1. L'oxy-combustion

L'oxy-combustion est un procédé de combustion où l'oxygène pur joue le rôle de comburant. L'oxygène est produit généralement par une unité cryogénique de séparation d'air avec une pureté souvent au-dessus de 95 %. Le premier avantage direct de l'oxy-combustion est l'absence de NOx dans les gaz rejetés car les produits de la combustion sont principalement le CO₂ et la vapeur d'eau. Le second avantage est la possibilité du captage direct du CO₂ en sortie de process. Les oxy-brûleurs sont capables de générer, à partir d'un combustible pauvre et d'oxygène, une flamme stable dans un fourneau ayant une température inférieure à celle requise pour la combustion à l'air. Que cette technique soit utilisée pour la phase de démarrage seulement ou de façon continue, la limitation de l'oxy-combustion réside dans le coût énergétique élevé de la production d'oxygène. En effet, pour une production à l'échelle des centrales thermiques, la consommation d'énergie par kg d'oxygène produit par séparation cryogénique est entre 0,20 et 0,22 kWh.kg⁻¹ [17]. L'étude technico-économique d'une centrale à charbon de 460 MW a montré que la consommation de l'unité auxiliaire de production d'oxygène est entre 15 et 18 % de la puissance électrique totale (entre 72 et 83 MW) [18]. Cette consommation est loin d'être négligeable et induit un écart de rendement important par rapport aux procédés de combustion conventionnels. En plus des coûts opérationnels, le coût d'investissement initial d'une unité d'oxy-combustion est également important. Il est estimé à 2 089 €/kW net contre 1 323 €/kW net pour une unité supercritique à charbon [18].

1.3.3.2. La co-combustion

La co-combustion consiste à utiliser un combustible d'appoint, généralement du fioul ou du gaz naturel, pour assister la combustion d'un mélange pauvre. Actuellement, c'est la technique la plus utilisée dans les chaudières à biomasse ou à charbon durant la phase de démarrage bien que les intérêts de cette technique sont limités sur les plans environnemental et économique.

Afin de réduire les coûts de fonctionnement des centrales classiques, la biomasse peut être utilisée comme combustible secondaire. La co-combustion de la biomasse avec du charbon est la méthode la plus économe pour leur valorisation énergétique car elle nécessite des modifications minimales sur la chaudière [4]. Bien que dans certaines centrales une proportion relativement faible de biomasse peut être injectée avec le combustible fossile, il est à noter qu'une chaudière standard (à charbon par exemple) nécessite un redimensionnement complet pour qu'elle puisse fonctionner avec des proportions importantes de biomasse. En effet, malgré des PCI proches, les choix de pression de vapeur et de température de fonctionnement dépendent fortement de la composition chimique du combustible, particulièrement, la teneur en chlore et en inertes qui déterminent les températures maximales envisageables. Ces éléments chimique ont un effet direct sur la corrosion de la chaudière, d'où une réglementation plus sévère pour l'utilisation directe de la biomasse. Actuellement, plus de 150 centrales à charbon dans le monde (de 50 à 700 MW), ont été adaptées pour la co-combustion avec la biomasse solide [19]. La co-combustion peut être réalisée aussi avec le gaz naturel, ce qui est pratiquée pour la biomasse à haute teneur en eau (> 60 %) [20]. En plus de la réduction des émissions de CO₂ à partir de combustibles d'origine fossile, la co-combustion permet de réduire les émissions d'oxydes sulfuriques et d'oxydes d'azote [21]. La diminution des émissions de sulfure n'est pas seulement liée à la faible teneur en soufre mais aussi à la rétention des sulfures par les alcalins [15]. La diminution des émissions de NO_x est directement liée à la forte humidité des biomasses qui baisse la température de la combustion et réduit par conséquent la formation de ces oxydes.

1.3.3.3. La combustion assistée par plasma

Un plasma est un gaz plus ou moins ionisé. Il représente le quatrième état de la matière et constitue 99 % de l'univers. Il se compose d'électrons, d'ions et de molécules neutres à l'état fondamental ou excité. Du point de vue macroscopique, le plasma est électriquement neutre. Néanmoins, il contient des porteurs de charge libre, ce qui le rend conducteur électrique [22].

Les plasmas peuvent être classés selon deux catégories : les plasmas froids où la température des particules lourdes est plus faible que celles des électrons et les plasmas thermiques où les deux espèces ont, approximativement, la même température. Les plasmas thermiques ne sont pas toujours à l'équilibre thermodynamique local dans certaines zones, comme à proximité des électrodes.

Les plasmas permettent en effet [23]:

- Un apport d'énergie sans émissions directes de CO₂, robuste, flexible et contrôlable dans une très large gamme de conditions opératoires (type d'atmosphère, pression,...), et de températures pouvant aller au-delà des températures rencontrées dans les procédés de combustion traditionnels.
- D'améliorer les rendements de conversion et de réduire les impacts environnementaux de nombreux procédés industriels, de par leur capacité à produire des espèces chimiques très réactives.

A cause de leurs propriétés différentes, les plasmas interagissent avec le processus de combustion de plusieurs façons. Comme les plasmas peuvent fournir de la chaleur, des électrons, des espèces intermédiaires ayant une longue durée de vie, des radicaux, des ions, des molécules excitées, des vents ioniques et des forces électromagnétiques, ils affectent la combustion via trois voies principales: thermique, chimique et de transport, comme le montre la Figure 2 [24]. Dans la voie thermique, le plasma augmente la température et accélère les réactions chimiques, y compris l'oxydation du combustible, selon la loi d'Arrhenius. Dans la voie d'amélioration chimique, le plasma, grâce à sa forte densité d'électrons et d'ions, produit davantage de radicaux actifs (O, OH et H principalement), des espèces réactives de longue durée de vie comme l'ozone et des catalyseurs intermédiaires comme le monoxyde d'azote qui peuvent accélérer les réactions d'oxydation à faible température. Malgré les nombreux efforts de recherche, la description quantitative ou même qualitative de la cinétique chimique de la combustion assistée par plasma reste dans sa phase exploratoire. Dans la voie de transport, généralement considérée comme un effet induit, le plasma participe à la fragmentation des grandes molécules du combustible, ce qui change sa diffusivité et modifie par conséquent le processus local de combustion. D'autres effets macroscopiques de transport peuvent être liés aux forces électromagnétiques et aux effets hydrodynamiques dus aux forts gradients thermiques.

Ces trois voies d'amélioration sont toujours couplées et le classement en ordre d'importance dépend du type de plasma. Dans le cas des plasmas thermiques par exemple, l'effet thermique est primordial car l'apport enthalpique fait monter la température du mélange au-dessus de 10 000 K dans certaines conditions. Ceci induit un effet thermochimique qui se traduit par la création de nouvelles espèces accélérant la cinétique chimique.

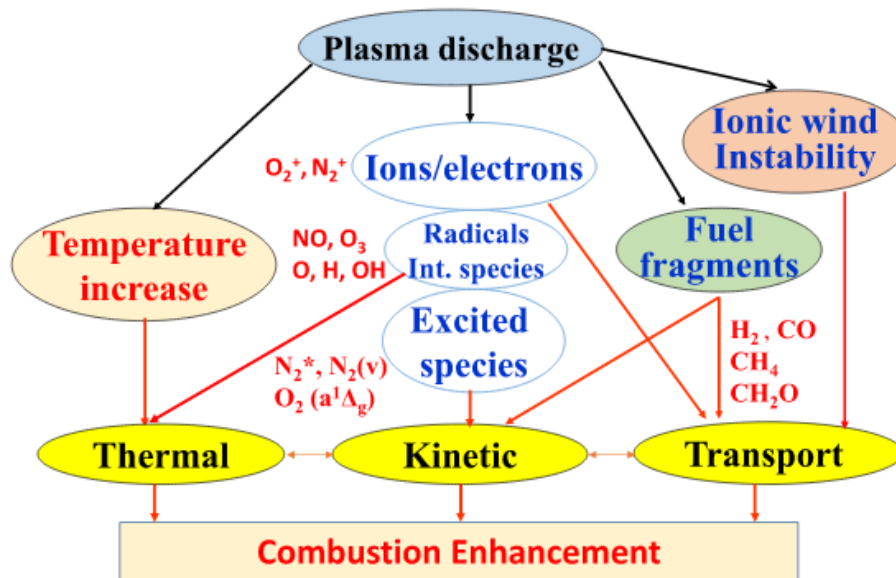


Figure 2: Schématisation des majeurs améliorations apportées par le plasma dans la combustion [24]

La combustion assistée par plasma présente un grand potentiel pour les applications industrielles de faible puissance comme les moteurs à combustion interne [25]–[27], de puissances moyennes comme les turboréacteurs et les turbines à gaz [28], [29] mais aussi les chaudières des centrales thermiques [30]. L'allumage et le soutien de la flamme sont les deux principaux rôles que jouent les plasmas dans le processus de combustion.

L'étincelle d'une bougie d'allumage des moteurs à combustion interne, des réacteurs d'avion ou des turbines à gaz est la forme la plus connue de plasma thermique. Dans une bougie d'allumage standard, une décharge électrique est créée entre deux électrodes, permettant d'ioniser et de craquer les molécules du mélange air/carburant. Ceci déclenche la réaction de combustion localement et la flamme se propage vers le reste du mélange. De nouvelles technologies sont développées pour améliorer la procédure d'allumage. Ces dispositifs sont généralement basés sur des torches plasma DC. Comparées aux bougies d'allumage conventionnelles, les torches plasma produisent un plasma plus volumineux avec des vitesses de jets plus importantes. Ceci permet une meilleure pénétration dans le mélange réactif au sein de la chambre de combustion et permet par conséquent d'avoir un allumage plus efficace.

Les torches plasma DC d'allumage ont généralement une puissance de l'ordre de 1 kW, consomment un débit de gaz autour de 1 g.s⁻¹ et sont caractérisées par une durée de vie voisinant les 4 000 h [31]. Pour un allumage dans des conditions d'écoulement proches de Mach 1, voire supersonique, comme dans les propulseurs aérospatiaux et les statoréacteurs, des plasmas non-thermiques basés sur des technologies radio fréquence, micro-onde ou des décharges pulsées (10-100 ns) sont utilisés [32]. Ces plasmas non thermiques favorisent la génération d'espèces actives, accélérant les réactions de combustion et réduisant le temps d'allumage, sans avoir des composants immergés dans le plasma lui-même.

La stabilisation de flamme est réalisée en apportant plus d'enthalpie au mélange, par effet aérodynamique ou par effet chimique. Ce sont ces effets directs du plasma qui permettent de créer un volume de combustion plus homogène. Le fonctionnement à haute altitude des réacteurs d'avion et la combustion des mélanges pauvres sont des applications directes de cette technologie. L'allumage et la stabilisation de la flamme sont deux fonctions qui se chevauchent ; car un meilleur allumage conduit à une combustion plus homogène, ce qui se traduit généralement par une flamme plus stable.

Les électrobrûleurs plasma sont capables de générer, à partir d'un mélange de combustible pauvre et d'air, thermo chimiquement pré-activé par plasma, une flamme stable dans un fourneau froid. Pour répondre à la dégradation de la qualité du charbon suivant leur provenance, plusieurs centrales à charbon ont été rénovées et équipées d'électrobrûleurs plasma pour bénéficier des avantages techniques et économiques de la combustion assistée par plasma (cf. Figure 3). Dans une configuration simplifiée, le plasma déclenche la combustion partielle d'un mélange primaire pauvre qui donne à la sortie de la torche un flux hautement réactif riche en monoxyde de carbone. En se mélangeant avec le flux secondaire, la flamme de combustion devient plus intense et plus stable [33]. Les essais réalisés sur plus d'une trentaine de chaudières, montrent l'intérêt environnemental de cette technologie. En effet, avec l'utilisation d'une torche plasma pour générer une flamme stabilisée d'un mélange d'air et de charbon pulvérisé, les émissions de NO_x sont réduites par un facteur deux et la quantité d'imbrulés est quatre fois plus faible [33]. La puissance électrique consommée pour la génération du plasma ne dépasse pas 2 %. Ces observations sont confirmées avec l'utilisation de plusieurs types de charbons (bitumineux, anthracite, lignite et leurs mélanges) [34] avec, en masse, une teneur en volatiles variant de 4 à 50 %, un ratio de cendres entre 15 et 48 % et une humidité variant de 5 à 35 %. En comparant ces caractéristiques avec celles de

la biomasse, on peut prévoir un meilleur rendement de la combustion si on utilise le plasma pour l'assistance à la combustion de la biomasse solide.

