

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Technologies plasmas appliquées aux traitements thermiques des déchets nucléaires

M. Marchand, P. Charvin, S. François, A. Russello, R. Magnin,
K. Poizot, F. Lemont



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.140

Le sujet de cet article a été présenté oralement lors de la manifestation conjointe du colloque sur les arcs électriques et du workshop sur les arcs et contacts électriques (CAE-ACE) les 20 et 21 mars 2017 à Nancy (France).

L'article a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.

Technologies plasmas appliquées aux traitements thermiques des déchets nucléaires

Mickael Marchand ⁽¹⁾, Patrice Charvin ⁽¹⁾, Sébastien François ⁽¹⁾, Aldo Russello ⁽¹⁾,
Rodolphe Magnin ⁽¹⁾, Karine Poizot ⁽¹⁾, Florent Lemont ⁽¹⁾

(1) Laboratoire des Procédés Thermiques Innovants, CEA, DEN, DE2D, LPTI,
Commissariat à l'Energie Atomique, F-30207 Bagnols sur Cèze Cedex, France
mickael.marchand@cea.fr

Résumé – Cette étude décrit plusieurs procédés chimiques à hautes températures développés au Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives pour assurer le traitement de déchets issus de l'exploitation de la filière nucléaire. Ces procédés utilisent des technologies différentes de plasmas thermiques atmosphériques pour incinérer des familles de déchets organiques de formes et de compositions chimiques très variées.

Dans chaque cas, un plasma d'oxygène à haute puissance est établi à partir d'une torche à plasma d'induction ou à partir d'une ou plusieurs torches à plasma d'arc électrique soufflé ou transféré garantissant une parfaite combustion de la fraction organique du déchet à traiter par le procédé.

Mots clés : plasma, torche, incinération, déchet, combustion, procédé

DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.140

Introduction

Le Laboratoire des Procédés Thermiques Innovants (LPTI) du CEA Marcoule conçoit et qualifie des procédés thermochimiques appliqués aux traitements des déchets produits par l'industrie nucléaire. La pluralité et l'hétérogénéité chimique des déchets à traiter obligent le laboratoire à mener des recherches sur plusieurs procédés employant la technologie plasma afin d'assurer la destruction complète de la fraction organique du matériau entrant. Le chauffage par plasma permet d'atteindre localement et très rapidement des températures extrêmes. Cette propriété est mise à profit pour le traitement des déchets, car elle permet de décomposer la quasi-totalité d'entre eux, qu'ils soient solides, liquides, organiques ou organométalliques.

Dans chaque cas, un plasma thermique est établi par l'intermédiaire d'une ou plusieurs torches à plasma pour assurer la combustion du déchet. Un plasma thermique fonctionne en général à pression atmosphérique et à forte intensité. Il est caractérisé par la présence

d'espèces lourdes (ions, atomes, molécules) qui atteignent des températures voisine de la température des électrons. Ces plasmas sont définis par une densité électronique comprise entre 10^{13} et 10^{16} cm^{-3} et des températures locales pouvant être supérieures à 4000°C [1]. Différentes technologies permettent de générer un plasma thermique ; cela dépend de la manière dont est apportée l'énergie pour transformer le gaz en plasma. Cette énergie peut être apportée par exemple à partir d'un champ électromagnétique: on parle alors de plasma d'induction. Un courant électrique à haute fréquence circule à l'intérieur de plusieurs spires en cuivre pour induire un champ électromagnétique au cœur de l'inducteur et ioniser les molécules de gaz circulant à l'intérieur de la torche. Dans le cas d'un plasma d'arc, un arc électrique est créé entre deux électrodes à deux potentiels différents. Dans un premier cas, l'arc électrique est établi à l'intérieur de la torche comprenant deux électrodes (cathode et anode) séparées d'un isolant et ou circule un gaz permettant d'initier un plasma. On parle alors de plasma d'arc soufflé. Dans le cas d'une torche à plasma d'arc transféré, l'arc est créé entre une électrode interne à la torche et un point d'accrochage externe à la torche comme par exemple la surface à traiter. Cette technique permet de transférer et d'allonger l'arc électrique. On parle alors de plasma d'arc transféré. Dans chaque cas, le gaz plasma peut être de composition chimique variable : argon, oxygène, azote, vapeur d'eau, etc.

Quatre variantes technologiques de torche à plasma, détaillées ci-après, sont actuellement utilisées au laboratoire et intégrées dans quatre procédés différents de traitement de déchets.

