

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

## **Déséquilibre thermique dans un plasma d'airensemencé d'aluminium**

P. André, M. Abbaoui



**ISSN : 2428-8500**

**DOI : 10.18145/jitipee.v3i2.144**

*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.*

## Déséquilibre thermique dans un plasma d'air ensemencé d'aluminium

Pascal André <sup>(1)</sup>, M'Hammed Abbaoui <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Université Clermont Auvergne, CNRS, Laboratoire de Physique de Clermont, Particules  
pLamas Univers applicationS, F-63000 Clermont-Ferrand  
[pascal.andre@uca.fr](mailto:pascal.andre@uca.fr)

**Résumé** – Plusieurs technologies plasmas utilisent l'aluminium, dans ces systèmes les électrodes et/ou les fils sont faits d'aluminium. Durant l'interaction du plasma d'air et du métal en aluminium, la composition chimique joue un rôle clé sur les phases condensées. En outre le champ électrique peut atteindre une valeur très élevée, entraînant le plasma hors de l'équilibre thermique. Les électrons atteignent alors une température  $T_e$  plus haute que celle des espèces chimiques lourdes  $T_l$ . Dans cet article, nous évaluons le déséquilibre thermique  $\theta = T_e/T_l$  en fonction du champ électrique variant de  $10^3$  V/m à  $10^5$  V/m pour un plasma d'air et d'aluminium (10% Al, 90% air), (50% Al, 50% air) et (90% Al, 10% air) en pourcentage molaire. Puis nous présentons l'influence du déséquilibre thermique sur les phases condensées (aluminium, nitrure d'aluminium, oxyde d'aluminium) apparaissant aux basses températures et sur l'enthalpie massique. La composition chimique d'un plasma, dont le mélange initial est de 10% d'aluminium et 90% d'air, est étudiée montrant ainsi la forte influence du déséquilibre thermique sur les phases condensées.

**Mots clés** : aluminium, nitrure d'aluminium, oxyde d'aluminium, plasma, champ électrique, contacts électriques, arc électrique, déséquilibre thermique, composition chimique

DOI : 10.18145/jitipee.v3i2.144

### Introduction

Nous supposons que le plasma est créé à la pression atmosphérique dans le système électrique. Pour obtenir la composition chimique nous utilisons la minimisation de l'énergie libre de Gibbs modifiée pour les plasmas hors de l'équilibre thermique [1]. Nous prenons en compte trois températures internes :

- la température de rotation  $T_{rot}$ , la température de vibration  $T_{vib}$ , la température d'excitation électronique des atomes et des molécules diatomiques ;

deux températures de translation :

- la température de translation des électrons libres  $T_e$  et la température de translation des particules lourdes  $T_l$ .

Pour obtenir la composition chimique, les formules nécessaires et la méthode numérique utilisée sont décrites dans la référence [2]. Nous prenons en compte cinq phases condensées : AlN (solide), Al (liquide et solide), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (liquide et solide) [3]. Afin de déterminer le déséquilibre thermique nous avons pris en compte une variation de champ électrique comprise entre 10<sup>3</sup> V/m et 10<sup>5</sup> V/m. Dans le premier paragraphe nous donnons les équations nécessaires à l'obtention du déséquilibre thermique puis dans le paragraphe suivant nous donnons les résultats sur le déséquilibre thermique, la composition chimique et l'enthalpie.

### 1. Equations nécessaires au bilan énergétique

Les électrons libres acquièrent de l'énergie via le champ électrique entre deux collisions. Le libre parcours moyen des électrons libres (indice *libre\_e*) s'écrit

$$\lambda_{libre\_e} = \frac{1}{\sqrt{2} n_1 \bar{Q}_{11}^{(1,1)} + \sum_{i=2}^N n_i \bar{Q}_{1i}^{(1,1)}} \quad (1)$$

où  $n_i$  est la concentration des espèces chimiques  $i$ , l'indice 1 étant attribué aux électrons et  $\bar{Q}_{1i}^{(1,1)}$  est la section efficace de transfert de quantité de mouvement moyenne entre les électrons et l'espèce chimique considérée  $i$  ( $i \in [2, N]$ ).