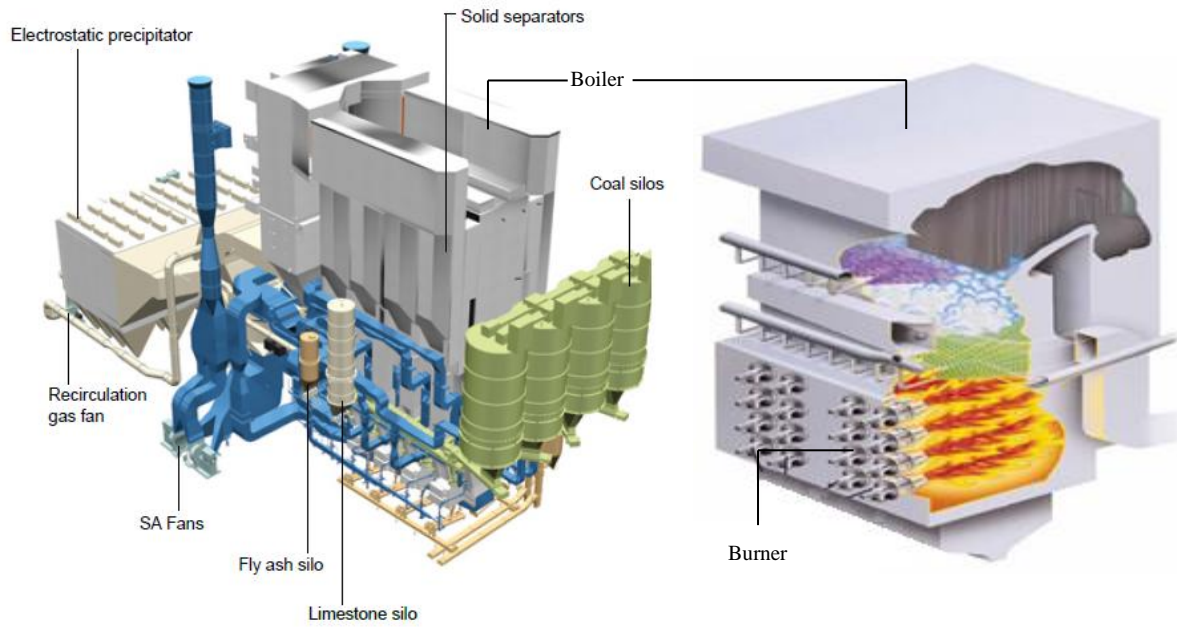


Figure 3 : Schéma simplifié d'une chaudière à charbon : avec les équipements annexes (à gauche) et isolée (à droite)

2. Les électrobrûleurs plasma dans les centrales thermiques

2.1. Situation mondiale

Comme illustré dans la Figure 4, Figure 5 et Figure 6, les centrales thermiques à charbon ou à biomasse sont construites avec des brûleurs de soutien pour le fonctionnement en conditions non-nominales (au démarrage ou à charge faible). Ces brûleurs utilisent, généralement, des combustibles supplémentaires comme du fioul ou du gaz naturel. L'intégration des installations dites à énergies renouvelables dans le réseau électrique a changé le classement des rôles des installations à énergies fossiles en Europe : les centrales thermiques conventionnelles à charbon ou à biomasse, traditionnellement, fonctionnant à charge constante, doivent aujourd'hui assurer la stabilisation du réseau, ce qui se traduit par un besoin croissant de flexibilité. La combustion assistée par plasma vient alors réduire les coûts des modes de fonctionnement non-nominaux grâce à l'utilisation du charbon ou de la biomasse en remplacement des combustibles fossiles.

2.1.1. En Chine

Compte tenu de l'évolution des problèmes environnementaux dans le monde, le pays qui a le plus besoin d'améliorer l'efficacité de ses centrales à charbon est la Chine. Les constructeurs de centrales à charbon suivent actuellement une politique de développement en faveur de la technologie plasma. La majorité des nouvelles centrales à charbon est équipée de système d'allumage et/ou de soutien par plasma. En octobre 2012 :

- Plus de 627 chaudières équipées de technologies d'allumage au plasma ont été installées
- La capacité totale installée dépasse les 265 GW
- La technologie plasma couvre un éventail de puissances de chaudières allant de 50 MW jusqu'à 1 000 MW (69 unités de 1 000 MW, 318 unités de 600 MW, 120 unités de 300 MW et 116 unités de 200 MW)
- 80 % des nouveaux projets de centrales à charbon ont été équipés d'électrobrûleurs plasma.
- En remplaçant les combustibles fossiles, la quantité de fioul économisée est de l'ordre de 5 millions de tonnes (équivalent à 3,5 milliard d'euros)



Figure 4 : Centrale thermique à charbon de Tianjin Guodian - Chine



Figure 5 : Photo d'un brûleur à charbon pulvérisé installé dans une chaudière

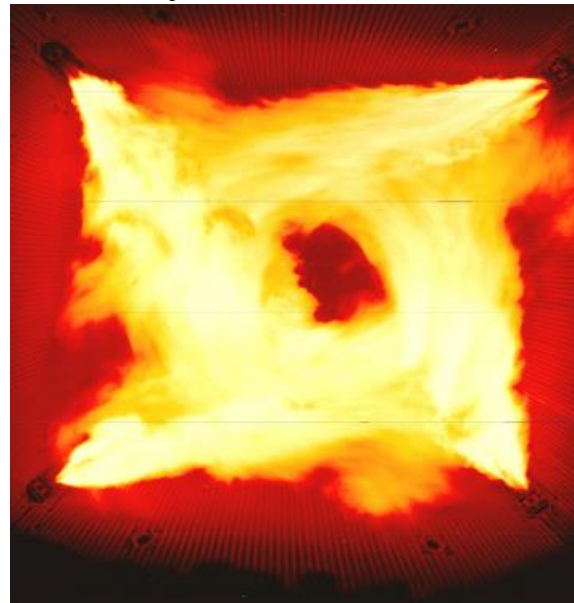


Figure 6 : Photos de 4 brûleurs à charbon pulvérisé installés dans les quatre coins d'une chaudière et générant une flamme vortex

La technologie plasma utilisée est relativement classique. Elle est basée sur une torche DC à arc transféré et à électrodes en tungstène. Le marché des électrobrûleurs en Chine est en pleine expansion. Yantai Longyuan Electric Power Technology Co. Ltd (Longyuan Corp.) est le principal fournisseur des équipements plasma pour la combustion assistée avec une part de marché de plus de 95 %. Longyuan a été créé en 1996 et est devenue une filiale de China Guodian Corporation depuis 1998. Longyuan a réussi à incorporer cette technologie pour la première fois sur une unité de 50 MW dans la centrale "Yantai Power Plant" en février 2000. En octobre 2007, l'intégration a été réalisée sur une unité de 560 MW dans la centrale "Korea Samchonpo Power Plant". L'application de cette technologie a été poussée encore plus loin avec le succès d'un fonctionnement 100 % sans fioul pendant 168 h dans la centrale

"Dongsheng Power Plant" en Janvier 2008. Le Tableau 3 détaille quelques informations de l'électrobrûleur Longyuan.

Tableau 3: Caractéristiques de l'électrobrûleur plasma Longyuan

Paramètres	Spécifications
Puissance du plasma	80~120 kW, ajustée en temps réel
Durée de vie de la cathode	50 heures garanties et 70~80 heures en moyenne
Durée de vie de l'anode	500 heures garanties
Temps d'allumage	< 180 s après l'alimentation en charbon pulvérisé
Température des parois	< 600 °C
Qualité du charbon exigée	Charbon bitumineux, lignite
Type de chaudière	Chaudière à chauffe tangentielle ou murale

Malgré l'implantation croissante de cette technologie en Chine ces dernières années, des rapports d'évaluation provenant d'experts du domaine, montrent que les électrobrûleurs peuvent rencontrer quelques problèmes majeurs de fiabilité. Il apparaît qu'ils ne sont pas optimisés puisque la quantité d'imbrulés mesurée dans les cendres est relativement élevée (de l'ordre de 30 %). Lorsque des cendres riches en charbon pulvérisé se trouvent dans une atmosphère chargée en CO, les risques d'explosion sont très forts. Pour les normes de sécurité européennes, ces risques ne sont pas permis [35] et c'est bien cette raison qui freine la commercialisation de la technologie chinoise dans les marchés occidentaux.

2.1.2. En Europe de l'Est

A l'échelle académique, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés par l'équipe de V. E. Messerle, A.B. Ustemenko et E. I. Karpenko, et montrent l'intérêt technologique de l'intégration des électrobrûleurs dans des centrales à charbon [36]. Leur technologie, basée sur une torche plasma DC à arc non-transféré, a été testée sur plus de 27 unités à charbon pulvérisé dans 16 centrales différentes, placées dans 6 pays (Russie, Kazakhstan, Corée, Slovénie, Mongolie et Chine). Au total, plus de 70 électrobrûleurs ont été montés et testés dans des chaudières avec des débits de charbon pulvérisé allant de 75 jusqu'à 950 t.h⁻¹ (de 70 MW jusqu'à 1 000 MW) [37]. La puissance de la torche plasma utilisée varie de 100 à 200 kW.

Dans la centrale Mongole d'Ulan-bator, 12 brûleurs sont montés dans les quatre coins de la chaudière sur trois étages. Dans chacune des 8 chaudières de la centrale, deux électrobrûleurs ont été montés sur l'étage inférieur. La phase de démarrage dure 4 heures avec une montée en

température jusqu'à 1 300 °C au bout d'une heure de fonctionnement et une flamme de plus de 7 m de long [37].

D'autres études, menées en partenariat entre la Russie et l'Ukraine, ont porté sur l'assistance à la combustion de charbon par plasma micro-onde. Le choix de cette technologie est poussé par le besoin de résoudre le problème d'érosion des électrodes dans les technologies de plasma d'arc. Les essais ont été réalisés avec une torche de 3,7 kW (fonctionnant à une fréquence de 2,45 GHz) montée sur un brûleur avec un débit maximal de charbon pulvérisé de 50 kg.h⁻¹. L'énergie spécifique nécessaire pour assister la combustion d'un kg de charbon de faible qualité (30 % de cendre) est de l'ordre de 0,14 kWh.kg⁻¹. Suite aux résultats jugés pertinents, la conception d'un électrobrûleur d'une capacité de 6 t.h⁻¹ a été proposée. A notre connaissance, aucune application industrielle de ce concept n'a été rapportée pour l'instant [38].

La République Tchèque et la Pologne effectuent actuellement des recherches actives sur la combustion assistée par plasma. 90 % de l'électricité produite dans ces deux pays provient du charbon, mais contrairement à la Chine, le secteur énergétique n'est pas en pleine expansion et la majorité des centrales à charbon est déjà construite. Cette situation limite l'émergence de nouvelles technologies car les exploitants des centrales sont très prudents par la crainte de l'arrêt de la production. Néanmoins, la société ORGREZ a conçu un électrobrûleur équipé d'une torche plasma DC à arc non-transféré stabilisé par vortex et dotée d'électrodes à cavité. Pendant la phase des recherches, des torches de différentes dimensions ont été testées avec des puissances variant de 20 à 100 kW [39]. Cet électrobrûleur a été testé sur une chaudière de type OP-430 dont le débit nominal de charbon pulvérisé est égale à 430 t.h⁻¹.

Pour conclure, malgré l'importance du charbon dans le secteur énergétique dans les pays de l'Europe de l'Est et les nombreux travaux de recherche réalisés, le nombre limité de nouvelles centrales à charbon installées pendant les dernières décennies, freine la commercialisation des nouveaux concepts de brûleurs industriels issus des travaux académiques.