1. Torche à plasma d'arc transféré appliqué au procédé SHIVA

Le procédé SHIVA, acronyme de Système Hybride d'Incinération Vitrification Avancée, met en œuvre un plasma d'arc transféré en utilisant deux torches à plasma jumelées bipolaires. Ce procédé est l'aboutissement de plus de dix années de recherche ayant eu pour objectif d'assurer le traitement de déchets organiques allant jusqu'à la vitrification de leurs charges minérales [2]. La nécessité de rendre compact les équipements dans l'objectif de faciliter leur implantation dans des espaces ionisants confinés (cellules blindées, boîtes à gants) a conduit à retenir un procédé couplant à la fois deux technologies de chauffage : le creuset froid et des torches à plasma. Le cœur du réacteur procédé SHIVA est illustré sur les Figures 1a et 1b.

Dans sa configuration actuelle, le procédé SHIVA comprend un système inductif assurant le maintien en fusion du verre ($1000-1100^\circ\text{C}$) qui absorbe les minéraux contenus dans les déchets introduits progressivement en partie haute du réacteur, au fur et à mesure qu'ils brûlent à la surface. Les torches à plasma d'oxygène, assurent l'apport d'énergie nécessaire à la combustion de la charge organique du déchet et à la rapide et totale oxydation des minéraux avant qu'ils intègrent la matrice vitreuse. En plus de ce rôle majeur, les torches à plasma permettent d'initier la fusion du verre. Elles assurent également la postcombustion des gaz en maintenant une température importante ($800-1200^\circ\text{C}$) sous la voûte. Chaque torche est composée d'une électrode centrale mobile en graphite sacrificielle centrée à l'intérieur d'un corps externe en inox refroidi par un circuit d'eau. Les embouts de chaque torche sont composés également d'un diffuseur cylindrique cannelé en nitrure d'aluminium. Le plasma est initié par mise en contact des deux électrodes en graphite (Figure 2a) puis entretenu par un gaz plasmagène constitué d'un mélange d'oxygène et d'argon ratio 25/75 % vol.) fonctionnant à un débit total de l'ordre de $160 \text{ L}\cdot\text{mn}^{-1}$. Cette configuration assure un plasma d'oxygène d'une puissance utile proche de 35 kW (Figure 2b).

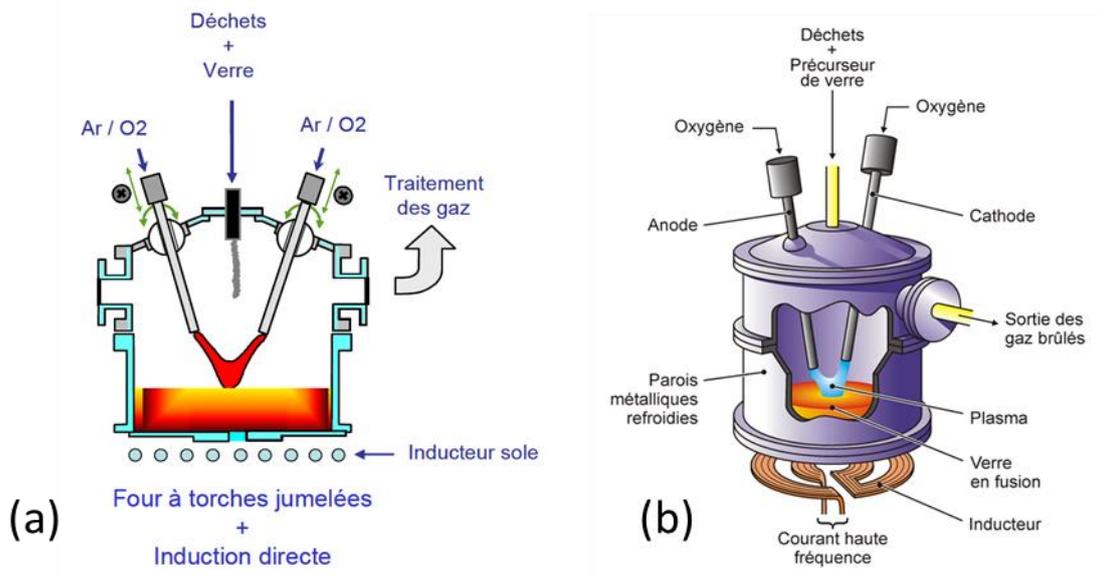


Figure 1. Vue coupe 2D (a) et représentation 3D (b) du réacteur procédé SHIVA comprenant deux torches à plasma inclinées de type arc transféré au-dessus d'un bain de verre en fusion chauffé par induction électromagnétique.

