

# Électrification des fours réverbères de refusion d'aluminium par torche plasma : enjeux thermiques sur un démonstrateur industriel

## Electrification of Aluminum Reverberatory Furnaces Using Plasma Torch: Thermal Challenges on an Industrial Demonstrator

Louis PIQUARD<sup>1\*</sup>, Simon VECTEN<sup>2</sup>, Pierre CELLE<sup>1</sup>, Ali SHAHVERDI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Constellium Technology Center, Parc Economique Centr'alp CS10027, 38341, Voreppe, France

<sup>2</sup>PyroGenesis Inc. 1100 René-Lévesque Boulevard West, Suite 1825, Montréal, QC, H3B 4N4, Canada

\*(auteur correspondant : [louis.piquard@constellium.com](mailto:louis.piquard@constellium.com))

**Résumé** - Ce travail étudie l'électrification des fours réverbères d'aluminium par torche plasma à arc non transféré, dans le cadre du dimensionnement d'un démonstrateur industriel. Des simulations CFD stationnaires ont été réalisées pour analyser l'impact de la puissance injectée et du pouvoir fumigène sur les transferts thermiques et l'efficacité énergétique. Les résultats montrent une efficacité thermique supérieure au gaz naturel et une sélectivité accrue vers le métal, ouvrant des perspectives pour réduire le temps de fusion et optimiser les réglages lors des essais prévus en 2026.

**Abstract** - This work investigates the electrification of aluminum reverberatory furnaces using a non-transferred electric arc plasma torch as part of the design of an industrial demonstrator. Steady-state CFD simulations were performed to analyze the impact of torch power and plasma enthalpy on heat transfer and energy efficiency. Results show higher heating efficiency compared to natural gas and improved selectivity toward the metal, opening perspectives for reducing melting time and optimizing operating parameters for trials planned in 2026.

### Nomenclature

|                         |                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $\eta_{\text{chauffe}}$ | Efficacité de chauffe du four                                           |
| $\eta_{\text{torche}}$  | Efficacité thermique de la torche plasma                                |
| $SEC$                   | Consommation d'énergie spécifique, kWh/t                                |
| $P_{\text{net}}$        | Puissance nette injectée dans le four, kW                               |
| $P_{\text{utile}}$      | Puissance utile transférée aux parois et au métal, kW                   |
| $PF$                    | Pouvoir fumigène, Nm <sup>3</sup> /kWh                                  |
| $c_p$                   | Capacité calorifique molaire moyenne des fumées, kWh/Nm <sup>3</sup> /K |
| $T_{\text{fumées}}$     | Température des fumées à la cheminée, K                                 |
| $PCI$                   | Pouvoir calorifique inférieur, kWh/Nm <sup>3</sup>                      |

## 1. Introduction

La décarbonation des fours de refusion d'aluminium s'inscrit dans un mouvement global de réduction des émissions des procédés thermiques, où la refusion reste un poste majeur de consommation énergétique et d'émissions directes. Les études récentes montrent que la production secondaire, bien que vingt fois moins énergivore que la production primaire, repose encore largement sur l'utilisation du gaz naturel pour la fusion, ce qui expose les sites à la volatilité des prix de l'énergie et aux contraintes réglementaires liées aux émissions CO<sub>2</sub>. L'électrification est identifiée comme un levier majeur pour atteindre les objectifs de neutralité

carbone, mais elle soulève des défis considérables lorsqu'il s'agit d'adapter des équipements existants [1]. Parmi les solutions envisagées, la torche plasma à arc non transféré se distingue par sa capacité à être intégrée par « retrofit » sur des fours réverbères, sans modification majeure de l'enceinte [2] [3], mais le procédé de refusion par plasma reste peu mature (TRL 4) [4].