2.1.3. En France

En France, 75 % de l'énergie électrique provient du nucléaire mais les centrales thermiques restent un moyen de production non négligeable avec une part de 15 %. Ces centrales fonctionnent majoritairement avec du gaz naturel ou du pétrole et vu les tendances des prix, la France ne s'oriente pas vers le charbon. Néanmoins, poussés par les connaissances

acquises dans le domaine des plasmas, plusieurs travaux de recherches ont été entrepris. La société EDF a lancé les premiers travaux de recherche pour l'optimisation de l'allumage et de la combustion dans ses centrales mais aussi pour cibler des marchés internationaux. La société Bertin a également travaillé sur ce sujet et a développé un électrobrûleur pour l'assistance à la combustion de combustibles gazeux. A l'échelle du laboratoire, la torche plasma triphasée développée au centre PERSEE de Mines ParisTech pour des applications de craquage d'hydrocarbures est en cours d'adaptation pour son intégration dans un brûleur industriel. Cette torche alimentée en courant triphasé est dotée de 3 électrodes consommables en graphite. Comparée à la concurrence, elle est caractérisée par :

- un faible coût d'équipement car elle ne nécessite pas l'utilisation d'un redresseur AC-DC comme les torches DC classiques,
- un faible coût de fonctionnement car le matériau des électrodes n'est pas cher (graphite),
- une grande fiabilité car les composants internes (particulièrement les électrodes) ne sont pas refroidis par eau, ce qui minimise les risques de fuites,
- un rendement électrothermique élevé puisque il n'y a pas de pertes thermiques vers un circuit de refroidissement des électrodes,
- un minimum de maintenance et un maximum d'autonomie grâce à l'alimentation continue des électrodes,
- une simplicité d'utilisation car la procédure de démarrage ne nécessite qu'une simple mise en contact des électrodes.

Tous ces critères en faveur de la torche triphasée justifient les travaux de recherche entrepris dans cette étude pour le développement de cette technologie pour l'assistance à la combustion.

2.2. Les différents concepts d'électrobrûleur

Plusieurs brevets d'électrobrûleurs dotés de torches plasma pour l'assistance à la combustion, ont été développés pendant les trois dernières décennies. La Figure 7 montre le principe de fonctionnement d'un électrobrûleur plasma. Le concept est doté d'une ou plusieurs torches plasma alimentées avec un gaz plasmagène qui est généralement de l'air. Le plasma généré vient allumer un mélange primaire d'air et de combustible pauvre pour générer une première flamme de combustion. Un flux secondaire est acheminé vers le mélange initial hautement

réactif pour générer une flamme plus puissante. Le pourcentage d'électricité consommé pour la génération du plasma est estimé entre 1 et 2 % de la puissance totale de la flamme. Les électrobrûleurs conçus par les industriels peuvent se différencier par le nombre d'étages de combustion ou de torches plasma mais aussi par la disposition des torches.

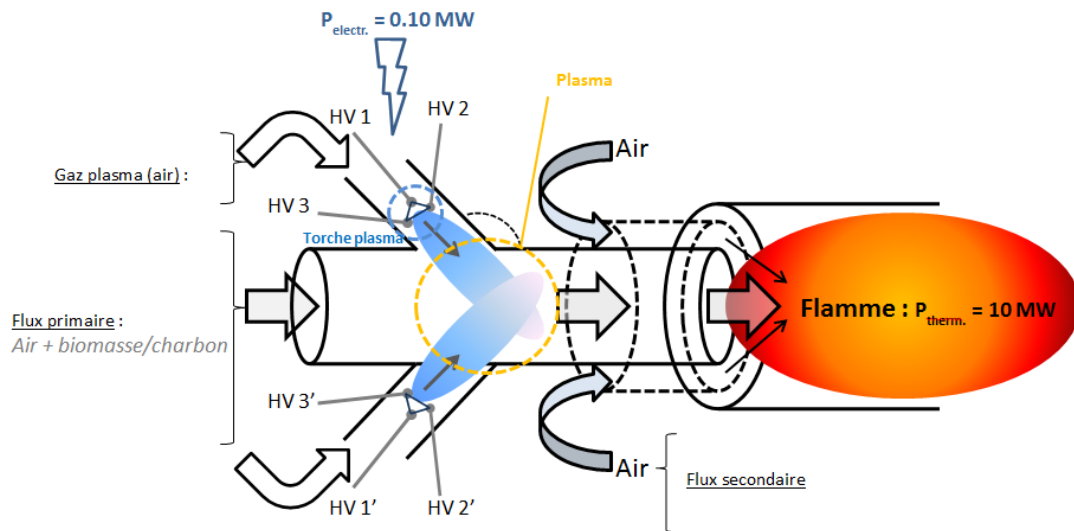


Figure 7 : Schéma de principe d'un électrobrûleur à torche plasma triphasée pour l'assistance à la combustion de combustibles à faible PCI

En 1984, la société BERTIN a proposé une conception de «réacteur haute température associé à une zone de plasmagenèse» [40]. Comme le montre la Figure 8, ce réacteur comporte deux étages situés respectivement en amont et en aval de la zone plasma. Deux conduites coaxiales sont montées dans l'étage amont : la conduite interne est dotée de plusieurs buses d'injection du gaz combustible et la conduite externe permet une injection tourbillonnaire de l'air pour initier une première réaction de combustion. Dans la zone intermédiaire débouchent trois porte-électrodes placés à 120° l'un de l'autre. Dans la zone aval, trois canaux assurent l'injection d'un deuxième flux d'air. L'injection de combustible comme gaz plasmagène a pour objectif de réduire l'érosion des électrodes. La chambre plasma, en matière silico-alumineuse ou en graphite, est dotée d'un convergent qui confine le plasma, et qui permet d'accélérer et d'acheminer le plasma vers l'extérieur, tandis que la zone aval possède une forme divergente pour réduire les recirculations et stabiliser la flamme de combustion. Les porte-électrodes sont dotés eux aussi d'une buse d'injection de méthane ou de propane pour gainer les électrodes. Lorsque la chambre plasma est alimentée seulement en gaz combustible, donc par un faible débit gazeux, la température du plasma est très élevée et risque d'induire une élévation prohibitive des températures des parois. La solution proposée

consiste à utiliser l'air comburant conduit en aval du plasma comme fluide de refroidissement de ces parois.

En 1994, la société EDF a soumis un brevet d'un électrobrûleur plasma [41] doté de plusieurs injections d'air tangentielles produisant un effet rotatif du gaz plasma, d'une électrode amont et d'une contre-électrode alimentées par une source électrique DC (Figure 9). L'ensemble ouvre sur un divergent dans lequel le mélange de combustion est injecté. Un déflecteur est placé sur le trajet du flux d'air afin de minimiser les risques d'extinction de l'arc. Afin de réduire la tension d'amorçage, une électrode de relais est positionnée de façon radiale à une distance de l'ordre de 3 mm du déflecteur et portée au même potentiel que la contre électrode. La source DC est placée en série avec une source auxiliaire d'alimentation produisant une tension élevée à vide et une tension très faible lorsqu'elle est parcourue par un courant puissant. La contre électrode peut se déplacer sur l'axe principal, permettant un démarrage par court-circuit. L'une des électrodes est munie d'une série d'aimants disposés de façon circulaire. Le champ magnétique créé induit un mouvement rotatif à l'arc. Pour éviter que le pied d'arc s'accroche au centre de l'électrode, éliminant ainsi l'effet rotatif du champ magnétique, les électrodes comportent un évidement au centre.

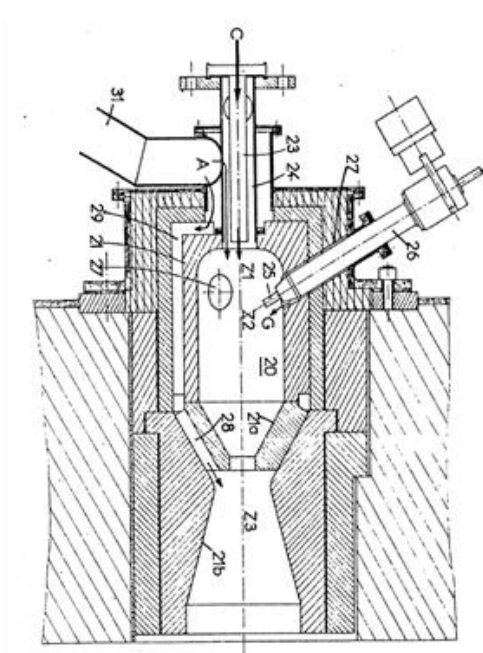


Figure 8 : Schéma du brevet "Réacteur haute température associé à une zone de plasmagenèse, en particulier brûleur mixte électricité-combustible" n° EP0130913 A1 déposé par Bertin et Cie [40]. (21) divergent, (23) conduite de gaz combustible, (24) conduite d'air, (25) électrode, (26) porte-électrode

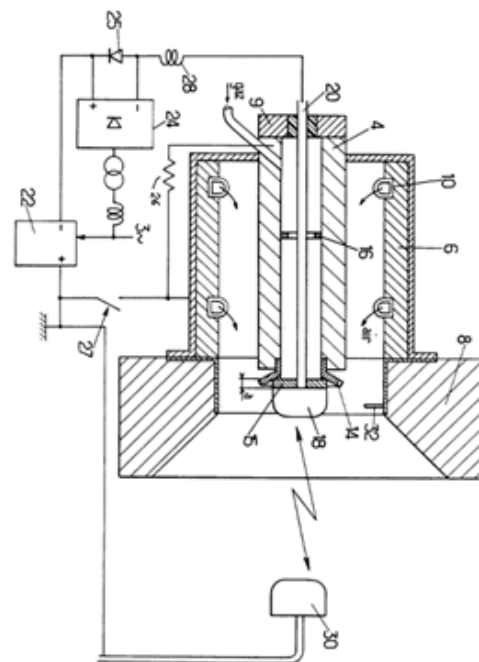


Figure 9 : Schéma du brevet "Electrobrûleur à gaz à apport d'énergie électrique et amorçage assisté" n° EP0457994 B1 déposé par Electricité De France [41]. (8) divergent (18) électrode amont, (30) contre électrode, (32) électrode relais

En 1988, l'université de Sydney a déposé un brevet d'un brûleur pour des carburants pulvérisés (en particulier du charbon), détaillé dans la Figure 10 [42]. Le brûleur est doté d'une torche plasma débouchant sur une zone de volatilisation, située en amont d'une zone de combustion. La torche plasma DC possède une cathode placée au centre et une anode annulaire de forme conique refroidie par eau. L'arc créé est soufflé avec un débit d'air pressurisé, la tension de fonctionnement varie entre 100 et 300 V et le courant varie entre 150 et 800 A. Un flux primaire de mélange air et charbon pulvérisé (avec un ratio massique de l'ordre de 10:1) est acheminé vers la zone de volatilisation où une première flamme de combustion a lieu grâce au plasma. Le flux secondaire est directement injecté dans la zone de combustion avec un ratio similaire. La conduite d'injection est dotée de déflecteurs qui créent des turbulences dans la zone de combustion.

Yantai Longyan a déposé un brevet en 2002 décrivant le fonctionnement d'un électrobrûleur plasma avec une torche plasma DC à arc stabilisé par champ magnétique [43]. La cathode, refroidie par eau, a une forme cylindrique avec un cône à l'extrémité et elle est reliée à un moteur linéaire permettant l'ajustement de sa position pour combler l'effet de l'érosion. L'anode, également refroidie par eau, est constituée d'un alliage d'argent. Le brûleur se compose de quatre étages de combustion comme le montre la Figure 11. Le flux primaire de mélange air-charbon pulvérisé est divisé en trois parties pour alimenter en différents endroits les étages de combustion. Le flux secondaire d'air permet de refroidir les parois cylindriques des chambres de combustion. L'entreprise Allemande Evonik Industries a également développé un électrobrûleur équipé d'une torche plasma DC. D'après les informations dont nous disposons, il semblerait que la torche plasma DLZ-200 développée par la société chinoise Yantai Longyan soit basée sur la technologie Evonik. Cette dernière a apporté plusieurs modifications sur cette torche au cours des années et commercialise actuellement la version III avec laquelle elle revendique une durée de vie de 250 heures pour la cathode et d'avoir résolu le problème du taux élevé d'imbrulés.

