

# Les méthodes de résolution de type «Lattice Boltzmann» sont-elles utilisables pour simuler les jets plasmas soufflés atmosphériques utilisés en projection thermique?

Ridha DJEBALI<sup>1,2\*</sup>, Bernard PATEYRON<sup>2</sup>, Mohammed EL GANAOUT<sup>3</sup>, Habib SAMMOUDA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LETTM, Faculté des Sciences de Tunis Université de Tunis El Manar 2, Tunisie

<sup>2</sup> SPCTS, Faculté des Sciences et Techniques Université de Limoges, France

<sup>3</sup> Université Henri Poincaré, LERMAB Institut Carnot, Nancy, France.

\*(Auteur Correspondant : jbelii\_r@hotmail.fr)

**Résumé** - La méthode de résolution de Boltzmann sur réseau ou « Lattice Boltzmann Method » méthode LBM ne rend pas très bien compte des échanges thermiques, or ceux-ci sont primordiaux dans un jet plasma d'arc soufflé. Comment rendre compte des gradients de propriétés de transport : viscosité, conductivité thermique,...? Comment rendre compte de la symétrie axiale du jet, afin de diminuer les temps de calculs ?

Ce sont ces problèmes qui se posent à la communauté scientifique que nous illustrons sur l'exemple de conditions opératoires en projection thermique.

## Nomenclature

$f_k, g_k$	fonctions de distribution pour la masse volumique et la température	<i>Symboles grecs</i>	
$f_k^{eq}, g_k^{eq}$	valeurs d'équilibre de $f_k$ et $g_k$	$\rho$	masse volumique du fluide, $kg/m^3$
$T$	température, $K$	$\nu$	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
$\mathbf{u}$	vitesse $= (u_x, u_y)$ , $m.s^{-1}$	$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
$\mathbf{x}$	nœud du réseau en coordonnées $(x, y)$	$\tau_v, \tau_\alpha$	temps de relaxation, $s$
$\mathbf{e}_k$	vecteur vitesse discrète du réseau	<i>Indices et exposants</i>	
$\Delta t$	pas de temps, $s$	<i>eq</i>	équilibre
$\Delta \mathbf{x}$	pas d'espace, $m$	<i>k</i>	direction de la vitesse discrète
$C_s$	constante de Smagorinsky	<i>tot</i>	total
		<i>en</i>	entrée
		$\Delta$	épaisseur du filtre

## 1. Introduction

Les procédés de projection plasma jouent un rôle technologique important en traitement de surface, ils sont aussi sources de travaux expérimentaux et numériques pour atteindre des performances élevées. Ils offrent un large champ de cas tests pour les numériciens en raison du couplage des propriétés des transports de chaleur et de masse et des gradients thermiques élevés et que les caractéristiques de celles-ci sont parfaitement non linéaires [1] (Figure 2 et Figure 3). Les champs de température et de vitesse dans le jet plasma affectent les trajectoires des particules et leurs histoires thermiques et donc la qualité du dépôt obtenu [2, 3]. Les travaux de modélisation (de jets plasma) disponibles sont presque tous fondés sur l'hypothèse d'écoulement stationnaire en sens de moyenne temporelle. Cependant, il a été démontré dans [4] que le jet plasma est non stationnaire. La méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) peut rendre compte de la nature non stationnaire du jet plasma et de ses processus de collisions.

Aussi ces algorithmes suscitent de l'engouement en raison :

- de leur aptitude à permettre des visualisations spectaculaires des phénomènes évolutifs,
  - de leur apparence « particulière »,
  - de leur mise en place sur la base de lois phénoménologiques élémentaires,
  - de leur aptitude à rendre compte de conditions aux limites sur des frontières de géométrie complexes (milieux granulaires, milieux poreux, milieux diphasiques).
  - de permettre l'exécution « en parallèle » des calculs sur des systèmes multiprocesseurs.
- Ces méthodes semblent donc parfaitement utilisables pour simuler un jet plasma de projection thermique ainsi que l'interaction avec la matière pulvérulente transportées. Cependant les modèles LBM sont typiquement en coordonnées cartésiennes. Quelques modèles axisymétriques qui permettent de faire l'économie du 3D ont été développés récemment. Le modèle axisymétrique de Jian [5] a été employé avec succès par R. Djebali et al. [6] pour simuler un jet plasma d'argon employant un modèle turbulence à grandes échelles (LES ou large eddy scale). Ici, nous étudions le comportement de jet plasma pour un mélange de gaz, à savoir le N<sub>2</sub>-Ar 62.5% vol. Le modèle axisymétrique présenté est couplé au modèle turbulence standard de Smagorinsky. Les résultats obtenus à partir de ce modèle sont validés par comparaison à différentes références.