C'est dans ce contexte que Constellium et PyroGenesis ont engagé un projet de démonstration industriel visant à remplacer un brûleur gaz naturel par une torche plasma azote APT-HP™ [5] PyroGenesis à arc non transféré, d'une puissance maximale de 1 MW, et installée sur un four réverbère d'une capacité de refusion de deux tonnes sur le site de R&D de Constellium à Voreppe. Ce projet prolonge des essais à échelle laboratoire et pilote réalisés en 2023, qui ont montré que la refusion d'aluminium par torche plasma pouvait atteindre des performances thermiques équivalentes à une solution de brûleur oxygène – gaz naturel, sans dégradation de la qualité du métal, ce qui valide la faisabilité d'un passage à l'échelle industrielle [2]. Par ailleurs, ces travaux à échelle laboratoire ont également permis de montrer l'intérêt de l'azote comme gaz plasmagène, en tant que solution pour réduire les émissions NO<sub>x</sub> à moindre coût. Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans la phase de dimensionnement de ce démonstrateur et visent à caractériser, par simulation, l'influence des paramètres opératoires de la torche – puissance nette et pouvoir fumigène – sur les mécanismes de transfert de chaleur et la performance énergétique du four.

Sur le plan numérique, les récents travaux de Pakanati et al. [3] ont montré que l'utilisation de torche à plasma azote non-transféré aboutit généralement à des températures dans la chambre de combustion inférieures à 6000 K, et donc à une forte réduction du rayonnement émis par les fumées par rapport aux brûleurs existants.

Sur cette base, la question scientifique abordée est la suivante : dans un four réverbère de refusion d'aluminium, la forte réduction du rayonnement gazeux liée à l'utilisation d'une torche plasma à azote peut-elle être compensée par la convection forcée du jet, de manière à maintenir ou améliorer l'efficacité de chauffe et la sélectivité en faveur du métal ? Pour y répondre, une campagne de calculs CFD stationnaires a été menée, couvrant un plan d'expériences sur différents paramètres opératoires d'une torche plasma. Cette approche permet d'analyser les champs de température et de vitesse, d'évaluer les bilans surfaciques et les pertes par la cheminée, et d'estimer l'efficacité de chauffe ainsi que la consommation spécifique projetée à l'échelle du cycle, en s'appuyant sur des modélisations simplifiées connues de la littérature [6] [7].

## **2. Présentation du procédé et de la méthode de simulation**

La refusion d'aluminium en four réverbère est un procédé discontinu qui consiste à fondre des charges solides pour alimenter les étapes de coulée, présenté en détail par Schmitz [7]. Le four de démonstration utilisé pour ce projet est un four d'une capacité de refusion maximale de 1,8 tonne. Malgré sa faible capacité de refusion en comparaison avec d'autres fours à échelle industrielle, ce four reste représentatif du procédé, à la fois dans son utilisation et ses performances. Ce four est actuellement équipé d'un brûleur gaz naturel – air non préchauffé, réglé avec un excès d'air permettant d'assurer une concentration de 3% d'oxygène sur fumées sèches.

Dans la continuité des travaux de simulation, la torche plasma APT-HP sera installée sur le four de démonstration à l'été 2026, en remplacement du brûleur gaz naturel et en conservant la même géométrie d'implantation. En parallèle de cette intégration, deux fluxmètres seront également installés en voûte du four et permettront notamment d'isoler expérimentalement la part du rayonnement et de la convection dans le transfert de chaleur vers l'enceinte. Ces mesures

fourniront des données de référence pour comparer les grandeurs observées avec les résultats des modèles stationnaires présentés dans ce travail.

Lors d'un cycle de fusion sur ce four, le métal froid est introduit dans le four préchauffé à 750°C, la température d'indexation du four pour la coulée précédente, puis la fusion démarre avec le brûleur fonctionnant à sa puissance maximale (600 kW) jusqu'à ce que la température de surface de la voûte du four atteigne sa consigne de 900°C. Cette phase est suivie d'une régulation de la puissance pour maintenir cette température jusqu'à ce que le métal atteigne 725°C, température cible pour la suite du procédé. Actuellement, ce four permet de refondre 1,8 tonne d'aluminium en 2,8 heures et avec une consommation spécifique de gaz naturel de 870 kWh<sub>PCI</sub>/t<sub>Al</sub>. La Figure 1 présente une photo du démonstrateur avant ce projet de retrofit vers un système de torche à plasma.