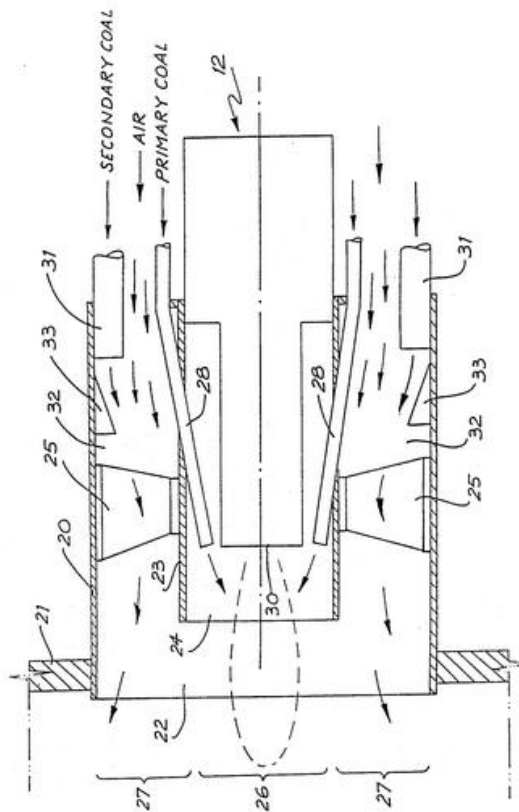


Figure 10 : Schéma du brevet "brûleur à carburant pulvérisé" n° US4862814 A, déposé par l'université de Sydney en 1988 [42]. (28) anode, (24) zone de volatilisation, (22) zone de combustion, (30) cathode, (33) déflecteurs

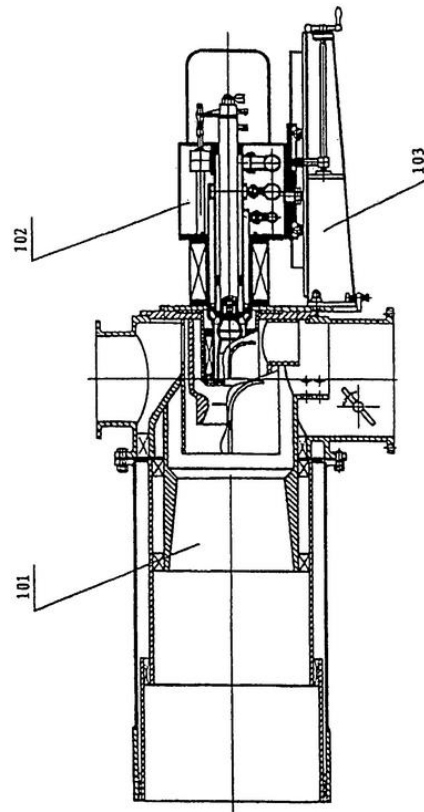


Figure 11 : Schéma du brevet « allumeur plasma avec une cathode assemblée » n° EP1371905 B1, déposé par Yantai Longyuan Technology Co. Ltd en 2002 [43].

En 2012, la société Alstom a déposé un brevet décrivant un «brûleur pour brûler du carburant pulvérisé pour une chaudière, doté d'une torche plasma d'allumage», sans donner plus d'informations techniques sur la torche plasma. Dans la description très superficielle du brevet, une ou plusieurs torches sont montées à la sortie d'une conduite acheminant le mélange d'air et de combustible dans l'objectif de réduire les risques de retour de flamme [44].

Des Travaux de recherches, menés en collaboration entre l'Ukraine (National Academy of Sciences of Ukrain, Kharkov Central Design Bureau of the Minister of Fuel and Energy of Ukraine), la Russie (Moscow High Technical University) et l'Allemagne (Technical University Hamburg – Harbur), ont permis la conception d'un électrobrûleur d'une capacité de 6 t.h^{-1} [38]. Le concept est doté d'une torche plasma micro-onde équipée d'un magnétron opérant à une fréquence de 915 MHz et d'une puissance de 220 kW. Comme le montre la Figure 12, l'électrobrûleur est divisé en deux étages d'allumage : 30 % du mélange primaire d'air et de charbon passe dans la zone plasma générant ainsi une première flamme et le reste

est injecté après la torche. La température de la flamme de sortie est estimée à 1 500 K et vient déclencher la combustion du mélange secondaire.

D'autres électrobrûleurs dotés de torches micro-ondes ont été développés, mais généralement pour des applications d'assistance à la combustion dans des turbines à gaz. Nous citons celui développé par H. Uhm et al. breveté en chine en 2005, pour la combustion d'hydrocarbures gazeux, liquides ou sous forme de poudre [45]. Ce dispositif sous forme de cylindre contient 3 parties : (i) un tube de décharge équipé d'un magnétron générant des micro-ondes, un réflecteur d'onde pour le confinement des ondes et un injecteur d'air avec un générateur de turbulence, (ii) une conduite pour l'injection du combustible dans le plasma et (iii) un générateur d'étincelle à électrodes pour déclencher la flamme, comme détaillé dans la Figure 13. La fréquence du magnétron est égale à 2,45 GHz avec une puissance de 1 kW et le débit de gaz plasmagène est de $50 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. La température de la flamme à la sortie du brûleur est de l'ordre de 1 700 K pour une longueur de flamme entre 10 et 40 cm, en utilisant du kérosène comme combustible.

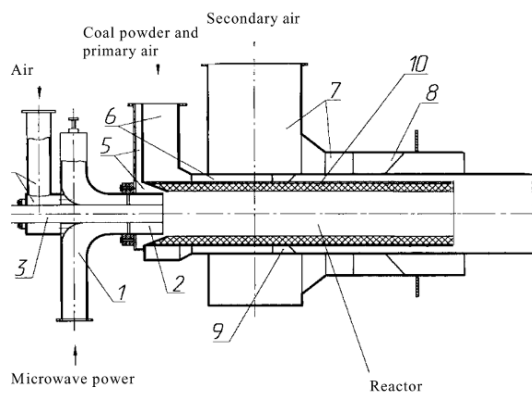


Figure 12 : Schéma d'un électrobrûleur industriel à torche micro-onde conçu dans un projet en partenariat avec l'Ukraine, la Russie et l'Allemagne [38].

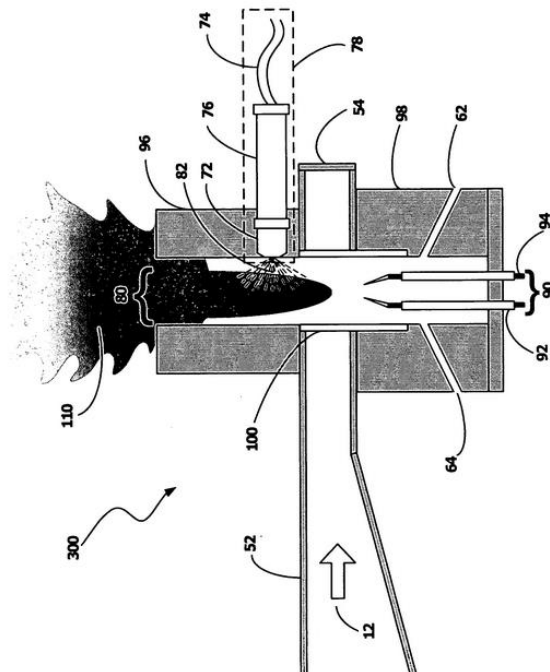


Figure 13 : Schéma du brevet « brûleur plasma micro-onde » n° US20070007257 A1 déposé en 2005 par H. Uhm et al. [45]. (12) énergie micro-onde, (92) et (94) électrodes d'allumage, (76) conduite d'injection du combustible, (110) flamme de combustion

2.3. Etude technico-économique

En l'absence de chaudière à biomasse équipée d'une technologie équivalente, cette étude technico-économique est basée sur la comparaison des coûts opérationnels de trois centrales à charbon que nous avons pu visiter : une polonaise (Poloniec), une allemande (Zolling) et une chinoise (Tianjin Guodian). Les deux premières sont équipées seulement de brûleurs classiques au fioul. La centrale Tianjin Guodian a été rénovée et est équipée des deux types de brûleur (fioul et plasma). Un deuxième cas d'étude est détaillé à la suite pour comparer le fonctionnement à charge réduite avec l'appoint en fioul et avec un électrobrûleur plasma.

2.3.1. Intérêts technologiques

Dans une centrale classique, une chaudière est équipée de plusieurs rangées de brûleurs pour assurer la montée de puissance durant le démarrage à froid ou pour maintenir le fonctionnement à faible charge pour une durée fixée par l'exploitant. Les brûleurs sont généralement des brûleurs classiques au fioul (cf. Figure 14) ou au gaz naturel. A l'installation, l'utilisation de cette technologie classique implique des annexes supplémentaires liées au stockage et à l'acheminement du fioul et/ou du gaz. La phase de démarrage a un impact direct sur les émissions de polluants car les filtres (filtre de désulfuration et précipitateur électrostatique) sont court-circuités dans certaines centrales pour éviter leur colmatage. Faire appel à la technologie plasma permettra de réduire la durée du by-pass des filtres et de baisser par conséquent les émissions polluantes.

En général, les électrobrûleurs plasma peuvent être installés sur les chaudières neuves ou déjà en exploitation. Le nombre à installer dépend de la puissance nominale à atteindre avec ces brûleurs, de leurs puissances thermiques mais aussi d'autres contraintes techniques surtout lorsqu'il s'agit d'une chaudière opérationnelle. Dans une opération de rénovation par exemple, les électrobrûleurs peuvent prendre la place des brûleurs à fioul ce qui réduit la complexité technique de la manipulation.

La centrale de Poloniec est composée de 7 chaudières à charbon pulvérisé et une unité à biomasse à lit fluidisé en période de test au moment de cette étude. Les chaudières sont généralement en pleine capacité pendant la journée et à 57 % de leur charge durant la nuit sachant que la charge minimale pour un fonctionnement autonome sans le soutien des brûleurs au fioul est égale à 50 %. La Figure 16 montre le rendement global d'une chaudière en fonction de sa puissance thermique. Ainsi, à 57 % de charge, c'est-à-dire à 140 MW thermique à peu près, le rendement baisse de 41 % à 39 %, ce qui a un impact direct sur le

prix du kWh. La centrale de Zolling contient deux chaudières, une à charbon pulvérisé de 1 075 MW thermique et une à biomasse de 465 MW thermique. La charge minimale de la chaudière à charbon pulvérisé est égale à 20 % et un objectif de 10 % est ciblé. La centrale de Tianjin Guodian est composée de deux chaudières à charbon pulvérisé de 330 MW thermique chacune. La première unité a été construite avec des brûleurs au fioul qui ont été remplacés par la suite par des électrobrûleurs plasma tandis que la deuxième unité en a été directement équipée (cf. Figure 15). La charge d'autonomie a été définie à 40 % puis a été baissée jusqu'à 30 % après l'installation des électrobrûleurs plasma. Ainsi, adapter les centrales existantes avec des électrobrûleurs plasma représente une nécessité pour faire face aux besoins urgents de fonctionner à faible charge tout en gardant le charbon comme combustible principal.