Nous devons étudier les collisions entre les électrons et les particules chargées et les collisions entre les électrons et les particules neutres. Les collisions entre les électrons et les particules chargées sont décrites par un potentiel Coulombien écranté :

$$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_j e}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_d}\right) \quad (2)$$

où  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide,  $e$  est la charge élémentaire,  $Z_j$  est le nombre de charges élémentaires de l'espèce chimique  $j$ ,  $r$  est la distance entre les deux particules et  $\lambda_d$  est la longueur de Debye. Il existe différentes formules de la longueur de Debye et le choix approprié de la longueur de Debye est toujours discutable. Nous adoptons celle pour laquelle les électrons sont considérés comme mobiles :

$$\lambda_d = \left( \frac{1}{k\epsilon_0} \frac{e^2 n_1}{T_e} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

avec  $k$  la constante de Boltzmann.

Pour déterminer les sections efficaces moyennes de quantité de mouvement  $\bar{Q}_{1i}^{(1,1)}$  nous utilisons :

- la table de Mason et al [4] complétée par celles de Devoto [5] pour les collisions électron-chargé;
- les données publiées dans [6] pour les collisions électron-neutre.

Le temps  $\tau$  entre deux collisions électron-particule peut être estimé par  $\tau = \frac{\lambda_{libre\_e}}{\bar{v}_1}$  où  $\bar{v}_1$  est la vitesse moyenne des électrons. En supposant que la vitesse de dérive des électrons est faible comparée à la vitesse moyenne des électrons et en utilisant une distribution de Maxwell-Boltzmann on obtient:

$$\overline{v_1} = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_1}} \quad (4)$$

où  $m_1$  est la masse d'un électron.

Nous supposons que les électrons se relaxent vers une distribution maxwellienne à la température  $T_e$  et que les particules lourdes se relaxent vers une distribution maxwellienne à la température  $T_l$ . Ainsi, en égalant l'énergie transmise aux particules lourdes par les chocs électroniques :  $\frac{3}{2}k(T_e - T_l) \frac{2m_1}{m_{i \neq 1}} \frac{1}{\tau}$  en prenant en compte l'énergie gagnée dans le champ électrique entre deux collisions  $e^2 \frac{E^2}{m_1} \tau$ , le déséquilibre thermique  $\theta = \frac{T_e}{T_l}$  obéit à une équation du second degré :

$$\theta^2 - \theta = \frac{\pi e^2}{24 k^2 T_l^2} \frac{E^2 \overline{m_{i \neq 1}}}{m_1} \lambda_{libre\_e}^2 \quad (5)$$

avec  $\overline{m_i}$  la masse moyenne pondérée par les concentrations respectives des particules lourdes et  $E$  la valeur du champ électrique.