La géométrie utilisée pour la simulation correspond uniquement au volume fluide interne du four réverbère, extraite des plans industriels, et est présentée en Figure 2. Ainsi, l'épaisseur des parois réfractaires et la profondeur du bain d'aluminium ne sont pas prises en compte et la simulation n'inclut pas la conduction dans les parois. Les surfaces solides (parois et bain métallique) sont donc imposées isothermes, ce qui permet d'obtenir un "instantané" représentatif d'un milieu de cycle, sans recourir à des simulations transitoires dont le coût serait prohibitif pour l'étude paramétrique menée ici.

Certaines simplifications géométriques du four ont également été introduites pour réduire la complexité numérique. L'aluminium est représenté par une surface équivalente à 1,8 tonne de métal (soit une surface de bain de 2,8 m<sup>2</sup>) avec une température de surface fixée à 600°C. Les parois internes du four sont fixées à 900°C afin de reproduire la consigne de température du four utilisée en exploitation. Le modèle ne permet donc pas de représenter les gradients thermiques dans les parois du four ni les échanges thermiques par rayonnement entre les parois. La hauteur des murs entre la surface du métal et la voûte est de 1,3 m. La torche plasma est positionnée exactement à l'emplacement du brûleur gaz naturel.



Figure 1 : Photo du four réverbère équipé d'un brûleur gaz naturel (configuration actuelle).

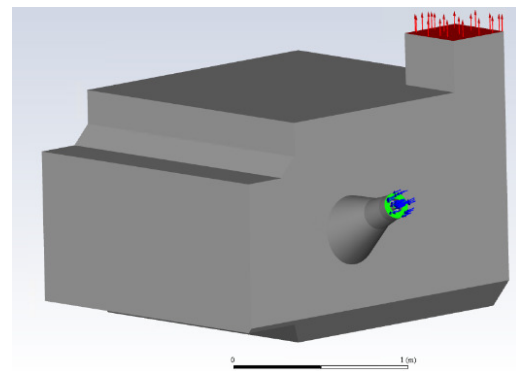


Figure 2 : Simplification géométrie four et volume fluide pour la simulation gaz naturel

Les maillages utilisés pour le cas brûleur et le cas plasma sont présentés en Figure 3 et Figure 4 respectivement. Le maillage est de type polyédrique avec différentes couches limites pour mieux capturer les gradients thermiques et de vitesse.

Les calculs ont été réalisés sous ANSYS Fluent®. Pour le cas plasma, le gaz utilisé est composé uniquement d'azote, avec une émissivité quasi nulle aux niveaux de température de cette application [3]. Pour le brûleur gaz naturel, l'ensemble des espèces CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et N<sub>2</sub> sont prises en compte. Les propriétés thermophysiques des gaz proviennent de bases de données disponibles dans ANSYS Fluent® pour le cas du brûleur et de la base de données de PyroGenesis pour les cas plasma.

