

MODELISATION DE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU DANS UNE LANCE UNIVERSELLE À EAU PULVÉRISÉE - TURAP

Dan ROBESCU¹, Valeriu ENCIU²

Tevile de refulare a apei pulverizate sunt accesoriu nou intrate în dotarea pompierilor români. Valorile parametrilor (presiuni, viteze și energii cinetice) ce le caracterizează curgerea nu sunt cunoscute, acestea fiind greu de măsurat experimental fiindcă cont de geometria complexă a tevilor. Prin modelarea curgerii apei prin aceste accesoriu se obțin atât valorile numerice ale parametrilor curgerii, cât și posibilitatea de înțelegere a fenomenelor ce se petrec în interiorul tevilor și de corectare, din punct de vedere hidrodinamic, a geometriei de realizare a acestora.

Les lances à eau pulvérisée sont de nouveaux matériels d'intervention pour les sapeurs-pompiers roumains. Les paramètres (pressions, vitesses et énergie cinétique) caractérisant l'écoulement de l'eau sont difficilement mesurables du fait de la géométrie complexe de la lance. Ainsi, la simulation numérique de l'écoulement de l'eau dans les lances d'incendie permet d'obtenir les valeurs numériques de ces paramètres, de comprendre les phénomènes physiques de l'écoulement et d'affiner la géométrie hydrodynamique des lances.

The water mist discharge monitors are new entered accessories in firefighting equipment. The values parameters of flow (pressure, velocity and kinetics energy) are not known, because they are difficult to be measured by experiments, taking notice of the complexity of monitor geometry. By modeling the water's flux through monitors, you acquire numeric values of flow parameters and, also, the possibility to understand the phenomenon that take place inside the water monitor and the hydrodynamic improvement of their geometry.

Mots clé : modélisation, lance d'incendie

1. Introduction

Les lances d'incendie représentent l'outil type du pompier. Elles sont utilisées pour combattre les incendies. Elles peuvent servir soit à produire des jets d'eau ou à faire de la mousse. Les sapeurs-pompiers roumains ont à leur disposition deux types de lances qui réalisent des jets pulvérisés : la fig. 1 – la lance universelle à eau pulvérisée – *TURAP*, et fig. 2 – la lance à eau pulvérisée à haute pression – *TRAPI*.

¹ Prof., Dept. of Hydraulic Machinery and Environment Protection, University "Politehnica" of Bucharest, ROMANIA

² PhD student, Firefighter Faculty, Police Academy of Bucharest, ROMANIA

La lance universelle à eau pulvérisée (TURAP – fig. 1) est une lance à débit variable. Elle permet d'obtenir soit un jet plein (bâton) soit un jet brisé. Le jet pulvérisé (brisé) est obtenu par la modification de la direction de l'écoulement de l'eau à la suite de l'impact du jet bâton avec un disque métallique. Le disque métallique – 3, fixé sur une vis centrale qui se trouve à l'intérieur de la lance - 2, peut changer sa position relative par rapport à la lance à l'aide d'une molette. En effet, en fonction des besoins opérationnels des sapeurs-pompiers nous pouvons régler le type de jet voulu, par l'intermédiaire de la fente par laquelle le jet sort en atmosphère [2].

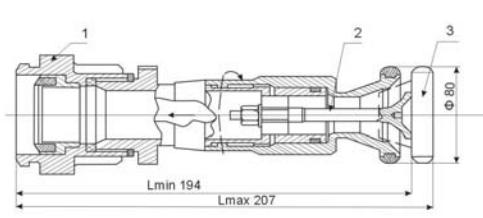


Fig. 1 - La lance universelle à eau pulvérisée -
TURAP

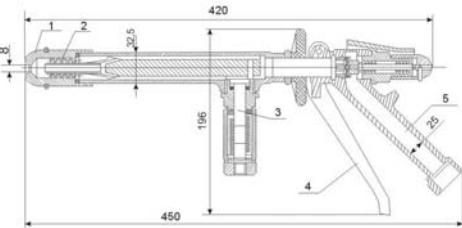


Fig. 2 - La lance à eau pulvérisée à haute
pression - TRAPI

Pour effectuer une simulation numérique, nous employons le logiciel Fluent [1]. Il modélise les fluides compressibles et incompressibles et le transfert de chaleur dans le cas de géométrie complexe. Il a l'avantage d'offrir une grande flexibilité quant à la discréétisation du domaine de calcul. Pour pouvoir faire la simulation à l'aide du logiciel Fluent, il faut initialement définir le domaine géométrique de calcul à l'aide d'un programme annexe (par exemple le logiciel Gambit [1]), le discréétiser en petite surfaces (de type triangulaire ou rectangulaire) sur lesquelles nous réalisons des itérations de calcul. Puis, il faut entrer les données relatives aux limites du domaine de calcul (les conditions sur les frontières). Enfin, nous enregistrons les caractéristiques géométriques de la lance.