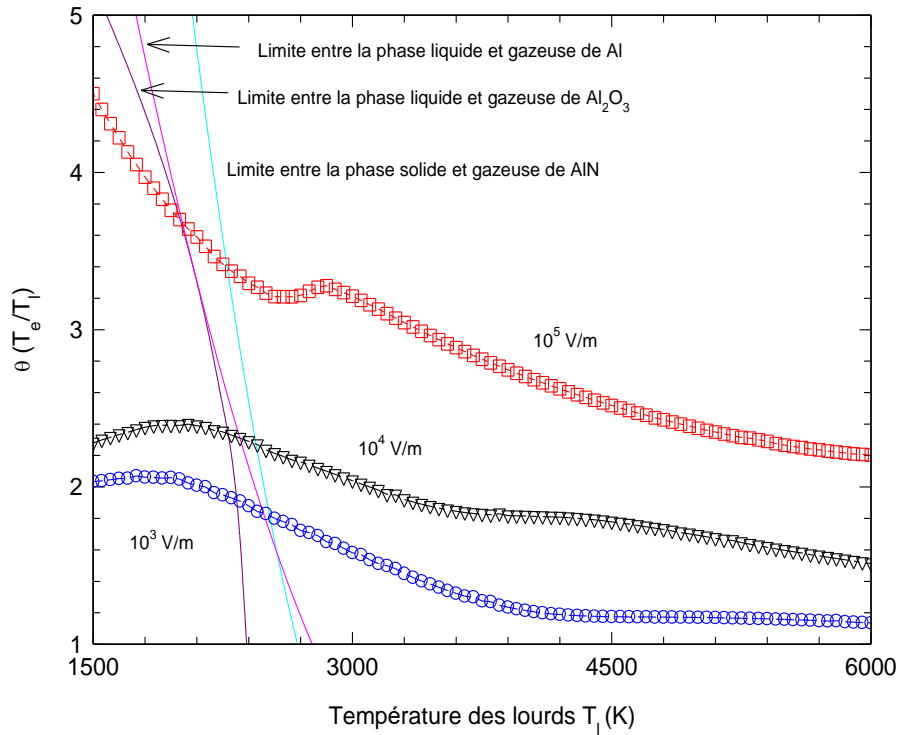
## 2. Résultats

Les Figures 1.a, 1.b et 1.c représentent le calcul du déséquilibre thermique en fonction de la température des espèces lourdes pour différentes valeurs du champ électrique et pour différentes proportions d'air et d'aluminium à la pression atmosphérique : Figure 1.a. (10% d'air et 90% d'aluminium), Figure 1.b. (50% d'air et 50% d'aluminium) et Figure 1.c. (90% d'air et 10% d'aluminium). Le pourcentage initial est donné en pourcentage molaire. Le déséquilibre thermique est d'autant plus grand que le champ électrique est élevé. Pour un champ électrique de  $10^3$  V/m, classique dans l'arc électrique, l'équilibre thermique est atteint à partir de 4000 K et ceci pour toutes les proportions d'air et d'aluminium considérées.

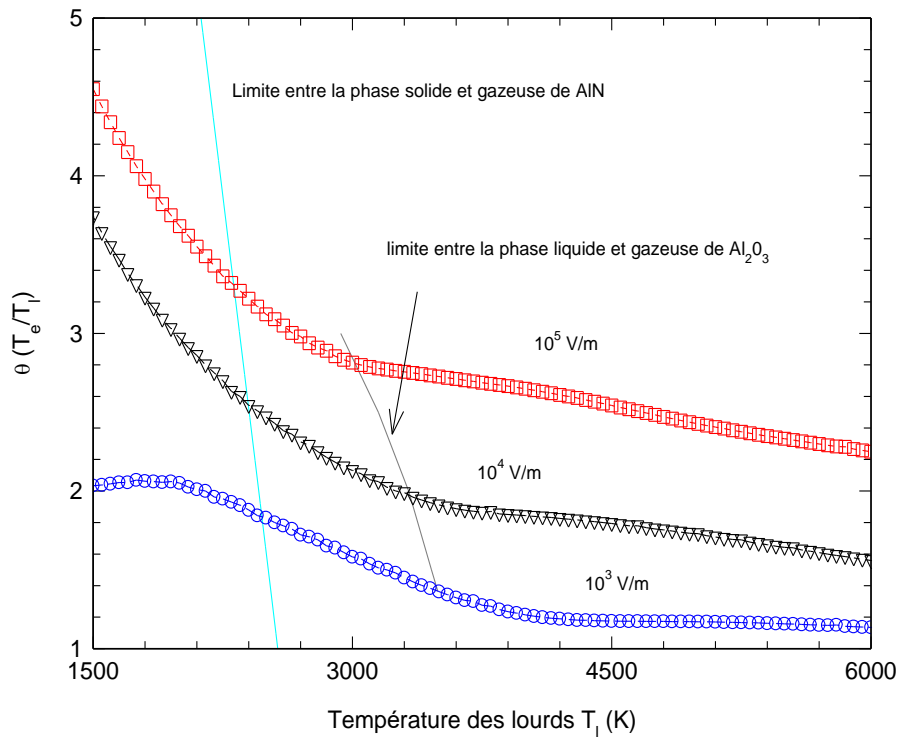
Compte tenu de la variation de la composition chimique et donc du libre parcours moyen des électrons libres (1), on observe une légère différence de la valeur du déséquilibre thermique en fonction de la proportion d'air et d'aluminium.

A titre d'exemple, pour un champ électrique de  $10^5$  V/m et une température des lourds de 4000 K, on obtient un déséquilibre  $\theta$  de 2,7 pour 10% d'air (Figure 1.a.) ; de 2,65 pour 50% d'air (Figure 1.b.) et 2,82 pour 90% d'air (Figure 1.c.). La différence la plus notable est la présence de phases condensées différentes en fonction des proportions initiales :