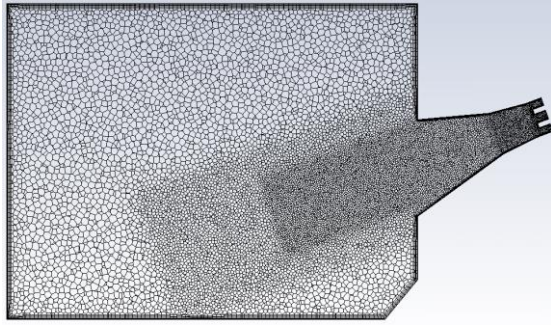


Figure 3 : *Maillage cas brûleur*

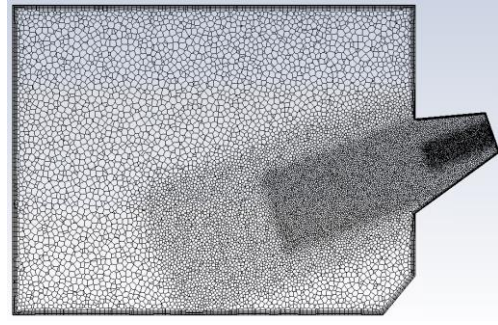


Figure 4 : *Maillage cas plasma*

Pour l'ensemble des simulations stationnaires présentées, le diamètre de la cheminée est ajusté pour assurer une pression de 50 mbar. Pour le cas de référence avec le brûleur gaz naturel, le mélange  $\text{CH}_4/\text{air}$  est injecté avec un excès d'air de 120%, réparti entre 30% d'air primaire et 70% d'air secondaire et une puissance de chauffe de  $600 \text{ kW}_{\text{PCI}}$ .

Pour les cas plasma et afin d'évaluer l'influence des conditions opératoires sur les transferts thermiques, douze cas ont été simulés en régime stationnaire. Ils combinent quatre niveaux de puissance nette injectée dans le four (300, 400, 500 et  $600 \text{ kW}$ ) et trois valeurs d'enthalpie représentatives de la plage opérationnelle de la torche. L'ensemble des cas plasma utilise de l'azote pur comme gaz plasmagène. Cette enthalpie de fonctionnement est la densité d'énergie par volume de gaz (exprimé en  $\text{kWh}/\text{Nm}^3$ ), correspondant à l'inverse du pouvoir fumigène (exprimé en  $\text{Nm}^3/\text{kWh}$ ) et qui est classiquement utilisé en combustion pour évaluer le volume de fumées généré par  $\text{kWh}$  de combustible brûlé.

L'efficacité thermique de la torche correspond au ratio entre la puissance nette délivrée dans le four et la puissance électrique brute réellement apportée à la torche, et permet de prendre en compte la perte thermique due à son refroidissement.

### 3. Résultats CFD et discussion

#### 3.1. Cas de référence et comparaison des champs de température et de vitesse

Deux cas de référence ont été retenus pour analyser les mécanismes de transfert thermique : le cas du brûleur gaz naturel à  $600 \text{ kW}_{\text{PCI}}$  et le cas plasma à  $400 \text{ kW}_{\text{net}}$  en basse enthalpie, c'est-à-dire avec un pouvoir fumigène élevé. Ce dernier a été choisi car il permet d'obtenir une quantité d'énergie utile transférée aux parois et au métal comparable à celle du cas gaz naturel (voir Figure 11), ce qui permet une comparaison à iso-puissance utile.

Les Figures 5 à 8 présentent les champs de température et de vitesse dans le plan axial du brûleur pour ces deux cas. On observe que la torche plasma génère des températures maximales beaucoup plus élevées, atteignant  $4300 \text{ K}$  contre  $2200 \text{ K}$  pour le brûleur gaz naturel. Il est important de noter que, malgré ces valeurs élevées, la température du jet plasma reste inférieure à  $6000 \text{ K}$ ; l'azote est donc quasi inactif pour le rayonnement [3], et les transferts vers les parois sont dominés par la convection forcée. Cette tendance se confirme pour l'ensemble des puissances et enthalpies étudiées. La température moyenne dans la chambre est également plus élevée pour le plasma. Ceci s'explique principalement par un débit de gaz et une capacité calorifique plus faibles pour le cas plasma.