La simulation numérique suppose : d'avoir la coupe longitudinale de la lance, la valeur des variables d'entrée et de sortie du domaine de calcul, de lancer le logiciel Fluent et de charger le programme, d'établir les modèles géométriques et le régime d'écoulement (la viscosité), de réaliser l'itération des calculs, puis d'interpréter les résultats et de donner les conclusions relative à la simulation.

2. Modélisation de l'écoulement de l'eau dans une lance universelle à eau pulvérisée

Pour effectuer la simulation numérique, la lance TUPAR a été dessinée en Gambit – figure 3, en position « jet brisé ». De plus, la géométrie de la lance a été imaginée de façon à obtenir le type d'écoulement voulu (le plan de symétrie de la lance correspond au celui de l'écoulement de l'eau).

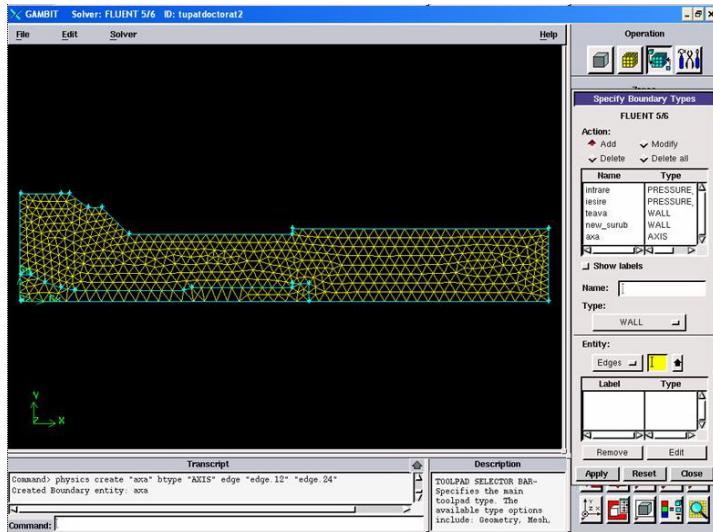


Fig. 3 – Géométrie de la lance TURAP réalisée en Gambit

Les variables d'entrée et de sortie utilisées pour effectuer la simulation numérique sont les pressions réelles de fonctionnement de la lance. En effet, elles sont connues par une simple lecture de valeurs données par les manomètres du Fourgon de Grande Capacité Iveco-Magirus (auquel les lances sont raccordées par des lignes de tuyaux). Les valeurs lues ne tiennent pas compte des pertes de charges générées dans les tuyaux.

La détermination des modèles géométriques et du régime d'écoulement (viscosité) : le calcul de simulation ne peut se faire qu'après avoir enregistré les caractéristiques géométriques de la lance, dans le logiciel Fluent, et qu'après avoir établi le modèle du régime d'écoulement (de la viscosité). C'est ainsi que le modèle géométrique de l'écoulement a été choisi comme modèle discréteisé de type symétrique par rapport à l'axe longitudinal de la lance.

Le modèle d'écoulement choisi est le modèle $k-\varepsilon$ standard, en régime turbulent. Semi-empirique, il est basé sur des corrélations qui tiennent compte du modèle de transfert de l'énergie (k) et du taux de dissipation d'énergie (ε).

Ce modèle est valable seulement dans le cas d'un écoulement turbulent. Les équations de transport utilisées dans le modèle $k-\varepsilon$ standard sont déduites à partir de celles de Navier-Stokes médiates en temps et modélisées k et ε . En introduisant certains termes issus des relations (12) et (13), nous pouvons trouver les valeurs des coefficients du modèle d'écoulement.