Figure 14 : Canon à fioul monté sur un brûleur à charbon pulvérisé dans la centrale de Zolling en Allemagne

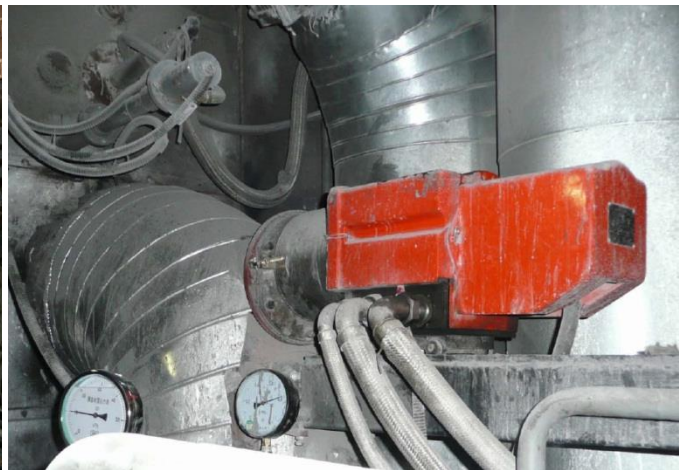


Figure 15 : La torche plasma DLZ-200 montée sur un brûleur à charbon pulvérisé en Chine

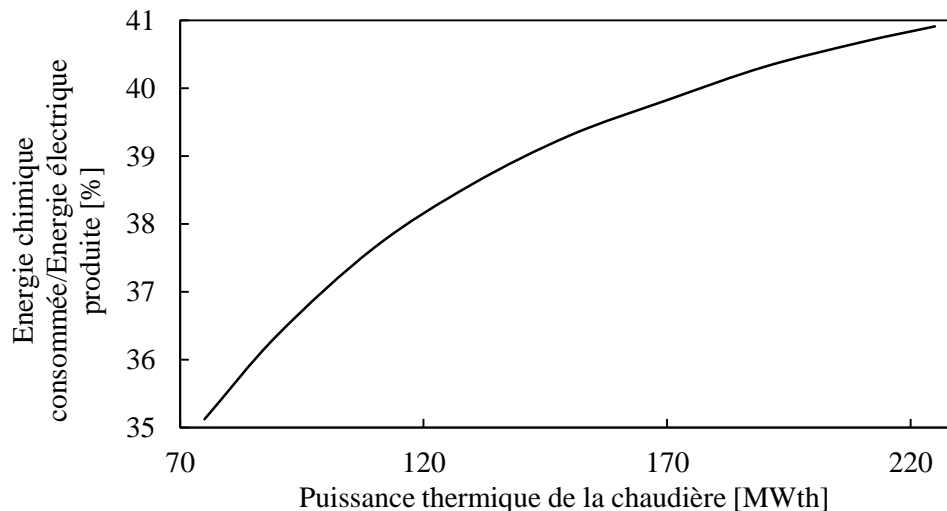


Figure 16 : Rendement global de la chaudière en fonction de sa puissance thermique

2.3.2. Intérêts économiques

2.3.2.1. Premier cas d'étude

Le démarrage à froid est la phase de fonctionnement où les électrobrûleurs plasma démontrent le plus leur intérêt économique. L'objectif de la phase de démarrage est d'apporter la puissance de la chaudière à une puissance d'autonomie (charge d'autonomie) où la combustion peut s'entretenir sans apport énergétique d'un deuxième combustible. La procédure de démarrage diffère selon la technologie utilisée. Comme le montre la Figure 17, pour un démarrage à froid au fioul, la manœuvre prend généralement entre 4 et 5 heures. La chaudière n'est alimentée en charbon pulvérisé qu'après 40 minutes, car le charbon, à son état initial, est sous forme de roche et doit être broyé jusqu'à un diamètre entre 50 et 100 μm . A cause de l'humidité contenue dans le charbon, le broyage se fait avec un débit d'air chaud important : pour une capacité de broyage de 30 tonnes par heure, il faut un débit de $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ d'air chaud à $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Ce flux d'air chaud provient de la chaudière. La turbine du générateur ne se déclenche qu'après 2 heures de préchauffage et se stabilise après 3 heures pour un débit de vapeur de l'ordre de 8 tonnes par heure et une température de $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

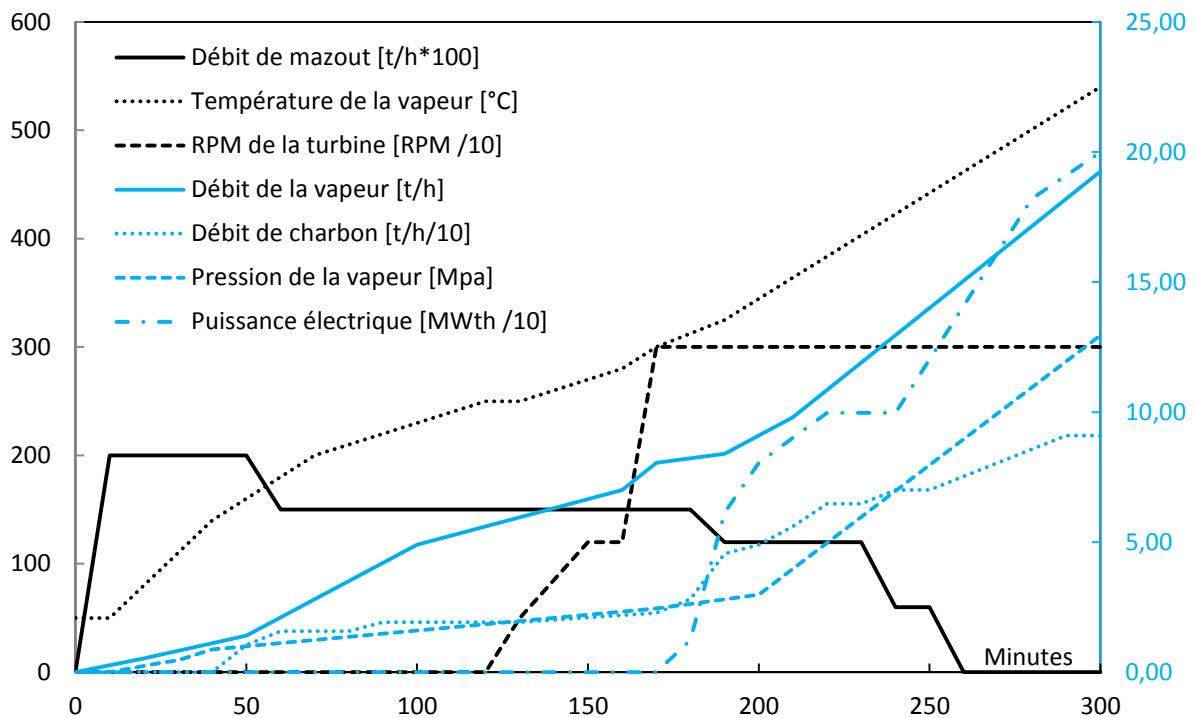


Figure 17 : Données relatives à la phase de démarrage à froid d'une chaudière à charbon pulvérisé équipée de brûleur au fioul. Le débit de mazout, la température de la vapeur et la vitesse de rotation de la turbine sont représentés par l'axe de droite et le débit de vapeur, le débit de charbon, la pression de vapeur et la puissance thermique de la chaudière sont représentés par l'axe secondaire à gauche.

(Centrale de Poloniec [46])

Les coûts de fonctionnement des électrobrûleurs sont principalement liés à l'énergie électrique consommée pour la génération du plasma et le charbon injecté dans le brûleur. Le pourcentage d'énergie électrique utilisé par rapport à la puissance totale de l'électrobrûleur ne devrait pas excéder 2 %. En plus, 90 % de cette énergie électrique est récupérée sous forme de chaleur. A partir des tests réalisés sur des centrales thermiques à charbon équipées de torches plasma, M. A. Gorokhovski et al [47] a proposé une relation empirique entre le ratio ε de la puissance du plasma à fournir par la torche par rapport à la puissance nécessaire du brûleur et le pourcentage de matière volatile contenu dans le charbon utilisé (Cf. Figure 18).

$$\varepsilon = \frac{P}{PCI \cdot Q} \quad (1)$$

où P , PCI et Q sont respectivement la puissance du plasma, le pouvoir calorifique inférieur du charbon et le débit du charbon dans le brûleur.

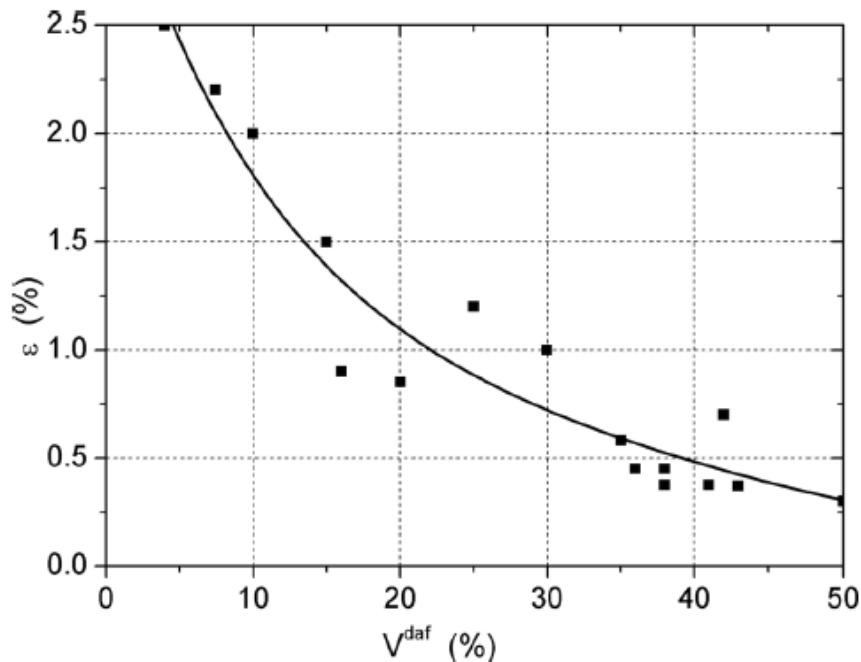


Figure 18 : Pourcentage de puissance électrique ε (par rapport à la puissance thermique totale de la torche plasma) en fonction de la teneur en volatile dans le charbon utilisé. Ce graphe est une compilation de 16 centrales thermiques équipées de torches plasmas [34].

Grâce à plusieurs visites sur le terrain et l'analyse de rapports de fonctionnement, un bilan économique simplifié des coûts de démarrage à froid des trois centrales thermiques à charbon a été dressé dans le Tableau 4. En plus de la différence de capacité, ces trois centrales sont situées dans trois pays différents, ce qui implique des écarts importants dans les prix des énergies premières (fioul, charbon et électricité). Malgré la spécificité de fonctionnement de chacune de ces centrales, les coûts par démarrage au fioul rapporté à 100 kW de puissance

thermique sont relativement proches et la différence est principalement due aux prix du fioul et à la durée de la phase de démarrage. L'ensemble des phases de démarrage sur une année, a une facture qui s'élève à 3,7 M€ pour les centrales de Zolling et de Poloniec et à 0,84 M€ pour la centrale de Guodian. Après le remplacement des brûleurs au fioul par des électrobrûleurs plasma, ce même facteur descend à 0,214 M€ dans la centrale chinoise, ce qui représente une économie de 0,625 M€. Si on installait la même technologie plasma dans la centrale allemande, les économies annuelles réalisées seraient de l'ordre de 1,8 M€. Ce chiffre se base sur l'hypothèse que le même charbon bitumineux que celui brûlé dans la centrale chinoise soit utilisé. Ce charbon est de bonne qualité et contient au moins 20 % de matières volatiles et une teneur en eau inférieure à 10 %. En se basant sur la Figure 18, le pourcentage maximal correspondant d'électricité est égal à 1 % et les frais associés sont inférieurs à 2 %.

Parmi les 7 chaudières de Poloniec, l'unité 2 a réalisé 40 démarrages sur l'année 2013. C'est donc l'unité nécessitant le plus de flexibilité. Cependant, vu la conjoncture sur les énergies renouvelables, ce nombre devrait augmenter très prochainement pour atteindre potentiellement jusqu'à 200 démarrages par an et par chaudière, ce qui rend l'installation des électrobrûleurs très rentable et réduit le temps d'amortissement de l'investissement. D'après les résultats obtenus, il est vérifié que le prix d'un démarrage au charbon est au moins 2 fois moins élevé qu'au fioul.

Le fonctionnement de l'électrobrûleur plasma nécessite des équipements annexes comme la source électrique, le système de refroidissement par eau et le système d'alimentation en air comprimé. En remplaçant les brûleurs au fioul par des électrobrûleurs plasma, le charbon remplace le fioul comme combustible de démarrage, ce qui élimine toutes les annexes techniques nécessaires au stockage et à l'alimentation en fuel. Comme détaillé dans la procédure de démarrage, un flux d'air chaud est nécessaire pour faire fonctionner le broyeur afin d'alimenter les électrobrûleurs en charbon pulvérisé. La solution qui peut être envisagée dans ce cas consiste à faire un stockage de charbon pulvérisé en cours de fonctionnement pour le consommer durant la phase de démarrage. Cette solution implique des installations annexes comme un silo de stockage, un système de transport pneumatique, un injecteur doseur (de type vis sans fin par exemple) et les installations électriques associées. On estime le coût de ces équipements à 300 k€ pour une rangée de 4 électrobrûleurs.