## 2. Modèle

Les équations gouvernant l'écoulement, écrites sous des hypothèses adéquates (voir [6]), sont résolues en utilisant une formulation scalaire (D2Q4) de la méthode de Boltzmann sur réseau pour le flux thermique et une formulation (D2Q9) pour l'écoulement supposé incompressible selon [7]. Il est tenu compte du caractère turbulent et des paramètres de diffusion dépendants de la température. Le procédé est décrit comme suit.

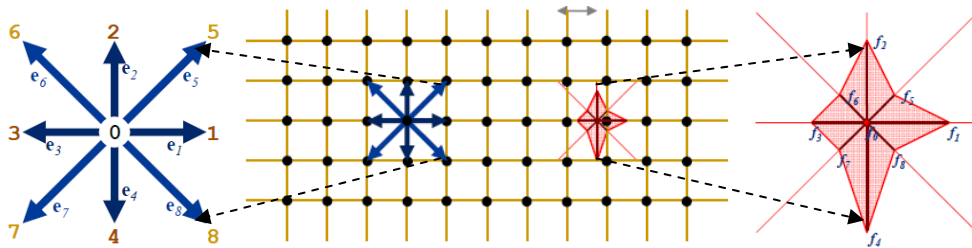


Figure 1. Éléments descriptifs de la méthode Boltzmann sur réseau (LBM) selon [8] dans une formulation D2Q9.

### 2.1. Modèle axisymétrique thermique

Les équations discrétisées du modèle proposé sont données pour la double population  $f_k$  massique et  $g_k$  thermique par:

$$\begin{cases} f_k(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}, t + \Delta t) - f_k(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau_v} [f_k(\mathbf{x}, t) - f_k^{eq}(\mathbf{x}, t)] + \Delta t F_1 + \frac{\Delta t}{6} \mathbf{e}_{ki} \mathbf{F}_{2i}, & k = 0, 8 \\ g_k(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}, t + \Delta t) - g_k(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\tau_\alpha} [g_k(\mathbf{x}, t) - g_k^{eq}(\mathbf{x}, t)] + \Delta t S, & k = 1, 4 \end{cases} \quad (1)$$

Où  $S$ ,  $F_1$  et  $F_{2i}$  sont des fonctions d'espace dérivant de la formulation axisymétrique. Les temps de relaxation  $\tau_v$  et  $\tau_\alpha$  sont liés à la viscosité cinématique et la diffusivité thermique par

$$\nu = \frac{\tau_v - 0,5}{3} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{\tau_\alpha - 0,5}{2} \frac{\Delta x^2}{\Delta t}, \quad \text{une description de ce modèle est donnée en [3].}$$

Les variables macroscopiques sont calculées utilisant les moments d'ordres zéro et un comme suit (voir Figure 1):

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{k=0,8} f_k \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\rho} \sum_{k=1,8} \mathbf{e}_k f_k \\ T = \sum_{k=1,4} g_k \end{cases} \quad (2)$$

## 2.2. Grandeurs de transport variables

Le jet plasma est un écoulement à hautes températures. De ce fait, toutes les quantités physiques (viscosité, diffusivité...) varient très fortement en fonction de la température (Figure 2). Un des objectifs de cette étude est de prolonger l'emploi de la méthode LBM par l'utilisation des paramètres de diffusion variables. De façon générale, une grandeur sans dimensions est invariante dans son passage de l'espace réseau de Boltzmann ( $LB$ ) à l'espace physique ( $Ph$ ):