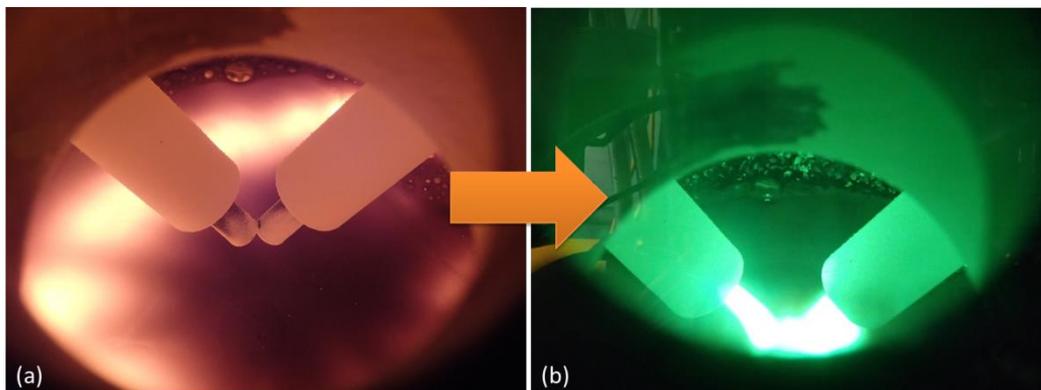


Figure 2. Visuels de l'extrémité des 2 torches à plasma du procédé SHIVA localisées au-dessus du bain verre en fusion. (a) Electrodes en graphite mises en contact avant amorçage de l'arc. (b) Cliché visuel du plasma d'oxygène après amorçage de l'arc et écartement des torches. La couleur verte est due au filtre UV placé au niveau du hublot d'observation.

2. Le plasma d'induction appliqué au procédé IDOHL

Si les activités industrielles nucléaires ou de recherches produisent des déchets solides ayant une activité plus ou moins importante, elles produisent également des effluents liquides. Afin de trouver un exutoire pour ce type de déchets, le CEA a développé un procédé basé sur l'utilisation d'un plasma inductif similaire aux techniques d'analyse de type ICP. La technique consiste à remplacer les solutions à analyser par les effluents à traiter au cœur d'une spire d'induction, tel que cela est représenté sur la Figure 3. Ce procédé, appelé IDOHL et dont l'acronyme Incinération et Destruction d'Organo HaLogéné, est développé pour assurer

le traitement de solutions de scintillation chargées en carbone 14 ou en tritium (effluents organiques sans charge minérale) utilisées dans différents laboratoires d'organismes de recherche [3].

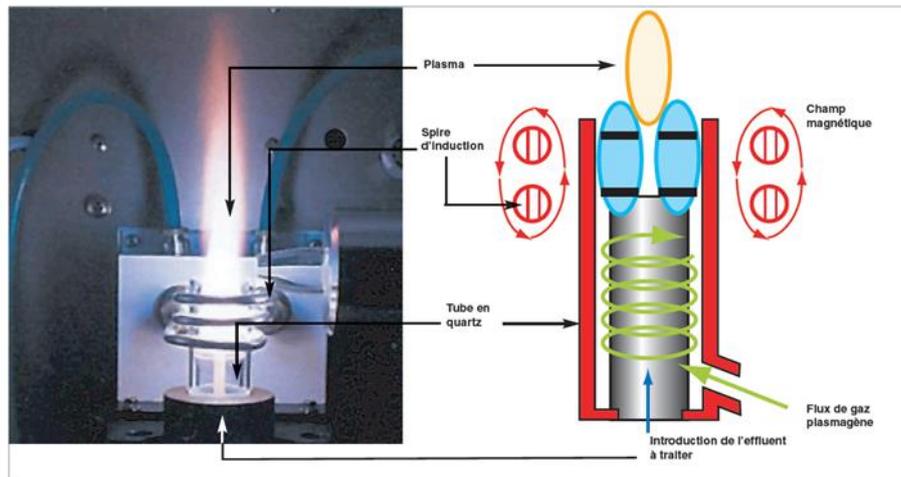


Figure 3. Visuel et principe de fonctionnement de la torche à plasma d'induction intégrée dans le procédé IDOHL. Des spires d'induction induisent un champ électromagnétique à l'intérieur d'un tube en quartz où circulent le gaz plasmagène et l'effluent liquide à brûler.