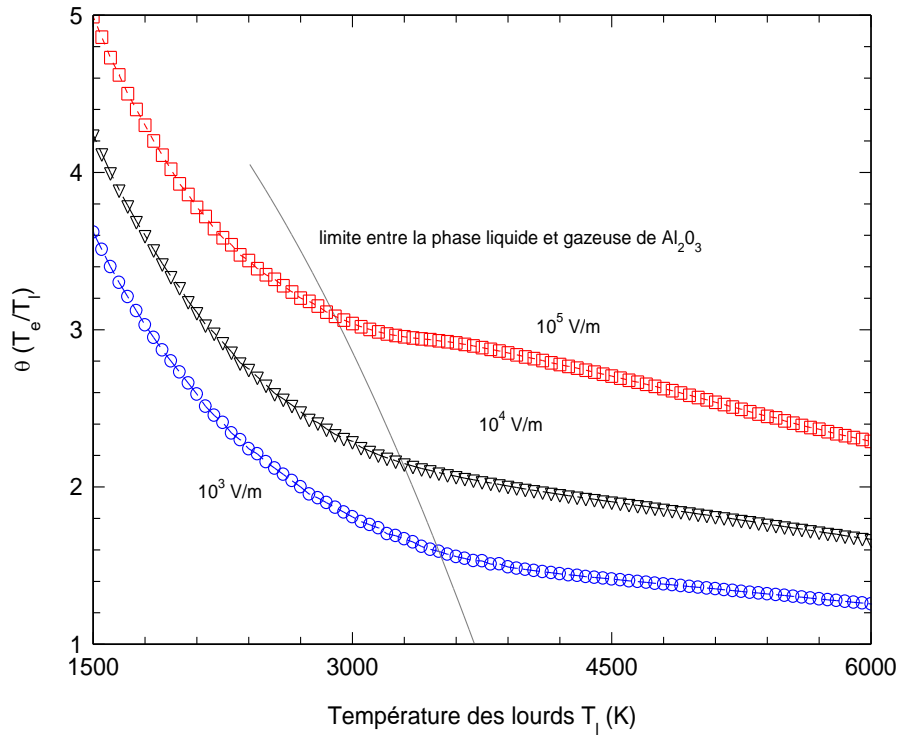
- trois (Al, AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pour le mélange initial (10% d'air, 90% d'Al) (Figure 1.a.),
- deux (AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). pour le mélange initial (50% d'air et 50% d'Al) (Figure 1.b.)
- une (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pour le mélange initial (90% d'air et 10% d'Al) (Figure 1.c.).



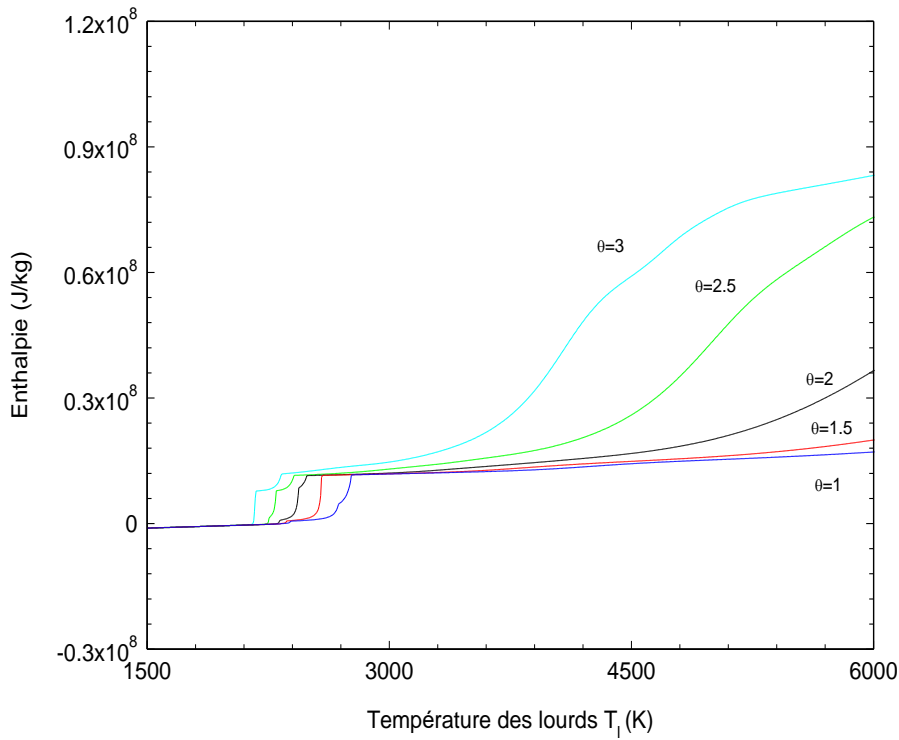
**Figure 1.a.** Evaluation du déséquilibre thermique en fonction de la température des lourds sans phase condensée à la pression atmosphérique pour un pourcentage molaire de 10% d'air et 90 % d'aluminium. Les lignes continues indiquent l'apparition des phases condensées.