$$\Phi_{LB} = \frac{LB_{\text{échelle}}}{Ph_{\text{échelle}}} \quad (3)$$

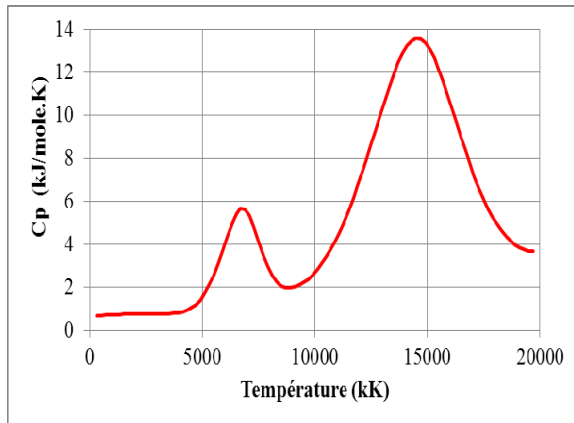


Figure 2: Enthalpie du mélange N2-Ar 62.5% vol. fortement non linéaire en fonction de la température<sup>[9]</sup>.

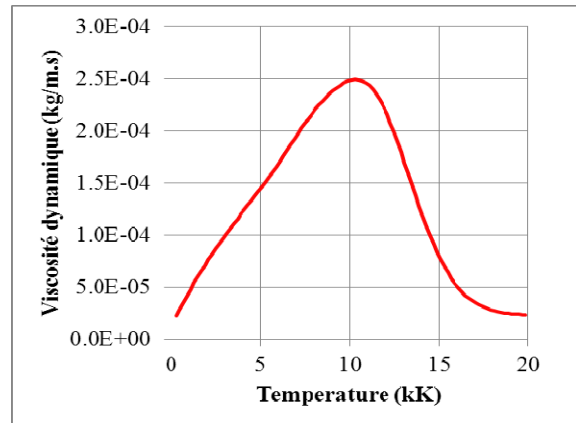


Figure 3: Viscosité dynamique du mélange N2-Ar 62.5% vol. fortement non linéaire en fonction de la température.

## 2.3. Modèle de turbulence

Dans un modèle d'écoulement LBM turbulent, la viscosité est ajustée localement par addition de la viscosité turbulente à la viscosité moléculaire. Pour le réseau D2Q9 (2 dimensions, 9 vitesses discrètes) choisi, la viscosité effective obéit à l'équation suivante:

$$\nu_{tot} = \frac{\tau_{v-tot} - 0,5}{3} = \nu + \nu_t = \nu + (C_s \Delta)^2 |\bar{S}_{ij}| \quad (4)$$

Des calculs intermédiaires mènent à une équation du second degré:

$$\tau_{v-tot} = \tau_{v-tot}(\mathbf{x}, t) = \left( \tau_v + \sqrt{\tau_v^2 + 18 (C_s \Delta)^2 |Q_{ij}| / \rho(\mathbf{x}, t)} \right) / 2 \quad (5)$$

où  $Q_{ij} = \sum_k e_{ki} e_{kj} (f_k - f_k^{eq})$  et  $\Delta$  la largeur du filtre, égale à l'unité d'espace.

De même pour le champ thermique, le temps de relaxation est ajusté par une nouvelle diffusivité thermique :

$$\alpha_{tot} = \frac{\tau_{\alpha-tot} - 0,5}{2} = \alpha + \alpha_t = \alpha + \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad (6)$$

où  $Pr_t$  est le nombre de Prandtl turbulent, habituellement pris entre 0.3 et 1.

### 3. Domaine d'étude et profils d'entrée

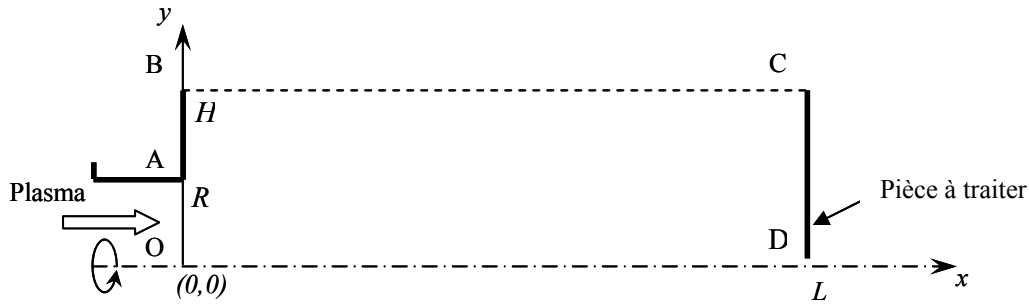


Figure 4 : Domaine d'étude

Le domaine d'étude est un demi-plan (tracé sur la Figure 4) subdivisé par maillage uniforme en 200x96 unités de réseau. Pour ce modèle, sur la frontière OA les conditions d'entrée du gaz s'effectuent selon les profils suivants:

$$\begin{cases} \frac{u_{en}(y)}{U_0} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{R} \right)^2 \right] \\ \frac{T_{en}(y) - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{R} \right)^3 \right] \end{cases} \quad (7)$$