Initialement conçu pour fonctionner avec de l'eau comme comburant en complément d'un gaz plasmagène d'argon, le procédé IDOHL a été mis à niveau pour utiliser de l'oxygène comme vecteur comburant. L'introduction du liquide organochloré se fait à l'intérieur d'une canne d'alumine tubulaire centrée à l'intérieur d'un tube externe en quartz. L'injection d'O₂ gazeux ainsi que l'injection de la charge liquide s'effectue simultanément. Le mélange est directement injecté au cœur du plasma (2000 à 5000°C). A cette température, les molécules s'atomisent, s'ionisent puis se réorganisent dans le réacteur sous forme gazeuse. Le procédé dans son ensemble comprend un étage chimique réactionnel, un étage de postcombustion, une chambre de recombinaison et un système de traitement de gaz permettant de garantir une recombinaison des espèces dissociées en composés neutres pouvant être rejetés dans l'atmosphère à l'exception des halogènes.

3. Un plasma d'arc soufflé appliqué au procédé ELIPSE

Depuis quelques années, un nouveau procédé d'incinération est en cours de développement au CEA Marcoule. Appelé ELIPSE (Elimination de LIquides par Plasma Sous Eau) [4], ce procédé a pour objectif de traiter une gamme étendue d'effluents organiques chargés à fort pouvoir calorifique. Sa principale originalité : une source thermique délivrée par une torche à plasma d'arc soufflé fonctionnant en immersion dans un réacteur rempli d'eau (Figure 4). La technologie de la torche plasma utilisée ici est de type cathode chaude. Un arc électrique est généré entre l'extrémité de la cathode et un diaphragme pour ioniser le gaz circulant à l'intérieur de la torche. Cet arc est ensuite établi entre la cathode et une anode. Ce modèle de torche permet d'établir un plasma d'oxygène d'une puissance utile de 27 kW (teneur en oxygène > 80 % vol., Argon < 20% vol.) à partir d'une puissance électrique de 40 kW. Cette puissance est mise à contribution pour détruire de façon quasi-instantanée un effluent

organique injecté directement en sortie de torche au plus proche du jet plasma par l'intermédiaire d'une tuyère plasma sectorisée.

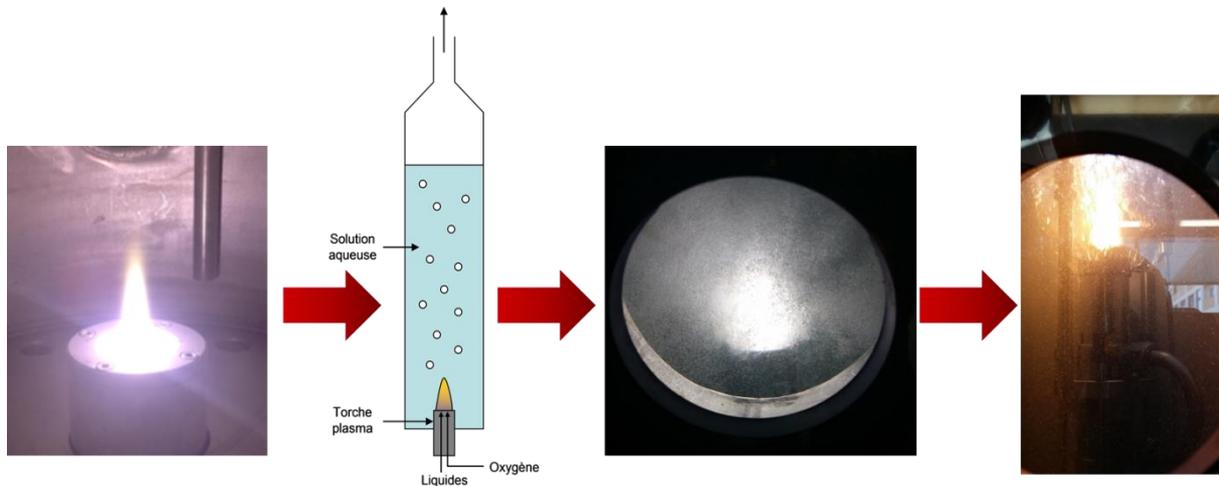


Figure 4. Clichés visuels de l'extrémité en fonctionnement de la torche plasma dans le réacteur procédé ELIPSE. A gauche : torche seule dans le réacteur à l'air libre. Au centre : torche seule en immersion dans de l'eau. A droite : ensemble torche + tuyère plasma en immersion.