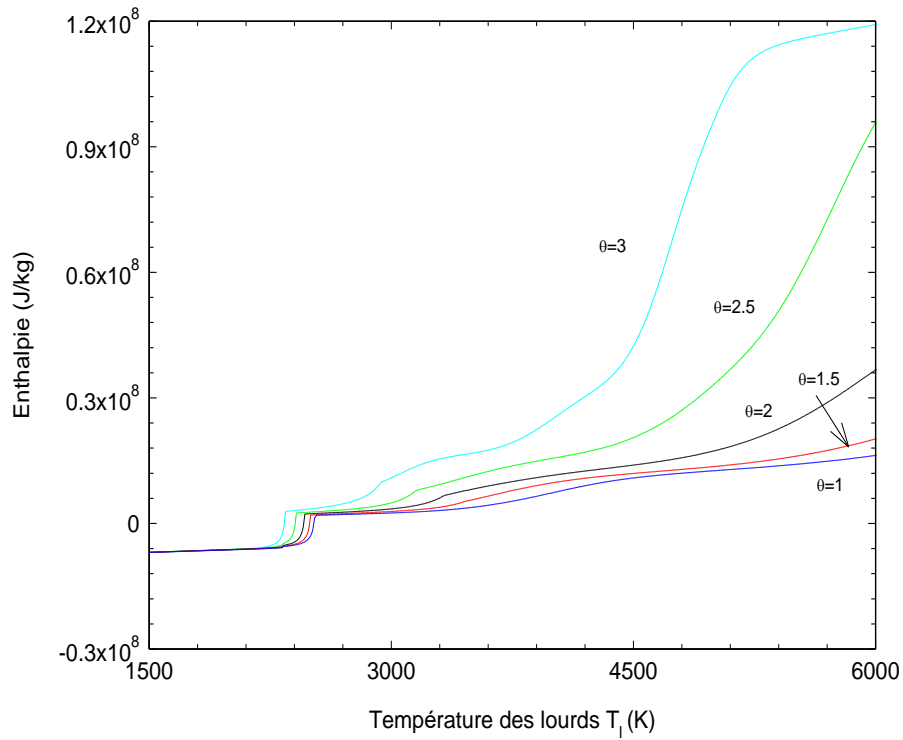
**Figure 1.b.** Evaluation du déséquilibre thermique en fonction de la température sans phase condensée à la pression atmosphérique pour un pourcentage molaire de 50% d'air et 50 % d'aluminium. Les lignes continues indiquent l'apparition des phases condensées.



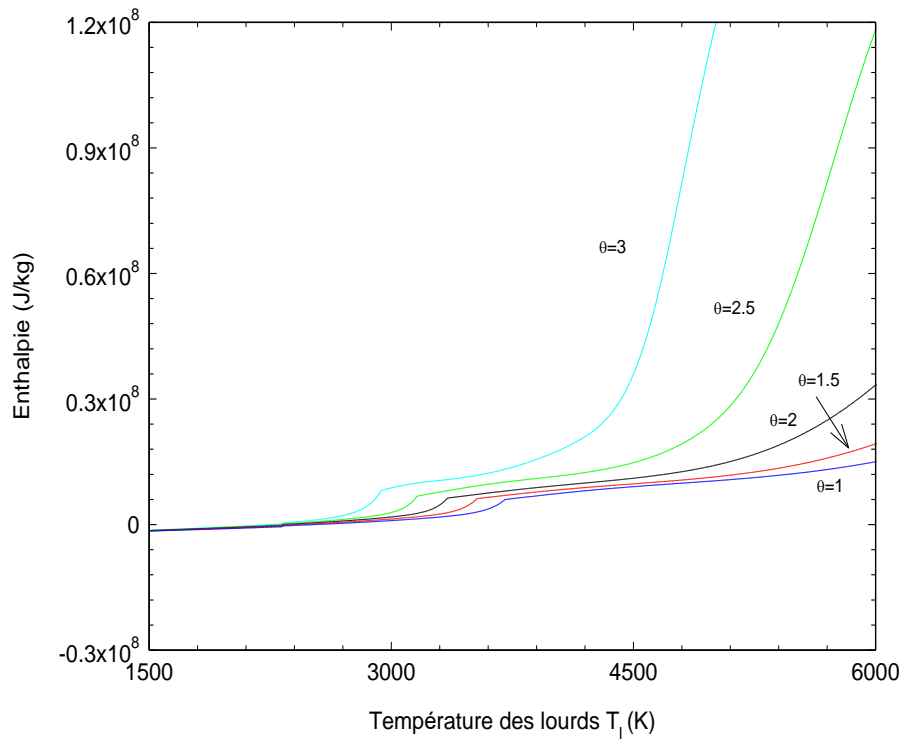
**Figure 1.c.** Evaluation du déséquilibre thermique en fonction de la température sans phase condensée à la pression atmosphérique pour un pourcentage molaire de 90% d'air et 10 % d'aluminium. La ligne continue indique l'apparition de la phase condensée.