## 4. Résultats

Quand l'obstacle du substrat n'est pas considéré dans le modèle du jet plasma, les profils des champs calculés diffèrent de la réalité. L'objet (substrat) constitue une frontière fixe (mur) ce qui perturbe le jet libre classique (jet impactant). Dans cette étude nous étudions les deux cas.

### 4.1. Validation sur le jet libre

La plupart des efforts numériques disponibles sont fondés en considérant le jet libre, ainsi pour les codes *GENMIX* et *Jets&poudres*. Dans *Jets&poudres* les codes *GENMIX* ont été considérablement améliorés et validés pour l'application aux jets plasma. Les résultats du présent modèle LB sont rassemblés aux résultats de *GENMIX* et *Jets&Poudres* pour les distributions centrales de la température et la composante axiale de la vitesse (voir *Figure 5* et *Figure 6*).

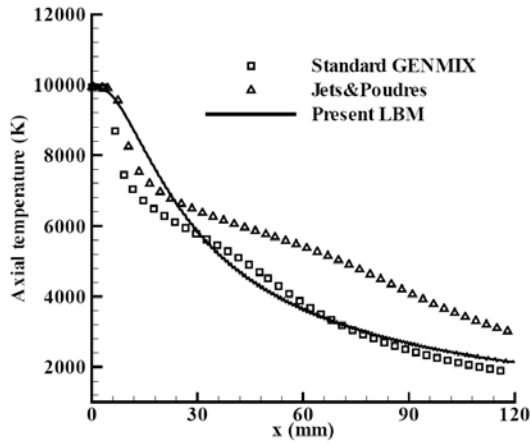


Figure 5 : Distribution centrale de la température obtenue dans ce modèle (D2Q9-D2Q4) considérant  $C_{smag}=0.18$  et  $Prt=0.3$  par comparaison aux résultats de référence.

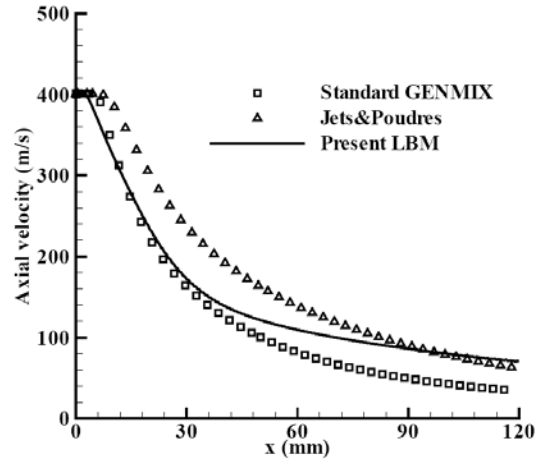


Figure 6: Distribution centrale de la vitesse axiale simulée par ce modèle (D2Q9-D2Q4) considérant  $C_{smag}=0.18$  et  $Prt=0.3$  par comparaison aux résultats de référence.

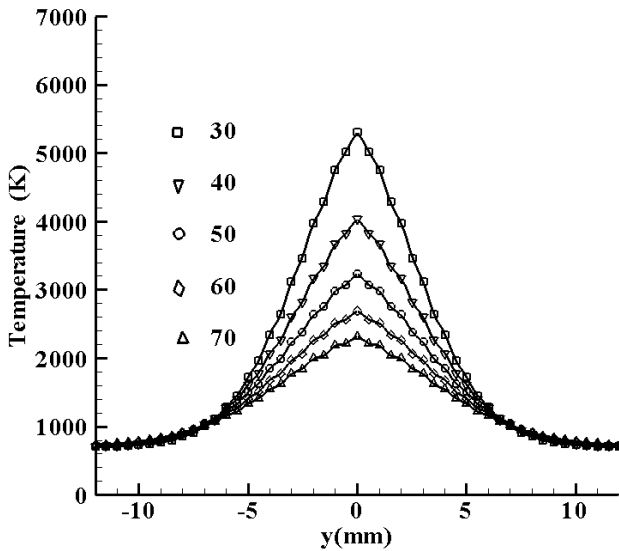


Figure 7: Distribution radiale de la température pour différentes sections transversales simulées par ce modèle (D2Q9-D2Q4) à 30, 40, 50, 60, et 70 mm de la tuyère.