Ce procédé, issu d'une collaboration établie initialement entre le CEA et le laboratoire de chimie des plasmas de l'université de Limoges, a été validé à l'échelle du laboratoire. Il est depuis en cours de qualification sur un pilote échelle 1 implanté au CEA Marcoule. Les résultats établis à partir de mélanges simulants (familles de composés soufrés type TBP/dodécane, chlorés type trichloréthylène ou chloroforme) soulignent de très bonnes efficacités de destruction.

4. Un plasma d'arc de forte puissance pour un nouveau procédé industriel de traitement de déchet

Un autre procédé est actuellement en cours de développement au CEA Marcoule, en lien avec l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) et l'industriel AREVA. Ce procédé a pour objectif de traiter et conditionner une catégorie de déchets technologiques solides, mélange de métaux et de matières organiques (vinyles, polyéthylène, gants en polymères) produits principalement lors du recyclage du combustible nucléaire par l'industriel AREVA [4].

Ce procédé appelé PIVIC (Procédé d'Incinération Vitrification In Can), vise à traiter et à conditionner les déchets en une seule étape. Son principe : les déchets sont introduits dans un four et sont incinérés par une torche à plasma situé au-dessus d'un bain de verre fondu (Figure 5). Les cendres résultantes sont incorporées au verre et le métal fondu se retrouve au fond du creuset qui constitue le conteneur primaire du déchet.

Pour y parvenir, une torche à plasma industrielle de haute puissance (Puissance électrique 300 kW) fournie par l'équipementier EUROPLASMA est intégrée à l'intérieur d'une chambre de combustion. Cette torche est de type arc soufflé mais présente la particularité de présenter une cathode et une anode « creuses » car constituées chacune d'une électrode tubulaire à paroi refroidie. Cette déclinaison de torche fonctionnera exclusivement sous gaz plasmagène

d'oxygène et permettra d'atteindre une puissance plasma utile maximale de 160 kW pour les besoins du procédé.

Le prototype PIVIC est actuellement en cours de construction au CEA et sera opérationnel dès 2018 sur des matériaux modèles non radioactifs. Une fois ce prototype qualifié, un pilote industriel sera construit prochainement à l'usine de La Hague pour assurer le traitement de colis réels radioactifs.