**Figure 2.a.** Evolution de l'enthalpie massique en fonction de la température des lourds pour différents déséquilibres thermiques et pour un pourcentage molaire de 10% d'air et 90 % d'aluminium à la pression atmosphérique.



**Figure 2.b.** Evolution de l'enthalpie massique en fonction de la température des lourds et pour différents déséquilibres thermiques et pour un pourcentage molaire de 50% d'air et 50 % d'aluminium à la pression atmosphérique.

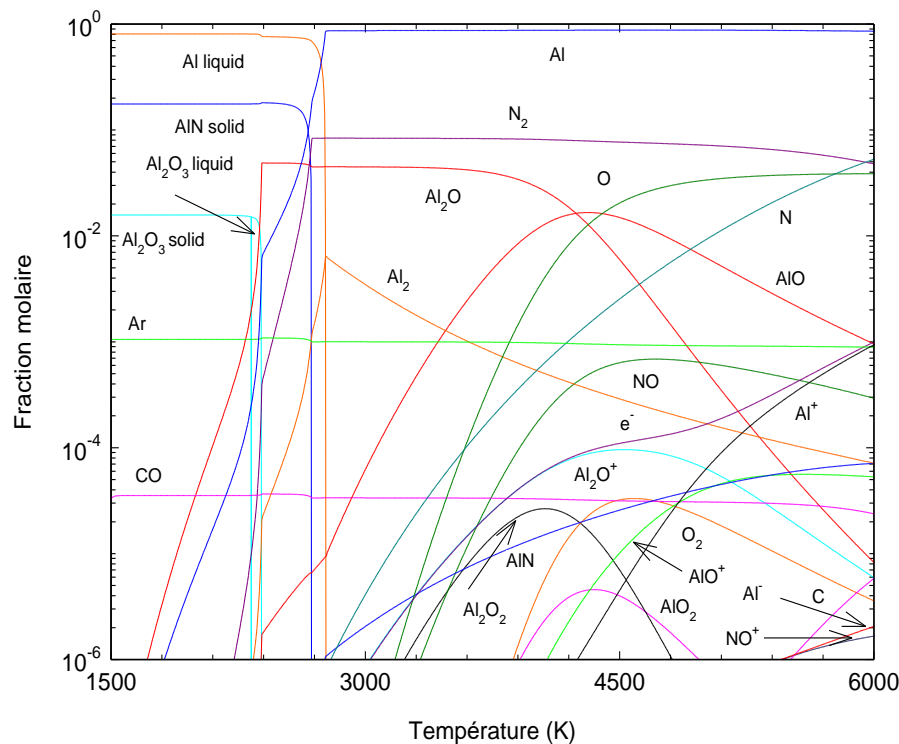


**Figure 2.c.** Evolution de l'enthalpie massique en fonction de la température des lourds et pour différents déséquilibres thermiques et pour un pourcentage molaire de 90% d'air et 10 % d'aluminium à la pression atmosphérique.

Nous avons représenté l'enthalpie massique sur les Figures 2.a, 2.b et 2.c pour différentes proportions d'air et d'aluminium à la pression atmosphérique. Pour une température des espèces lourdes donnée l'énergie de translation des électrons est plus importante. Ainsi pour une température des espèces lourdes donnée, nous remarquons que l'enthalpie est plus importante pour un déséquilibre thermique plus important. La composition chimique variant en fonction du mélange initial, nous notons que l'enthalpie est plus importante pour les plus fortes proportions d'air. Les sauts brusques d'enthalpie correspondent aux changements de phase. Nous comptons :