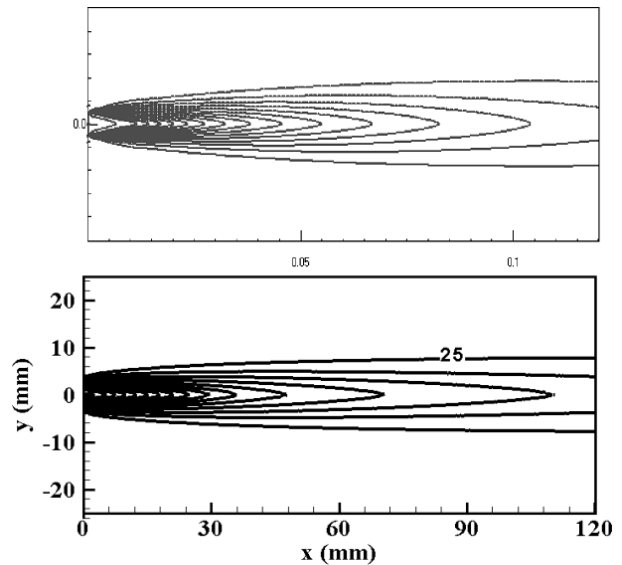


Figure 8: Tracés des iso-vitesse axiale pour le code Jets&Poudres (haut) et celui de cette étude (bas) pour des intervalles de 40m/s.

Globalement un accord assez satisfaisant est obtenu, mais de façon générale les champs obtenus avec la méthode LBM sont plus étroits que ceux obtenus avec les autres codes. De même *Figure 6* La méthode LBM ne rend pas compte, ici, des effets de compressibilité manifestés par des inflexions sur les autres modèles. Il est à noter que le gradient de température axiale près de l'admission (intervalle 0-20 millimètres) est proche de 140 K/mm (contre 195 K/mm et 167 K/mm pour les résultats des autres codes). Le gradient de vitesse est proche de 8.4 (m/s)/mm (contre 9 (m/s)/mm et 4.6 (m/s)/mm pour les autres codes) ce qui est conforme aux observations expérimentales des gradients indiquant 200K/mm et de 10 (m/s)/mm.

La *Figure 7* représente la distribution radiale de la température des sections transversales à différentes distance de la tuyère. Ces distributions radiales sont d'allure gaussienne et leurs maxima décroissent avec la distance. La *Figure 8* compare les iso composantes axiales de la

vitesse pour ce modèle et pour *Jets&Poudres*. Les deux distributions sont très proches. Les essais publiés dans d'anciens travaux prouvent que l'épaisseur du jet plasma (à mi-longueur du jet) est au plus environ 15 mm, ce qui est le cas ici.

## 4.2. Jet impactant

La pièce à traiter peut avoir plusieurs inclinaisons avec la direction du jet. Nous considérons juste ici une incidence normale sur l'objet. La température et la vitesse maximales à l'entrée sont choisies 10000 K et 500 m/s. La pièce est à 120 millimètres de la sortie de torche. Les résultats sont présentés sur les *Figure 9* et *Figure 10*. Ce qui montre bien la modification des distributions de la température et de vitesse axiale. Les résultats obtenus sont conformes aux résultats numériques obtenus dans [10]. Alors que *Jets&Poudres* ne permet pas de prendre en compte la condition aux limites due au substrat, le modèle présenté est une amélioration du modèle en ce que les caractéristiques du jet plasma affectent directement les histoires thermiques et dynamiques des particules injectées.