Tableau 4 : Bilan des coûts opérationnels du démarrage de trois centrales à charbon (Zolling en Allemagne, Poloniec en Pologne et Tianjin Guodian en Chine) avec des brûleurs au fioul et avec des électrobrûleurs plasma [48]

Paramètres de calcul	Unité	Nom de la centrale à charbon		
		Zolling (Allemagne)	Poloniec (Pologne)	Guodian (Chine)
Puissance totale de la centrale	MW _{th}	1 075	1 750	660
Nombre d'unités (chaudières)	--	1	7	2
Puissance d'autonomie de chaque unité	MW _{th}	246	88	70
Nombre de démarrage annuel par unité	--	55	23	16
Nombre de brûleurs par unité	--	8	8	8
Démarrage au fioul				
Durée de la phase de démarrage au fioul	h	5	4	5
Débit de fioul	t/h	2,8	1	0,8
Prix du fioul	€/t	600	720	820
Coût par démarrage et par unité	k€	67,2	23,04	26,24
Coût pour un démarrage de 100 kW	k€	27,31	26,18	37,71
Coût pour un démarrage de 100 kW pour un prix de 720 €/t de fioul	k€	32,77	26,18	33,11
Coût annuel des démarrages par unité	M€	3,69	0,53	0,42
Coût annuel des démarrages	M€	3,69	3,71	0,84
Démarrage au plasma*				
Durée de la phase de démarrage au plasma	h	5	4	3,5
Débit de charbon	t/h	17,57	6,3	5
Prix du charbon	€/t	47	47	47
Pourcentage d'électricité consommé	%	1	1	1
Puissance électrique par brûleur	MW	0,307	0,11	0,087
Prix d'électricité par MWh	€/MWh	45,5	45,5	45,5
Coût d'électricité par démarrage et par unité	k€	0,558	0,16	0,111
Coût du charbon par démarrage et par unité	k€	33,03	11,85	6,58
Coût par démarrage et par unité	k€	33,59	12	6,69
Coût pour un démarrage de 100 kW	k€	13,65	13,64	9,56
Coût annuel des démarrages par unité	M€	1,85	0,276	0,107
Coût annuel des démarrages	M€	1,85	1,93	0,214
Economie par démarrage	k€	33,6	11,2	19,55
Economie annuel	M€	1,85	1,8	0,625
Economie annuel rapporté au 1MW installé	M€	1,72	1,03	0,947

*Les data du démarrage au plasma des centrales de Zolling et de Poloniec sont hypothétiques et se basent sur les data réelles de la centrale de Guodian qui a été rénovée et équipée d'électrobrûleurs plasma. Ceci implique la même qualité de charbon (donc le même pourcentage d'électricité), le même prix par tonne de charbon et par MWh d'électricité et le même rendement thermique des électrobrûleurs (donc la même consommation par unité de puissance produite). Les durées de démarrage au plasma n'ont pas été réduites dans ces deux cas.

Une deuxième possibilité pour réduire le coût d'investissement consiste à envisager un démarrage combiné : c'est-à-dire garder les brûleurs au fioul pour les utiliser jusqu'à ce que le cycle de fonctionnement des broyeurs se mette en marche. Une fois que les électrobrûleurs sont alimentés en charbon pulvérisé, les alimentations en fioul sont arrêtées. Bien que cette solution puisse réduire la valeur de l'investissement, les économies réalisées sur le prix du fioul sont aussi moins importantes. Le retour sur investissement sera plus faible dans ce deuxième cas. Néanmoins, cette solution présente l'avantage d'éliminer le risque lié à la procédure de stockage du charbon pulvérisé qui reste un élément potentiellement explosif difficilement manipulable.

2.3.2.2. Deuxième cas d'étude

Nous considérons une centrale électrique à biomasse de puissance nominale 10 MW électrique (environ 40 MW thermique) qui fonctionne 6 000 heures par an (68 % du temps) et qui fonctionne à puissance nominale à 80 % de son temps de fonctionnement (4 800 heures à 10 MWe) et en sous régime pendant 20 % de son temps de fonctionnement (1 200 heures à 3 MWe / 12 MWth). On peut estimer que les besoins de puissance thermique d'appoint pour le soutien pendant les phases en sous régime correspondent à 10 % de la puissance thermique produite pendant ces phases. Sur une année, cela correspond à 1 440 MWh thermique ce qui est équivalent à 124 tep.

Avec la solution traditionnelle (brûleur d'appoint au fioul) il faut un soutien d'environ 124 tep par an, soit 130 tonnes de fioul lourd. Avec la solution électrobrûleur plasma, le fuel est remplacé par de l'électricité associée à du Combustible Solide Pauvre (CSP). Nous nous mettons dans le cas le plus défavorable où l'énergie électrique nécessaire pour le fonctionnement du brûleur s'élève à 10 % soit 144 MWh. L'énergie thermique dégagée par la combustion de la biomasse est de 1 296 MWh, ce qui correspond à environ 460 tonnes de biomasse avec un PCi de 10 MJ.kg⁻¹. Cette consommation doit être mise en regard avec l'énergie annuelle produite par la centrale qui est de 51,6 GWh. Au bilan, l'électrobrûleur plasma correspond à une perte de production électrique de la centrale (alimentation du plasma) d'environ 0,28 % et une économie de 130 tonnes de fuel lourd (Figure 19).

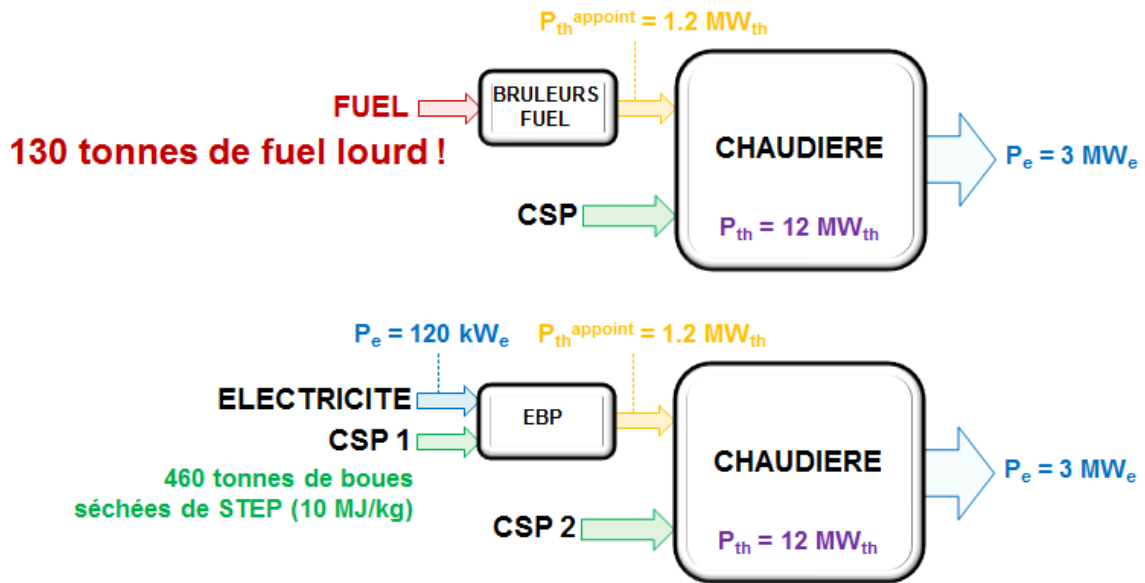


Figure 19 : Représentation simplifiée du fonctionnement à charge réduite d'une chaudière à biomasse avec l'appoint de fioul et avec l'appoint d'un électrobrûleur plasma.

3. Les Différentes technologies de torches plasma haute température

3.1. Les différents types de torche plasma

3.1.1. Technologie Radiofréquence

Les torches plasma à radiofréquence dites aussi torches à couplage inductif sont utilisées dans des applications où aucune contamination ne peut pas être admise comme la fabrication des semi-conducteurs et des fibres optiques. Les torches, dont la puissance est inférieure à 10 kW, ont un tube de confinement en quartz refroidi par air. Pour des puissances plus élevées, mais limitées à 100 kW, ces tubes sont remplacés par des tubes refroidis par eau en céramique à haute résistance thermique pour offrir une meilleure durée de vie [49]. Les torches RF industrielles fonctionnent généralement à une fréquence d'excitation de l'ordre de quelques MHz, à pression atmosphérique ou sous vide. Des torches fonctionnant à plus faible fréquence (200-450 kHz) avec des puissances jusqu'à 400 kW ont été également développées et des torches RF de plusieurs MW ont été développées en Russie. La température maximale que l'on peut atteindre avec ce système est de l'ordre de 10 000 K dans la zone entourée par le solénoïde (Figure 20) [50]. Les forces magnétiques induites ont un effet de mélange avec des lignes de courant tourbillonnaires allant de l'axe central vers les parois dans le sens inverse de l'écoulement entrant, ce qui améliore le temps de séjour des particules transportées dans le gaz plasmagène [51].

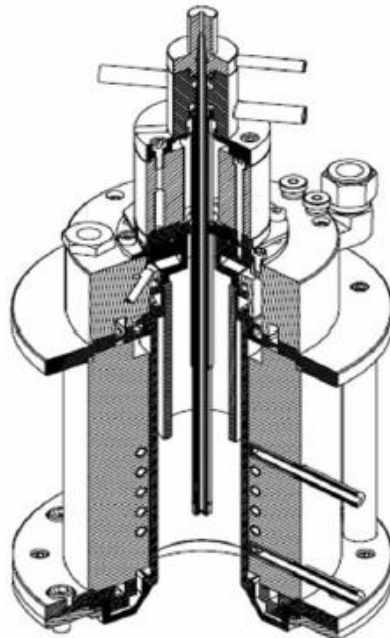


Figure 20 : Représentation schématique d'une torche RF développée et commercialisée par Tekna Plasma Systems Inc [50] .

Le rendement des torches plasma RF à couplage inductif est généralement en dessous de 40 % et baisse significativement à plus haute puissance (>100 kW) [52]. Les plasmas à couplage inductif ne sont pas des plasmas à l'équilibre thermodynamique : la température des électrons varie entre 10 000 et 20 000 K selon la technologie, et la température des particules lourdes est autour de 700 K avec des densités d'électroniques de l'ordre de $10^{17}\sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ [22].

3.1.2. Technologie Micro-Ondes

Les torches plasma à micro-ondes fonctionnent toutes selon le même principe : des micro-ondes avec des fréquences de l'ordre de quelques GHz sont émises le long d'une conduite et leur énergie est transmise aux électrons du gaz plasmagène. Ces électrons sont accélérés et acquièrent une énergie cinétique qu'ils transmettent aux particules lourdes par collisions. La nature et le nombre de ces collisions (élastiques ou ionisantes) suivent les lois probabilistes. Les collisions non élastiques permettent d'ioniser une partie des particules lourdes et le gaz devient du plasma. Contrairement à la technologie RF, le rendement des torches micro-ondes est relativement élevé. La majorité des torches plasma micro-ondes est dotée d'une source de puissance micro-ondes (une source électrique et un magnétron), un équipement pour acheminer les micro-ondes, un système d'allumage et un injecteur de gaz. Les puissances des torches micro-ondes sont de l'ordre de quelques centaines de watts voire quelques kW [53], [54], mais peuvent atteindre des puissances très élevées en mode pulsée (1GW pendant 1 ns [55]). Les plasmas micro-ondes ne sont pas considérés à l'équilibre thermodynamique ; la température des électrons est au-dessus de 12 000 K et la température des particules lourdes varie de 1 500 K jusqu'à 10 000 K avec des densités électroniques de l'ordre de $10^{20}\sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ [22].

3.1.3. Technologie à arc

Les plasmas d'arc peuvent être considérés à l'équilibre thermodynamique local et on peut les diviser en deux catégories : les plasmas d'arc à courant continu (DC) ou à courant alternatif (AC). Dans les deux cas, l'arc est divisé en trois parties : la région cathodique, la région anodique et la colonne d'arc. C'est cette dernière qui est considérée comme un vrai plasma et qui se rapproche le plus de l'hypothèse d'équilibre thermodynamique. La température et la densité des particules chargées, qui sont les propriétés les plus importantes d'un plasma d'arc, varient largement, principalement, en fonction des paramètres de l'arc, y compris sa géométrie. Comme le montre la Figure 21, la température peut varier de 5 000 K pour un arc

de faible intensité jusqu'à 100 000 K pour un arc confiné magnétiquement et la densité électronique peut varier de 10^{21} à 10^{25} m^{-3} , successivement pour les mêmes types d'arcs [56].