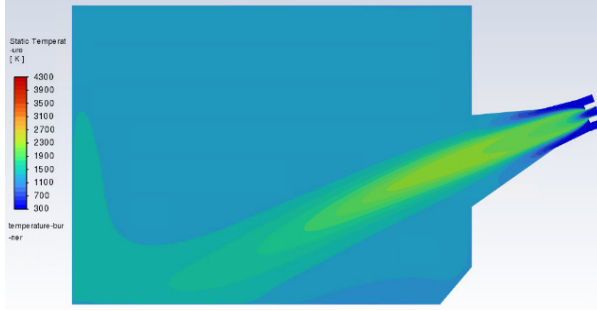


Figure 5 : *Champ de température – cas gaz naturel (600 kW<sub>PCI</sub>).*



Figure 6 : *Champ de température – cas plasma (400 kW<sub>net</sub>, basse enthalpie).*

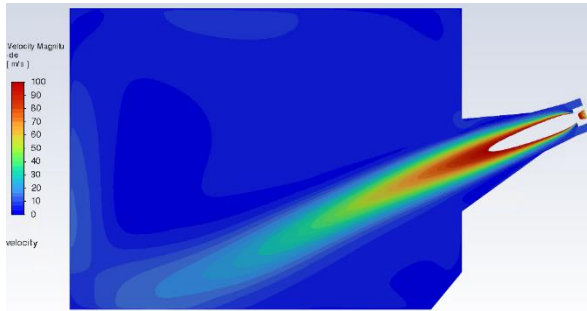


Figure 7 : *Champ de vitesse – cas gaz naturel (600 kW<sub>PCI</sub>).*

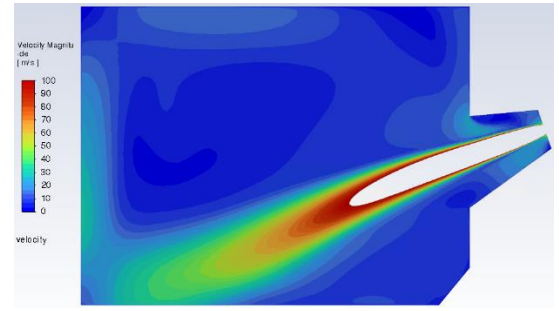


Figure 8 : *Champ de vitesse – cas plasma (400 kW<sub>net</sub>, basse enthalpie).*

Les gradients de vitesse révèlent des différences marquées entre les deux modes de chauffe. Malgré un débit global plus faible pour le plasma, les vitesses locales sont plus élevées, en raison de l'injection plus concentrée du jet. L'écoulement impacte directement la surface d'aluminium avant de remonter vers la paroi opposée, puis vers la voûte, avec une atténuation progressive du gradient. Ces différences dans la dynamique des gaz influencent la distribution des flux thermiques entre le métal et les parois, ce qui sera discuté plus loin.

### 3.2. Évaluation des rendements et des transferts thermiques

Les rendements et bilans énergétiques présentés dans cette section sont obtenus par post-traitement des résultats CFD stationnaires. Les températures de fumées en sortie, les flux thermiques échangés avec le métal et les parois, ainsi que les pertes à la cheminée sont extraits du modèle CFD, puis utilisés pour calculer les indicateurs de performance selon les définitions issues de la littérature [6].

Pour comparer les cas et quantifier les pertes à la cheminée, nous introduisons une efficacité de chauffe définie comme le rapport entre la puissance utile transférée aux parois internes (métal + réfractaires) et la puissance nette injectée dans l'enceinte. Cette efficacité de chauffe est équivalente à l'efficacité de combustion généralement utilisée pour les fours à flamme [6, 7], mais a été renommée ici car le terme « combustion » est considéré non approprié dans le cas de la torche plasma. Cette grandeur permet de rendre compte des pertes par la cheminée et peut s'exprimer sous la forme :

$$\eta_{\text{chauffe}} = 1 - \text{PF } c_p (T_{\text{fumées}} - T_0) \quad (1)$$

où le pouvoir fumigène (PF), exprimé en Nm<sup>3</sup>/kWh<sub>PCI,net</sub>, est également une notion reprise à la littérature de la combustion et correspond ici au volume d'azote soufflé dans le four par kWh d'électricité consommée,  $c_p$  la capacité calorifique moyenne molaire des fumées et exprimée

en kWh/Nm<sup>3</sup>/K,  $T_{\text{fumées}}$  la température de sortie, et  $T_0$  une température de référence (air ambiant).