Les équations du modèle $k-\varepsilon$ standard utilisées pour la modélisation. Pour le modèle $k-\varepsilon$ standard, les équations qui modélisent l'écoulement sont développées de la manière suivante [3], [4], [5], [6] :

$$\frac{\partial \rho \bar{U}_i}{\partial t} + (\rho \cdot \bar{U}_i \cdot \bar{U}_j) = -\bar{P}_{,i} + [\eta(\bar{U}_{i,j} + \bar{U}_{j,i}) - \rho \cdot \bar{u}_i \bar{u}_j]_{,j} \quad (1)$$

L'équation de l'énergie cinétique en régime turbulent est déduite de la relation (1), qui pour un liquide incompressible et une viscosité constante devient :

$$(\rho \bar{U}_i \bar{U}_j)_{,j} = -P_j + \eta \bar{U}_{i,jj} - \rho (\bar{u}_i \bar{u}_j)_{,j} \quad (2)$$

$$(\rho \bar{U}_j k)_{,j} = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \bar{U}_{i,j} - \left[\bar{u}_j p + \frac{1}{2} \rho \bar{u}_j \bar{u}_i \bar{u}_i - \eta k_{,j} \right]_{,j} - \eta \bar{u}_{i,j} \bar{u}_{i,j} \quad (3)$$

Dans la relation (3), un certain nombre de termes sont inconnus : la production de la turbulence, la diffusion turbulente et le taux de dissipation d'énergie. La modélisation de l'équation Navier-Stokes en fonction de l'énergie cinétique en régime turbulent caractérisée par k , suppose la connaissance de toutes ces valeurs. Dans l'équation de production de la turbulence le tenseur des contraintes visqueuses est également inconnu. Cependant, il est défini par une formule utilisée lors de la résolution de l'équation de Navier-Stokes. Nous utiliserons même équation dans notre calcul :

$$P_k = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \bar{U}_{i,j} = \eta_t (\bar{U}_{i,j} + \bar{U}_{j,i}) \bar{U}_{i,j} - \frac{2}{3} \rho k \bar{U}_{i,i} \quad (4)$$

Dans le terme III de l'équation (3), les corrélations triples sont modélisées en utilisant une loi du gradient dans laquelle on suppose que l'énergie cinétique k est diffusée vers la zone au gradient réduit. On obtient :

$$\frac{1}{2} \rho \bar{u}_j \bar{u}_i \bar{u}_i = -\frac{\eta_t}{\sigma_k} k_{,j} \quad (5)$$

Où σ_k est le nombre Prandtl pour énergie k en régime turbulent. Dans la relation (3), nous ne tenons pas compte du terme de la diffusion de la pression puisqu'il est négligeable. Le terme de dissipation dans la relation (3) est :

$$\varepsilon = \nu \bar{u}_{i,j} \bar{u}_{i,j} = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (6)$$

Ainsi, l'équation modélisée en k peut être écrite de la manière suivante :

$$(\rho \bar{U}_j k)_{,j} = \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) k_{,j} \right]_{,j} + P_k - \rho \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (7)$$

Pour l'écoulement dans la couche limite, l'équation modélisée en k (7) a la forme :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot \bar{U} \cdot k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot k \cdot \bar{V}) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \eta_t \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right)^2 - \rho \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (8)$$

En ce qui concerne l'équation pour le taux de dissipation ε , elle peut être déduite de l'équation Navier-Stokes. Cependant, le nombre de termes inconnus est important. Il faudrait donc doubles corrélations pour déterminer les vitesses fluctuantes, les gradients des vitesses fluctuantes et les pressions. Il est préférable de résoudre l'équation en ε à partir d'un rationnement physique. Dans l'équation exacte en ε , l'équation de production d'énergie s'écrit aussi comme dans l'équation en k à l'aide des grandeurs caractérisant le régime turbulent et des gradients de la vitesse. Si on ajoute $\bar{u}_i \bar{u}_j$ et $\bar{U}_{i,j}$ dans l'équation de production d'énergie et uniquement les grandeurs caractérisant le régime turbulent dans le taux de dissipation, on obtient, comme dans l'équation en k , la relation suivante :

$$P_\varepsilon = -c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (\bar{U}_{i,j} + \bar{U}_{j,i}) \bar{U}_{i,j} \quad (9)$$

Le terme de dissipation est : $c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon}{k}$, et le terme de production est : $P_\varepsilon = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k$. De cette manière, on peut écrire l'équation de transport pour la dissipation comme suit :

$$(\rho \bar{U}_j \varepsilon)_{,j} = \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \varepsilon_{,j} \right]_{,j} + \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P_k - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (10)$$