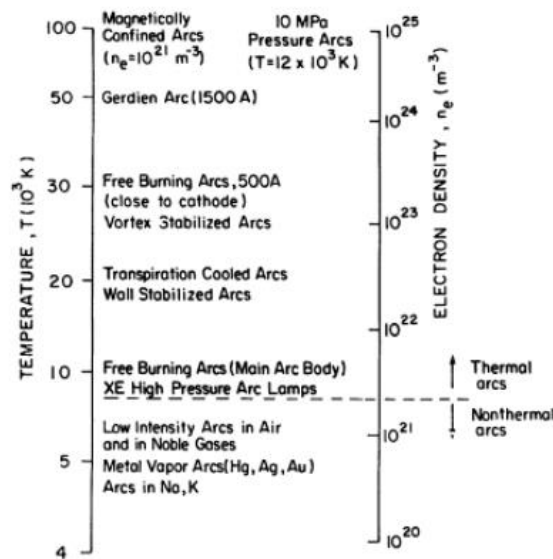
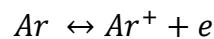


Figure 21 : Températures et densités électroniques dans différents types d'arc [56]

En considérant un plasma d'arc mono-atomique, d'argon par exemple, les trois espèces qui existent dans le plasma sont les électrons, les atomes neutres d'argon (qui peuvent être à l'état excité également) et les ions positifs d'argon, vérifiant l'équilibre réactionnel suivant :



Trois lois décrivent la composition du plasma :

L'équation d'Eggert-Saha
$$\frac{n_e n_i}{n} = \frac{2Q_i}{Q} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (\text{I.1})$$

La loi de Dalton
$$p = (n_e + n_i + n)kT \quad (\text{I.2})$$

La condition de quasi-neutralité
$$n_e = n_i \quad (\text{I.3})$$

où n_e , n_i et n sont successivement les nombres d'électrons, d'ions et des particules neutres dans le plasma, Q_i et Q sont successivement les fonctions de partition des ions et des particules neutres, m_e est la masse électronique, h est la constante de Planck et E_i est l'énergie d'ionisation.

Que la décharge électrique soit générée par un courant continu ou alternatif, généralement, les plasmas d'arc sont différenciés par leurs méthodes de stabilisation. Ici, le terme de stabilisation se réfère aux mécanismes permettant de maintenir la colonne d'arc dans une position stable sans que cela signifie une position stationnaire. L'arc peut alors être stabilisé

mais tourne ou bouge selon un rythme donné. On utilise souvent des techniques de stabilisation dans le cas des arcs DC, comme la stabilisation par parois, la stabilisation par convection ou la stabilisation par champ magnétique externe.

3.1.3.1. Technologie à arc DC

Les torches DC présentent généralement une géométrie axisymétrique avec la cathode au centre et l'anode autour. Le gaz plasma circule dans l'espace annulaire entre les électrodes et une plume de plasma haute température est ainsi générée grâce au transfert de l'énergie électrique par effet joule initialement de l'électrode vers l'arc et ensuite de l'arc vers le gaz par convection, diffusion et rayonnement. Ce type de plasma est généralement caractérisé par des vitesses élevées (plusieurs centaines de m.s^{-1}) résultant de l'effet combiné du passage rétréci et de l'expansion thermique. Malgré l'étendue de l'utilisation de cette technologie et un travail de développement important (designs poussés, circuits de refroidissement optimisés, utilisation de matériaux avancés, utilisation d'un champ magnétique extérieur pour le contrôle de mouvement du pied d'arc), les torches plasma DC, majoritairement à électrodes non consommables, souffrent d'un point critique qui est l'inévitable érosion des électrodes, limitant ainsi leur durée de vie. Cette érosion est due à la combinaison de plusieurs facteurs thermiques, mécaniques et aussi chimiques. Le besoin d'un transformateur AC-DC dont le coût est de l'ordre de 30 % du prix d'une torche plasma s'ajoute à cela et limite dans certaines applications l'intérêt économique de la technologie DC [57].

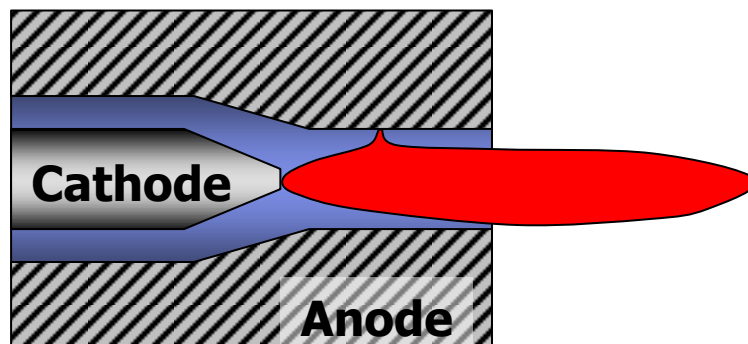


Figure 22 : Schéma de principe d'une torche plasma DC

Les torches plasma DC peuvent fonctionner en mode continu ou en mode pulsé. Un mode de fonctionnement pulsé permet de fournir des quantités d'énergie plus importantes pendant la durée du décharge mais une source de puissance pulsée est généralement beaucoup plus compliquée qu'une source DC simple [22]. En mode continu, on trouve deux catégories : les

arcs non transférés où l'anode est un élément de la torche et les arcs transférés où l'anode ne fait pas partie de la torche. Ces torches contiennent une cathode, une injection de gaz plasma et une tuyère pour confiner le plasma.

3.1.3.2. La technologie à arc triphasé et la torche plasma PERSEE

Dans des applications industrielles de grande échelle comme le traitement de déchets, la pyrolyse, la gazéification ou la combustion assistée, où la fiabilité et la rentabilité sont une exigence, les torches plasma multiphasiques fonctionnant à la fréquence du réseau représentent une alternative intéressante. Dans une décharge AC multiphasique, l'arc électrique est généralement moins confiné en comparaison à une décharge DC. En effet, la décharge électrique change continuellement de paires d'anode et de cathode, et comme la durée de vie des espèces ionisées est supérieure à la période du courant imposée par la fréquence de la source, ceci rend la zone de décharge plus large que dans le cas d'un arc DC. Par conséquent, la température moyenne de la décharge est plus faible [57]. Le transfert de l'énergie contenue dans l'arc est amélioré par le mouvement de l'arc résultant de la nature alternative du courant mais aussi des forces électromagnétiques induites agissant tout au long de l'arc.

Aux Etats Unis, les premières torches AC ont été développées dans les années 60, pour répondre aux besoins de simuler les contraintes thermiques lors de la rentrée atmosphérique des missiles balistiques [58]. Les travaux de recherche réalisés avaient pour objectif d'établir des éléments de conception pour des tuyères haute pression (> 10 bars) et haute température à courant alternatif appelés « AC Arc Heater » [59]–[61].

En Norvège, les systèmes à plasma AC ont été largement étudiés à l'Université NTNU Trondheim, pour des applications métallurgiques. H. Larsen et al. [62] a développé un modèle d'« Arc Channel » pour la simulation de l'arc électrique et un modèle MHD instationnaire pour la modélisation de l'écoulement du plasma. Ces travaux ont été entrepris et approfondis par Svaerdottir et al. [63] et ont été appliqués pour la simulation d'une décharge AC de laboratoire de 1 kA et un arc de 100 kA à l'échelle industrielle.

En Russie, des travaux importants ont été réalisés dans le domaine de la décharge triphasée, principalement durant la période soviétique au sein de l'« Institut for Electrophysics and Electric Power ». Ces travaux de recherche ont visé à améliorer de la durée de vie des

électrodes pour atteindre 1 000 h sous conditions oxydantes, en fonctionnement avec plusieurs gaz plasmagènes inertes, réducteurs ou oxydants, et pour un large intervalle de puissances allant de quelques kW à plusieurs MW avec différents modes de décharge électrique [64]. Les applications principales de cette technologie sont la gazéification et le traitement des déchets et en second ordre, la synthèse de composés chimiques [65]–[67]. Rutberg et al. a présenté, en 2005, deux torches plasma fonctionnant en milieu oxydant et ayant pour puissances 50 et 500 kW. Cette technologie est dotée de trois électrodes en tungstène refroidies par eau et équipée d'une torche monophasique de faible puissance pour le démarrage. La puissance de la torche d'allumage est de l'ordre de 10 kW et elle fournit un flux de plasma avec une densité électronique entre 10^{19} et 10^{20} m^{-3} , tandis que la densité électronique du plasma produit par la torche principale est entre 10^{20} et 10^{21} m^{-3} en mode diffus et de l'ordre de 10^{22} en mode contracté [68]. L'assemblage en cône divergent des trois électrodes dans cette technologie, comme le montre la Figure 23, permet d'ajuster plus facilement le courant et/ou la tension de consigne pour faire monter ou descendre sa puissance, car l'arc glisse jusqu'à se stabiliser en occupant la distance inter-électrodes optimale [64].

En Allemagne, les premiers travaux de développement sur les torches triphasées ont été réalisés au sein du « Krupp Research Institut » dans les années 80. L'objectif consistait à étudier la faisabilité technologique de l'utilisation des torches AC comme système de chauffage pour la fusion de ferrailles dans les fours à arcs (Figure 24). Pour cette application, la torche plasma triphasée est considérée comme particulièrement adaptée pour le chauffage du bain liquide en raison du large volume occupé par l'arc électrique. Pour de l'acier à faible teneur en carbone, les électrodes en graphite ne peuvent pas être utilisées et le choix s'est orienté naturellement vers des électrodes refroidies en tungstène [69]. En parallèle, des travaux de développement ont été menés à l'Université Technique d'Aachen pour développer un procédé plasma tri-phasique haute puissance. Le développement a été entrepris sur 3 axes : sur la torche elle-même, sur le four et le bain liquide et sur la source de puissance. Pour un four d'une capacité de 10 tonnes, la torche plasma installée fournit une puissance de 3,6 MW fonctionnant à 600 V et 6 kA et à la fréquence du réseau avec une durée de vie des électrodes de l'ordre de 100 heures [69]. Poussé par le besoin de monter d'avantage la puissance de ces fours, la capacité de cette torche a été extrapolée à 20 MW. Un courant maximal de 12 kA a été atteint, ce qui représente 50 % de plus que le courant maximal atteint dans des torches DC équivalentes [70]. Un modèle d'arc transféré a été proposé pour simuler l'interaction entre

l'arc et le bain liquide en prenant en compte l'effet Maeker et l'effet du rayonnement [71]. Le phénomène d'érosion des électrodes en tungstène a été également étudié dans ces conditions de fonctionnement [72]. Plus tard, un pilote doté de deux torches plasma AC a été installé pour le traitement des cendres provenant des incinérateurs de déchets municipaux et de boues des stations d'épuration. Ces deux torches sont également équipées d'électrodes en tungstène et produisent une puissance entre 250 et 350 kW [73].

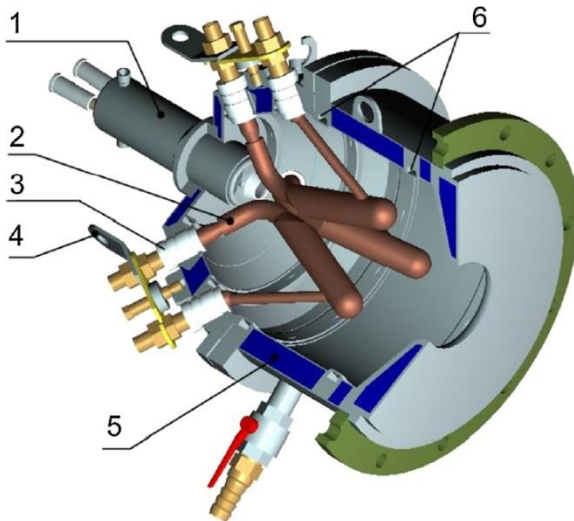


Figure 23 : Torche Plasma triphasée développée au sein de « Institut for Electrophysics and Electric Power », Russie. 1 injecteur, 2 électrodes, 3 isolateur, 4 raccordement électrique, 5 circuit de refroidissement, 6 entrée de gaz. [67]

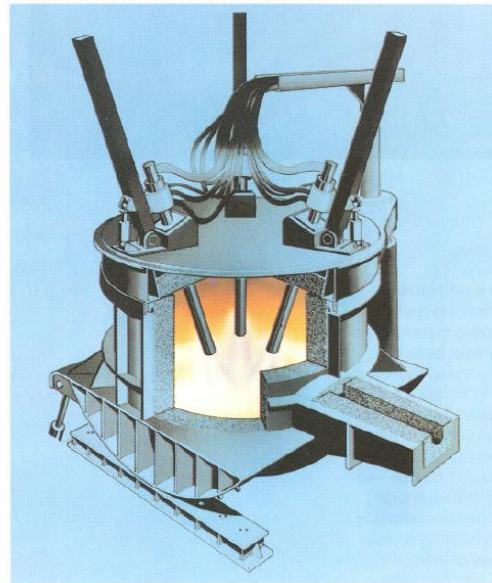


Figure 24 : Four à fusion doté d'une torche à arc triphasé installée à Krupp Stahl AG, Allemagne [69].