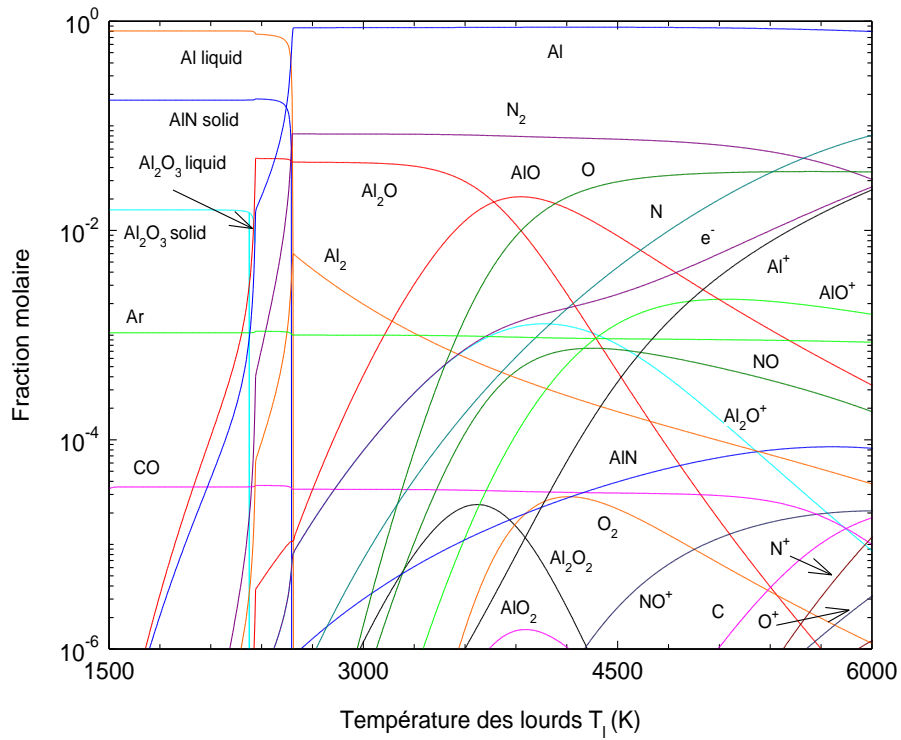
- trois sauts pour le mélange initial de 10% d'air et 90% d'aluminium (Figure 2.a.),
- deux sauts pour le mélange initial de 50% d'air et 50% d'aluminium (Figure 2.b.),
- un saut pour le mélange initial de 90% d'air et 10% d'aluminium (Figure 2.c.).

Ces sauts d'enthalpie apparaissent à plus basse température lorsque le déséquilibre thermique augmente en accord avec les Figures 1.

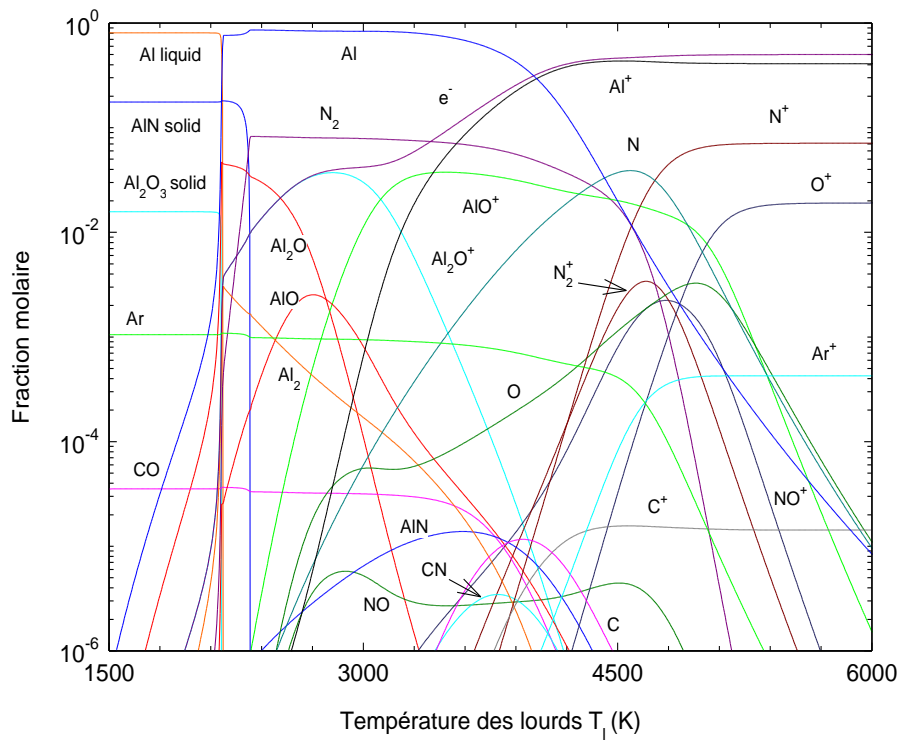


**Figure 3.a.** Evolution, en fonction de la température, de la composition chimique à l'équilibre thermique pour un pourcentage molaire de 10% d'air et 90 % d'aluminium à la pression atmosphérique.





**Figure 3.b.** Evolution, en fonction de la température des lourds, de la composition chimique pour un plasma hors d'équilibre  $\theta = 1,5$  et pour un pourcentage molaire de 10% d'air et 90 % d'aluminium à la pression atmosphérique.



**Figure 3.c.** Evolution, en fonction de la température des lourds, de la composition chimique pour un plasma hors d'équilibre  $\theta = 2$  et pour un pourcentage molaire de 10% d'air et 90 % d'aluminium à la pression atmosphérique.