Sur la base de cette efficacité instantanée, et en supposant qu'elle soit représentative du cycle de fusion complet, on extrapole la consommation d'énergie spécifique (SEC) d'un cycle plasma à partir du cas de référence gaz naturel connu,  $SEC_{\text{ref}} = 870 \text{ kWh}_{\text{PCI}}/t_{\text{Al}}$ , via [6] :

$$SEC = SEC_{\text{ref}} \frac{\eta_{\text{chauffe,ref}}}{\eta_{\text{chauffe}} \eta_{\text{torche}}} \quad (2)$$

où  $\eta_{\text{torche}}$  est l'efficacité de la torche (pertes par refroidissement)

Les Figure 9 et Figure 10 présentent respectivement l'efficacité de chauffe et la consommation d'énergie spécifique pour l'ensemble des cas simulés et pour les différents modes d'enthalpie de la torche à plasma présentés précédemment.

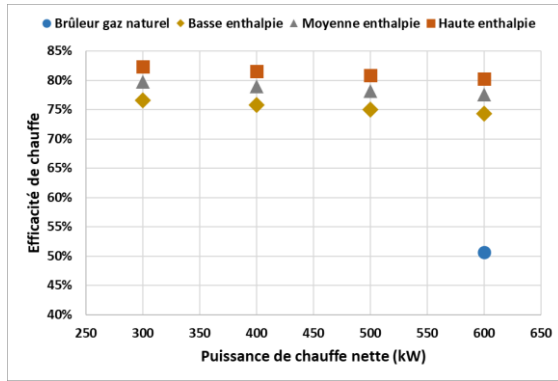


Figure 9 : Évolution de l'efficacité de chauffe en fonction du pouvoir fumigène et de la puissance nette des différents cas plasma comparés au gaz naturel.

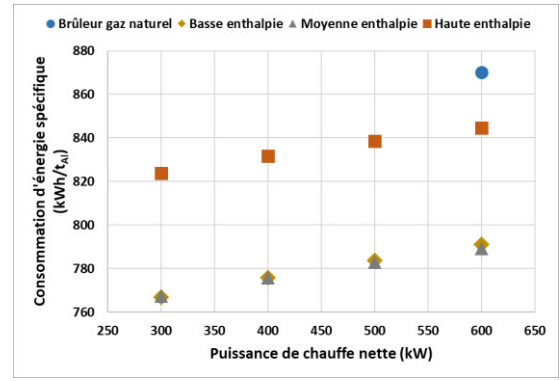


Figure 10 : Consommation d'énergie spécifique estimée pour les différents cas plasma comparée au gaz naturel.

Malgré des températures de fumées plus élevées en plasma, tous les cas plasma montrent une efficacité de chauffe supérieure au gaz naturel. La raison est double : la capacité calorifique moyenne des fumées à base d'azote est plus faible que celle d'un mélange de produits de combustion, et surtout les pouvoirs fumigènes retenus font baisser fortement le débit de fumées par kWh net. À puissance nette donnée, augmenter le pouvoir fumigène (fonctionnement à basse enthalpie) accroît le débit et réduit la température de jet, ce qui tend à diminuer l'efficacité de chauffe ; on observe bien cette baisse de l'efficacité lorsque la torche est utilisée à plus basse enthalpie. Par ailleurs, l'efficacité de chauffe décroît légèrement avec la puissance nette : à haut flux, les limitations convectives et l'élévation de  $T_{\text{fumées}}$  accroissent mécaniquement les pertes sensibles.