En France (Odeillo), au centre IMP du CNRS (actuellement centre PROMES), C. Bonet a lancé, au début des années 70, les premiers travaux de développement de la technologie plasma triphasée, actuellement étudiée à PERSEE – Mines-ParisTech, dans le cadre d'un projet de traitement de matériaux réfractaires à haute température. L'effort intense mené dans ce cadre comprend l'exploration de plusieurs options : la conception et le test de plusieurs prototypes, l'étude de plusieurs matériaux pour les électrodes, l'influence de la distance inter-électrodes, la nature du gaz plasmagène et diverses conditions de fonctionnement et d'alimentation [74]. Les prototypes développés ont tous un démarreur plasma pour initier l'arc (fonctionnant avec un courant DC ou AC) et sont dotés de 3 électrodes montées dans une configuration convergente autour d'un axe de symétrie. Ces électrodes sont généralement en cuivre ou en alliage de tungstène. Un matériau réfractaire est utilisé comme élément protecteur autour des électrodes avec une injection d'un gaz neutre. La source de puissance

est composée de deux composants montés en série : i) un régulateur d'induction avec 380 V à l'entrée et une sortie ajustable entre 0 et 760 V et ii) un transformateur avec une tension de sortie ajustable entre 0 et 2 000 V et un courant maximal de 200 A. Le positionnement des électrodes est effectué grâce à un système de vérins pneumatiques. Initialement, les électrodes sont mises en contact, et lorsque l'allumage est réalisé, elles sont reculées jusqu'à une distance inter-électrodes optimale. Les matériaux suivants ont été testés : tungstène, molybdène, cuivre CrM16, cuivre électrolytique, cuivre OFHC, aluminium, duralumin, nickel, acier doux et l'acier inoxydable NS30. Les meilleures compatibilités entre les gaz testés et ces matériaux sont comme suit : tungstène et cuivre pour l'argon, cuivre pour l'azote, cuivre et cuivre OFHC pour l'air [75], [76].

Entre 1979 et 1989, le cimentier Lafarge France, l'université de Limoges et le centre IMP du CNRS ont mené un programme de recherche collaboratif pour la décarbonisation de la poudre de ciment avec un procédé basé sur la technologie décrite ci-dessus. Bien que la faisabilité du procédé fût démontrée, il n'a jamais été développé à une échelle industrielle, très probablement pour des raisons économiques. En 1986, l'entreprise d'ingénierie Bertin et la société EDF ont mené un projet pour le développement d'un prototype d'électrobrûleur de 500 kW pour la production de chaleur avec du méthane, mais le concept développé n'a pas été industrialisé.

Les travaux sur la technologie AC ont été repris plus tard en 1992 dans le cadre d'un projet de craquage d'hydrocarbures pour la co-synthèse de noirs de carbone et d'hydrogène [77], [78]. Après une étude de faisabilité prometteuse et des essais préliminaires réussis, les travaux de développement ont été poursuivis jusqu'en 2003 [79]. En parallèle de la production de noirs de carbone, il a été démontré que cette technologie plasma triphasée était particulièrement adaptée pour la production de fullerènes et de nanotubes de carbone [80], [81]. Depuis 2004, une collaboration entre Mines-ParisTech et Timcal a été mise en place pour amener le pilote de laboratoire vers une échelle industrielle dans l'optique de produire des fullerènes en grande quantité.

3.2. Autres applications des plasmas à arc de moyennes puissances dans l'industrie

En dehors du domaine de la combustion assistée, les torches plasma de moyenne puissance (quelques dizaines à quelques centaines de kW) couvrent un large éventail d'applications comprenant notamment le soudage et le découpage de pièces métalliques, la

projection, le traitement de surface, la gazéification, la sphéroïdisation et la purification des particules, la métallurgie extractive, le traitement des déchets ou encore la synthèse de produits nanostructurés ...

Le soudage et la découpe sont les applications les plus répandues. Ce domaine d'application est majoritairement dominé par la technologie DC. Pour la découpe, le principe consiste à chauffer localement la pièce avec un grand apport d'enthalpie en utilisant des gaz diatomique comme l'hydrogène, l'azote et l'oxygène et à souffler la matière fondue avec un fort débit. Le soudage, quant à lui, nécessite un gaz neutre pour éviter l'oxydation de la zone de soudure et sa fragilisation à la suite. Il se base sur le même principe car il s'agit de chauffer au mieux la pièce à souder mais cette fois-ci en évitant de souffler le liquide. Une torche de soudage a par conséquent un diamètre de sortie en moyenne 3 à 5 fois plus élevé qu'une torche de découpage [82].

La projection plasma consiste à déposer dans un état liquide ou partiellement fusionné des particules d'une centaine de μm sur un substrat préparé (généralement des métaux ou des oxydes métalliques). La température des plasmas thermiques est suffisamment élevée pour pouvoir mettre en fusion tous les matériaux, notamment ceux qui possèdent des températures de fusion très élevées. [83]. La sphéroïdisation est un procédé voisin de la projection plasma mais les particules introduites dans le plasma ne sont pas écrasées sur un substrat. Elles sont fondues, prennent une forme sphérique sous l'effet des forces de tensions superficielles puis sont trempées pour se solidifier et récupérées à l'état solide[82]. La société Tekna est l'un des leaders mondiaux dans ce domaine. Son procédé de sphéroïdisation est basé sur une torche RF fonctionnant à l'argon [84].

Dans le domaine de la gazéification (ou du reformage), F. Fabry et al. a récemment présenté un article de revue sur la gazéification des déchets par plasma thermique [12]., Comme décrite dans la première section de ce chapitre, la gazéification est un procédé qui permet de valoriser énergétiquement les biomasses, mais également d'autres déchets (déchets médicaux, pneus de voitures, fioul lourd ...). Le plasma permet de réduire la quantité de goudrons produite de plus de 40 % par rapport aux procédés de gazéification traditionnels, grâce à des températures supérieures. Le marché des torches plasma pour les procédés de gazéification est dominé par quatre sociétés : Westinghouse, Europlasma, Tetronics et Phoenix solution Company. A noter que l'on assiste actuellement à un regain d'intérêt pour le reformage à sec qui permet la valorisation (rétro-conversion) du CO_2 .

Les déchets organiques liquides peuvent également être traités par plasma. En 2007, N Boudescque a détaillé dans son mémoire de thèse un concept de décontamination et de gazéification d'effluents organiques aqueux à l'aide d'une torche plasma à arc immergé [85]. Plus tard, M. Mabrouk a présenté un procédé de destruction de déchets organiques liquides équipé d'une torche plasma à arc non transféré fonctionnant à l'oxygène comme gaz plasmagène [86]. Pour les déchets inorganiques, on rencontre des torches plasma dans la métallurgie extractive. Le plasma permet de fondre ces déchets pour en extraire les métaux précieux, comme le platine, le palladium ou l'or.

Pour finir, notons une application particulière des plasmas dans le domaine du craquage d'hydrocarbures (notamment du méthane) pour la co-synthèse de noirs de carbone et d'hydrogène. Sur la base des recherches sur la technologie plasma à arc triphasé initiées par L. Fulcheri et al. dans les années 90 [78] une installation pilote est actuellement en cours de développement industriel aux Etats-Unis [87].



Figure 25 : Installation SEAPORT I de Monolith Materials aux Etats-Unis pour la production de noir de carbone et d'hydrogène, développée en partenariat avec Mines ParisTech

4. Conclusion

Selon les projections des scénarios climatiques prévisionnels, la biomasse jouera un rôle important comme une énergie renouvelable propre du 21^{ème} siècle. La biomasse peut être catégorisée en trois grandes familles: les biocarburants, les biogaz et les biomasses solides. Les biocarburants et les biogaz sont des produits de procédés industriels relativement complexes et leurs parts dans le marché des biomasses restent marginales. Les biomasses solides sont plus abondantes et leur valorisation énergétique est moins complexe. Parmi les trois grandes familles de procédés de valorisation que sont la pyrolyse, la gazéification et la combustion, cette dernière contribue à elle-seule à 97 % de la production de bioénergie. A l'échelle industrielle, la combustion autonome et propre de la biomasse n'est pas chose aisée et constitue aujourd'hui, un véritable challenge scientifique. La principale difficulté vient du fait que la combustion à l'air de combustibles pauvres ne peut se réaliser qu'à haute température, ce qui la rend dépendante des conditions thermiques de la chambre de combustion. Trois nouveaux procédés de combustion sont actuellement à l'étude pour résoudre ce problème : (i) l'oxy-combustion qui souffre de la consommation énergétique élevé des systèmes annexes de production d'oxygène pur, (ii) la co-combustion qui nécessite l'utilisation d'autres combustibles fossiles coûteux et polluants et (iii) la combustion assistée par plasma qui est actuellement en voie de développement et présente un grand potentiel à la fois pour son rendement énergétique et pour son impact environnemental. En premier lieu, les plasmas garantissent un apport d'énergie sans émissions directes de CO₂, robuste, flexible et contrôlable dans une très large gamme de conditions opératoires et de températures pouvant aller au-delà des températures rencontrées dans les procédés de combustion traditionnels. En second lieu, les plasmas permettent d'améliorer les rendements de conversion et de réduire les impacts environnementaux de nombreux procédés industriels, de par leur capacité à produire des espèces chimiques très réactives. Actuellement, la solution d'électrobrûleur plasma pour l'assistance à la combustion est en train de se standardiser en Chine, grand pays consommateur de charbon. Cette technologie est également en cours de développement dans plusieurs pays de l'Europe de l'Est et aussi en France. En effet, les deux études technico-économiques que nous avons réalisées montrent le potentiel des électrobrûleurs plasma pour baisser les coûts liés à la consommation d'hydrocarbures pour la phase de démarrage et la phase de fonctionnement à faible charge des centrales thermiques à biomasse ou à charbon. Ceci confère aux chaudières équipées une meilleure flexibilité. La consommation électrique

de la torche dans un électrobrûleur ne devrait pas dépasser 2 %. Afin de bien appréhender leurs aspects technologiques, les principaux brevets d'électrobrûleurs plasma sont cités dans ce chapitre. Les torches plasma à arc sont les plus répandues dans les électrobrûleurs mais la technologie RF est également utilisée. Les torches plasma à arc se divisent en deux catégories : à courant continu et à courant alternatif. Dans la catégorie des torches AC, la torche plasma triphasée, développée au centre PERSEE depuis plus une vingtaine d'années pour des applications de production de matériaux carbonés, semble avoir un grand potentiel pour l'assistance à la combustion. Elle est caractérisée par une grande robustesse et une simplicité d'utilisation, une maintenance très limitée, un fonctionnement autonome et continu et un besoin minimal de refroidissement par eau. Cette technologie devrait permettre de baisser le CAPEX et l'OPEX de plus de 30 % dans un électrobrûleur industriel pour l'assistance à la combustion. Etant donné que cette torche est initialement conçue pour un fonctionnement en milieu neutre ou réducteur, nous allons développer une nouvelle torche plasma de 100 kW fonctionnant à l'air. Les différentes étapes de développement et de caractérisation expérimentale de cette torche sont détaillées dans le chapitre II.



Observations de la zone réactive en cours de fonctionnement de la nouvelle torche plasma