Les Figures 3.a, 3.b et 3.c montrent l'évolution de la composition chimique pour la proportion de 10% d'air et 90 % aluminium à l'équilibre thermique et hors de l'équilibre thermique. Trois phases condensées sont présentes. On observe que plus le déséquilibre thermique  $\theta$  est important plus les réactions chimiques (ionisation et dissociation) s'effectuent aux plus basses températures des lourds. Ainsi pour un déséquilibre thermique élevé les électrons sont majoritaires au-dessus de 4500 K. Les équilibres chimiques entre la phase condensée et la phase plasma, constituée de plusieurs gaz neutres et ionisés, dépendent de la nature chimique de ces espèces. Le premier constat est que la composition chimique du plasma varie en fonction du déséquilibre thermique. A titre d'exemple, on note une diminution de la concentration de  $Al_2O$  et une apparition à basse température des lourds de la concentration de  $AlO$  en fonction du déséquilibre thermique. Deuxième constat est la variation en fonction du déséquilibre thermique de la température de changement de phase entre la phase condensée et la phase plasma. Par exemple, la température des lourds à laquelle le nitrure d'aluminium se sublime est de 2680 K et de 2330 K respectivement à l'équilibre thermique et hors d'équilibre thermique ( $\theta = 3$ ). Il en est de même pour les températures de vaporisation de l'aluminium et de l'oxyde d'aluminium passant respectivement de 2767,5 K à 2172,5 K et de 2387,5 K à 2162,5 K. On note que durant un refroidissement et en fonction de l'état du plasma (à l'équilibre ou hors de l'équilibre) l'apparition de la première phase condensée varie : on obtient du nitrure d'aluminium pour un déséquilibre thermique de 3 alors qu'une goutte de liquide d'aluminium apparaît à l'équilibre pour le même mélange initial considéré.

## Conclusion

Les plasmas d'air et aluminium sont couramment rencontrés dans les technologies utilisant l'arc électrique de façon opinée ou voulue. Dans cet article nous avons montré le lien existant entre le champ électrique et le déséquilibre thermique. Ce dernier est évalué numériquement en fonction du champ électrique. Nous avons montré que plus le champ électrique est élevé plus le déséquilibre thermique est important aux basses températures.

L'augmentation du déséquilibre thermique fait varier la composition chimique du plasma. La température d'équilibre chimique entre les phases condensées et la phase plasma (contenant plusieurs espèces chimiques différentes) varie en fonction du déséquilibre thermique et par conséquent du champ électrique. Nous avons montré qu'en fonction du déséquilibre thermique, des phases condensées différentes apparaissent (oxyde d'aluminium, nitrure d'aluminium, aluminium).

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à la société SAFT pour son soutien.

## Références

- [1] P. André, (1995), Partition Functions and Concentrations in Plasmas out of Thermal Equilibrium , IEEE transactions on Plasma Science, Vol 23, n°3, 453-458.  
Doi : 10.1109/27.402339
- [2] P. André, M-Agnès Courty, A K. Kagoné, Z. Koalaga, N. Kohio, F. Zougmore, (2016), Calcul de la composition chimique dans un plasma issu de mélanges de PTFE, d'air, de cuivre et de vapeur d'eau dans le cadre d'appareillages de coupure électrique à air, JITIPEE, Vol.2, P 3.1- 3.18. Doi : 10.18145/jitipee.v2i1.128
- [3] P. André, M. Abbaoui, A. Augeard, P. Desprez, T. Singo, (2016), Study of Condensed Phases, of Vaporization Temperatures of Aluminum Oxide and Aluminum, of Sublimation Temperature of Aluminum Nitride and Composition in an Air Aluminum Plasma, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol 36, n°4, 1161-1175.  
Doi :10.1007/s11090-016-9704-7
- [4] E.A. Mason, R.J. Munn, Francis J. Smith, (1967), Transport Coefficients of Ionized Gases, The Physics of fluids, Vol 10, n°8, 1827-1832. Doi : 10.1063/1.1762365
- [5] R.S. Devoto, (1973), Transport coefficients of ionized argon, The Physics of fluids, 16, n°5, 616-623. Doi : 10.1063/1.1694396
- [6] P. André, L. Brunet, W. Bussière, J. Caillard, J. Lombard, J. Picard, (2004), Transport coefficients of plasmas consisting of insulator vapours Application to PE, POM, PMMA PA66 and PC, European Physical Journal Applied Physics, Vol. 25, 169-182.  
Doi : 10.1051/epjap:2004007