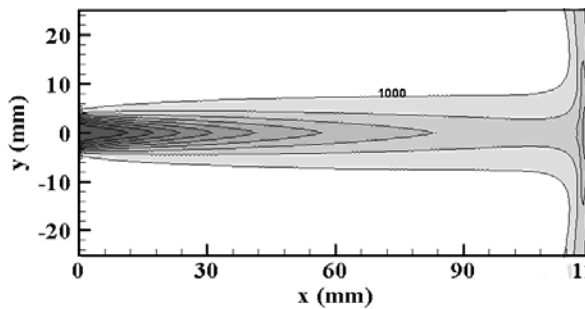


Figure 9: Distribution de la température simulée par ce modèle LBM pour un jet incident normalement sur le substrat, pour des intervalles de 1000K et coupure au-dessous de 1000K.

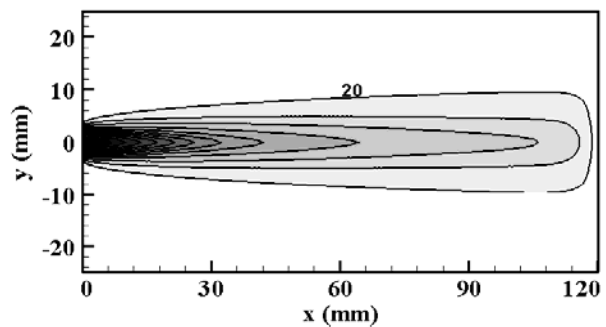


Figure 10: Distribution de la vitesse axiale simulée par ce modèle LBM pour un jet incident normalement sur le substrat, pour des intervalles de 40/s et coupure au-dessous de 20m/s.

## 5. Conclusion

Dans l'étude présentée, un jet axisymétrique de plasma d'argon-azote en écoulement dans l'argon-azote est simulé en employant la méthode de Boltzmann sur réseau. Les profils calculés pour la température et la composante axiale de la vitesse le long de la ligne centrale sont bien conformes aux résultats numériques disponibles pour des codes fondés sur différents modèles de turbulence. En outre ce code, permet de tenir compte de la pièce à traiter en tant que frontière-mur, ce qui affecte sensiblement la structure d'écoulement.

## Références

- 
- [1] W.L.T. Chen, J. Heberlein, E. Pfender, B. Pateyron, G. Delluc, M.F. Elchinger, P. Fauchais Thermodynamic and transport properties of argon/helium plasmas at atmospheric pressure Plasma Chemistry Plasma Processing, 15(3)(1995) pp. 559-579.
  - [2] F. Ben Ettouil, O. Mazhorova, B. Pateyron, H. Ageorges, M. El Ganaoui, P. Fauchais. Predicting dynamic and thermal histories of agglomerated particles injected within a d.c. plasma jet Surface & Coatings Technology, 202, 2008, 4491-4495.
  - [3] B. Pateyron (1987) No 21-1987, Thèse de doctorat d'État Université de Limoges (2 juillet 1987)

- [4] G. Delluc, H. Ageorges, B. Pateyron, P. Fauchais, Fast modelling of plasma jet and particle behaviours in spray conditions, *High Temp. Mat. Processes* 9 (2005) 211-226
- [5] J. G. Zhou, Axisymmetric lattice Boltzmann method, *Physical Review E* 78 (2008) 036701.
- [6] R. Djebali, B. Pateyron, M. El Ganaoui, H. Sammouda, Axisymmetric high temperature jet behaviours based on a lattice Boltzmann computational method. Part I: Argon Plasma, *International review of Chemical Engineering*, vol. 1, n. 5, (2009), 428-438.
- [7] B. Pateyron, M.F. Elchinger, G. Delluc, P. Fauchais Sound velocity in different reacting thermal plasma coatings *Plasma Chemistry Plasma Processing* 16 (1), (1996) p 39-57
- [8] Michael C. Sukop, Daniel T. Thorne, *Lattice Boltzmann modeling: an introduction for geoscientists and engineers*, Springer, Berlin, 2006.
- [9] B. Pateyron, G. Delluc, N. Calve T&T Winner, the chemistry of on-line transport properties in interval of 300 K to 20.000 K | [T&T Winner, la chimie et les propriétés de transports en ligne, dans l'intervalle de 300 K à 20000 K] 2005 *Mécanique et Industries* 6 (6), pp. 651-654.
- [10] H. P. Li and X. Chen, Three-dimensional modeling of the turbulent plasma jet impinging upon a flat plate and with transverse particle and carrier-gas injection; *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 22, No. 1, (2002) 27-58.