La SEC tient compte de l'efficacité de la torche, qui dépend aussi de l'enthalpie de fonctionnement. Néanmoins, l'ensemble des cas plasma reste plus performant énergétiquement que le brûleur, avec des gains pouvant atteindre  $\sim 100 \text{ kWh}/t_{\text{Al}}$  pour les réglages optimaux (soit une réduction de la consommation d'énergie du procédé de refusion de 11,5%), en plus du changement de vecteur énergétique et de la décarbonation associée.

L'efficacité de chauffe donne également accès à la puissance utile transférée à l'enceinte et au métal, via [6] :

$$P_{\text{utile}} = \eta_{\text{chauffe}} P_{\text{net}} \quad (3)$$

La Figure 11 montre que, à puissance utile donnée, le plasma présente un avantage décisif : 600 kW<sub>PCI</sub> gaz naturel sont équivalents à  $\sim 400 \text{ kW}_{\text{net}}$  plasma en termes de puissance utile interne

(d'où le choix du cas  $400 \text{ kW}_{\text{net}}$  – basse enthalpie comme référence plasma). La Figure 12 reporte ensuite le flux total reçu par l'aluminium en fonction de  $P_{\text{utile}}$ , révélant la sélectivité du four.

Lorsque les deux cas de référence sont comparés à iso-puissance utile, le plasma transfère  $\sim 20 \text{ kW}$  de plus vers le métal : la convection forcée dirigée par le jet et son impact frontal sur le bain accroissent le partage en faveur de l'aluminium, tandis que, pour le gaz naturel, le rayonnement des produits de combustion tend à homogénéiser les flux entre parois (métal inclus) et réfractaires. Cette sélectivité accrue suggère qu'à puissance installée égale, la torche plasma pourrait réduire le temps de fusion. Cette conclusion reste hypothétique (nos calculs sont stationnaires, l'aluminium fixé à  $600^\circ\text{C}$ ), et devra être confirmée de façon expérimentale au démarrage du démonstrateur. À l'inverse, les cas plasma à  $300 \text{ kW}_{\text{net}}$  laissent présager des temps de fusion proches de l'actuel cycle gaz naturel, du fait de niveaux de flux utiles et de sélectivité comparables.

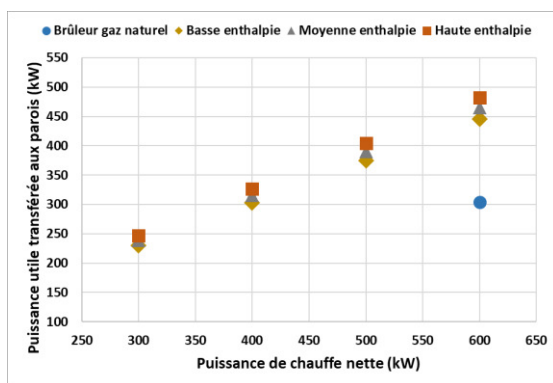


Figure 11 : Puissance utile transférée à l'enceinte en fonction de la puissance nette.

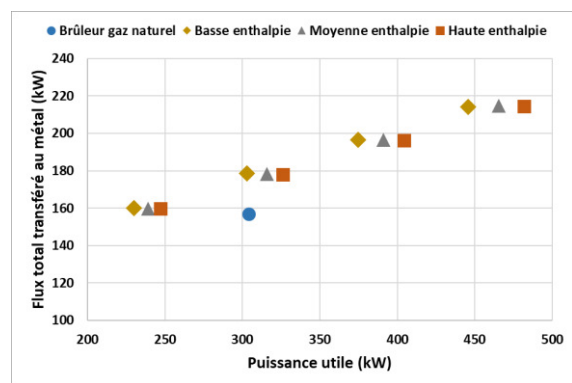


Figure 12 : Flux thermique total reçu par le métal en fonction de la puissance utile.