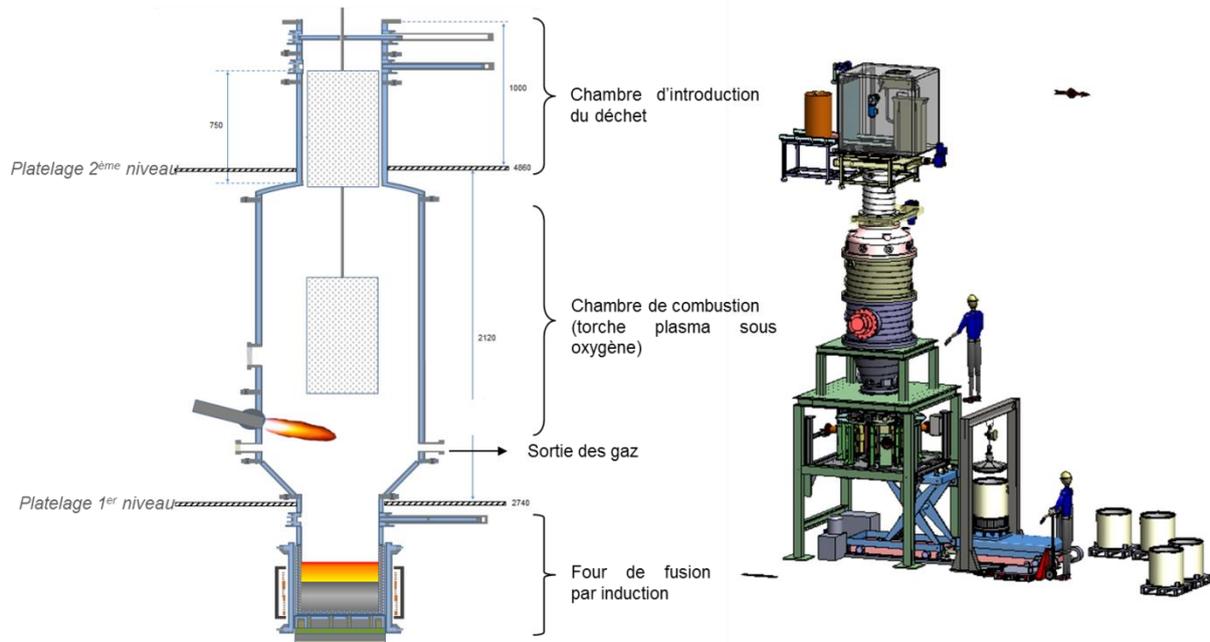


Figure 5. Représentation schématique 2D et 3D du cœur du procédé PIVIC. Un colis de déchet solide est introduit en partie haute d'une chambre de combustion comprenant une torche à plasma d'arc soufflé. Les cendres minérales et matières métalliques résultantes sont vitrifiées en partie basse du procédé dans un four d'induction

Conclusion

Le Tableau 1 synthétise les quatre procédés en cours de développement au CEA Marcoule. En fonction des propriétés spécifiques du déchet ou de l'effluent à traiter, différentes variantes technologiques de torches à plasma sont utilisées pour incinérer la fraction organique d'un déchet solide et/ou liquide dans un milieu oxydant. La technologie mise en œuvre est aussi sélectionnée en fonction de la puissance thermique minimale nécessaire pour traiter chaque type de déchet (nature et composition chimique, débits nominaux de traitement, etc.) ainsi que des contraintes d'exploitation du procédé (compacité, environnement, milieu ionisant, etc.). Pour chaque procédé, les différentes torches à plasma nécessitent des optimisations technologiques pour garantir un double objectif : proposer une technologie flexible à l'évolution de plusieurs paramètres opératoires et d'autre part proposer un équipement robuste présentant une durée de vie compatible avec les exigences d'exploitation en milieu industriel.

Procédé	SHIVA	IDOHL	ELIPSE	PIVIC
Technologie plasma	Plasma d'arc transféré	Plasma d'induction	Plasma d'arc soufflé	Plasma d'arc soufflé
Type d'électrodes	Electrodes pleines en graphite	Aucune électrode	Cathode pointe pleine Anode tubulaire creuse	Electrodes amont et aval tubulaires creuses
Puissance électrique plasma	55 kW	5 kW	40 kW	300 kW
Puissance utile déposée dans le plasma	35 kW	2 kW	27 kW	160 kW
Durée de fonctionnement de la torche avant opération de maintenance	>200 h	> 500 h	20 h avant remplacement de l'anode	Estimé > 30 h
Nature et type de déchets traités	Déchets solides organiques et/ou mixtes Peut traiter quelques liquides	Effluents liquides dits organiques purs type scintillants Ex : méthanol, triméthylbenzene, dérivé ethanol, etc.	Effluents liquides organiques variés (phosphorés, chlorés, fluorés, soufrés, etc.) Ex : TPB, trichloréthylène, huiles perfluorées	Déchets solides mixtes organométalliques
Débits de traitement	5 à 10 kg/h	0,2 L/h	1 à 6 L/h	Jusqu'à 30 kg/h de matières organiques

Tableau 1. Tableau récapitulatif des procédés plasmas en développement au CEA Marcoule.

Remerciements

Financement CEA, projet ANR MILOR, AREVA, ANDRA.

Références

- [1] Gilles Laroche (1991), Les plasmas dans l'industrie, Dopee85, 699 pages, ISBN 2-86995-017-9
- [2] CEA – Conditionnement des déchets nucléaires. [Consulté le 19/01/2017]. Disponible sur : <http://www.cea.fr/Documents/monographies/Conditionnement-d%C3%A9chets-nucl%C3%A9aires-recherche.pdf>.
- [3] G. Kamgang-Youbi, K. Poizot and F. Lemont, (2013), Inductively coupled plasma torch efficiency at atmospheric pressure for organo-chlorine liquid waste removal : Chloroform destruction in oxidative conditions, Journal of Hazardous Materials, 171-179.

- [4] M. Mabrouk, (2012), Contribution au développement d'un procédé d'incinération de déchets organiques liquides par plasma d'arc immergé, Thèse de doctorat, Université de Limoges. Faculté des sciences et techniques, 150 pages.
- [4] CEA – Dossier sur le cycle du combustible. [Consulté le 19/01/2017]. Disponible sur : <http://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/dossier-cycle-du-combustible-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=3>