Les tendances précédentes s'entendent au sens stationnaire, de conditions représentatives d'un milieu de cycle (surface de l'aluminium fixée à  $600^\circ\text{C}$ , parois du four à  $900^\circ\text{C}$ ). En exploitation réelle, les températures de parois et la surface libre du bain évoluent, ce qui peut donner des valeurs d'efficacité moyenne de chauffe sur un cycle complet différentes ; la hiérarchie entre cas devrait toutefois se maintenir, l'écart précis restant à étalonner expérimentalement.

## 4. Conclusion

Les simulations CFD ont permis de caractériser les mécanismes de transfert thermique associés à l'utilisation d'une torche plasma à arc non transféré pour la refusion d'aluminium en four réverbère. Les résultats montrent une meilleure efficacité de chauffe observée pour les cas plasma et donc une réduction de la consommation énergétique du procédé de refusion, en plus de la décarbonation associée au changement de vecteur énergétique.

Par ailleurs, la convection forcée induite par le jet plasma joue un rôle déterminant dans la distribution des flux thermiques. Elle favorise un impact direct sur la surface du bain métallique, ce qui améliore la sélectivité du four en transférant davantage d'énergie au métal qu'aux parois réfractaires. Cette caractéristique ouvre des perspectives pour réduire le temps de fusion, bien que cette hypothèse doive être confirmée par des simulations transitoires et des essais expérimentaux.

Ces résultats constituent une base de compréhension pour les équipes R&D en vue des essais prévus en 2026. Ils permettent d'identifier les paramètres opératoires les plus prometteurs,

notamment le compromis entre puissance nette, pouvoir fumigène et rendement de la torche, afin d'optimiser la performance énergétique, la consommation d'azote et la vitesse de fusion. Les tendances mises en évidence guideront le choix des réglages initiaux et des scénarios d'essais pour le démonstrateur industriel de Constellium, contribuant ainsi à accélérer la validation de cette technologie et son déploiement pour la décarbonation des procédés de fusion à haute température. La prochaine étape consistera à évaluer les performances du four équipé d'une torche plasma et à confronter les mesures expérimentales aux prédictions numériques, afin de valider et d'affiner les modèles développés dans ce travail.

## Références

- [1] D. Dardor, D. Floréz-Orrego, R. Germanier, M. Margni et F. Maréchal, «Decarbonizing the aluminium industry: A comprehensive review of pathways and process integration perspectives,» *Energy Strategy Reviews*, vol. 61, September 2025.
- [2] J. E. Salazar, L. Piquard, S. Vecten et E. Clément, «Decarbonization of Aluminum Reverberatory Furnaces: The Case of Plasma Melting,» *Light Metals*, vol. Light Metals 2024, pp. 881 - 889, 2024.
- [3] A. Pakanati, K. O. Tveito, E. Manger et M. Lorentzon, «Development of Numerical Model of Plasma Burner for Primary Aluminium Casthouses,» *Light Metals* 2025, pp. 1132 - 1144, 2025.
- [4] D. Floréz-Orrego, D. Dardor, R. Germanier, M. Margni et F. Maréchal, «A systemic study for decarbonizing secondary aluminium production via waste heat recovery, carbon management and renewable energy integration,» *Energy Conversion and Management*, vol. 341, October 2025.
- [5] PyroGenesis, «High Powered Plasma Torch (APT-HP),» [En ligne]. Available: <https://www.pyrogenesis.com/products-services/plasma-torches/apt-hp/>.
- [6] L. Piquard, E. Clément et P.-Y. Menet, «A modeling methodology of new combustion technologies for aluminum remelting furnaces,» *Light Metals*, pp. 1243 - 1249, 2025.
- [7] C. Schmitz, Handbook of Aluminium Recycling, Vulkan-Verlag GmbH, 2006.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier BPI France pour son soutien financier dans le cadre du projet de démonstration, qui constitue une étape clé pour la validation industrielle de la technologie plasma et la décarbonation des procédés de fusion.