Pour l'écoulement dans la couche limite, l'équation modélisée en ε (10) devient :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot \bar{U} \cdot \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot \varepsilon \cdot \bar{V}) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_t \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right)^2 - \rho c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

Le modèle k- ε standard choisi pour simuler l'écoulement de l'eau à travers les lances à débit variable est basé sur les solutions des équations (8) et (11) pour trouver les constantes nécessaires au calcul numérique. Ainsi, les deux équations modélisées k et ε sont complétées par une série d'équations qui tiennent compte de l'équation de la production de l'énergie en régime turbulent engendrée par le gradient de vitesse moyenne, de l'équation de la production de l'énergie en régime turbulent, des effets des dilatations fluctuantes pour les fluides compressibles causées par le taux de dissipation totale. Ainsi, les équations qui peuvent être utilisées dans la modélisation sont [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot k \cdot u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \cdot \varepsilon - Y_M + S_k \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot \varepsilon \cdot u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (13)$$

Dans les équations ci-dessus, G_k représente la production de l'énergie cinétique en régime turbulent due au gradient de la vitesse moyenne, G_b représente la production de l'énergie en régime turbulent engendrée par l'élasticité, Y_M représente l'effet des dilatations fluctuantes pour les fluides compressibles causées par le taux de dissipation totale. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ et $C_{3\varepsilon}$ sont des constantes. σ_k et σ_ε sont les nombres de Prandtl en régime turbulent pour k et ε .

La viscosité du fluide en régime turbulent η_t est calculée à partir de l'énergie k et du taux ε comme suit :

$$\eta_t = \rho \cdot C_\eta \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (14)$$

où C_η est une constante.

Les constantes du modèle $k-\varepsilon$ standard utilisées dans la modélisation de l'écoulement de l'eau ont les valeurs suivantes : $C_{1\varepsilon}=1,44$, $C_{2\varepsilon}=1,92$, $C_\mu=0,99$, $\sigma_k=1$ et $\sigma_\varepsilon=1,3$. Ces valeurs sont valables dans le cas d'un écoulement turbulent théorique. Il comprend l'écoulement homogène turbulent et la décomposition isotrope du régime turbulent [1].

La définition des conditions à la limite du domaine de la lance (sur la frontière) : dans le menu „Define”, nous sélectionnons le menu „Boundary conditions” – fig. 4, où nous choisissons l'eau comme fluide traversant la lance [1].

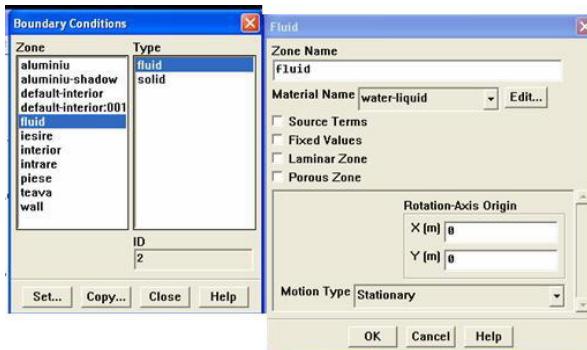


Fig. 4 – La sélection du fluide qui coule par la lance

Dans le même menu, nous définissons les conditions à la limite du domaine de la lance pour la pression d'entrée ($p_{\text{entrée}} = 4$ bars), et de sortie (à

l'atmosphère), l'intensité turbulente (5), le diamètre hydraulique de l'écoulement (c'est le diamètre intérieur de la lance = 0,054m) et le matériau de la lance (aluminium).

Les itérations de calcul – représentent dans la partie de la simulation numérique, le lancement du logiciel lorsqu'il résout les équations du modèle, c'est-à-dire les équations (12) et (13) qui tiennent compte de la géométrie de la lance et des conditions spécifiques à la limite du domaine.

Examiner les résultats de la modélisation – représente la partie de la simulation numérique qui offre les informations pratiques concernant la variation et le développement de l'écoulement dans le domaine sélectionné. Ainsi, on peut visualiser la modalité de développement du champ de l'écoulement à travers la lance et on obtient les graphiques de variation de la pression, de la turbulence et de la vitesse, y compris leurs valeurs numériques.

Le graphique de la pression totale à l'intérieur de la lance TURAP, à une valeur de la pression d'entrée de 4.10^5 Pascal ($p_{\text{entrée}} = 4$ bars), varie entre : 146839 et 424479,9 Pascals – fig. 5 ;

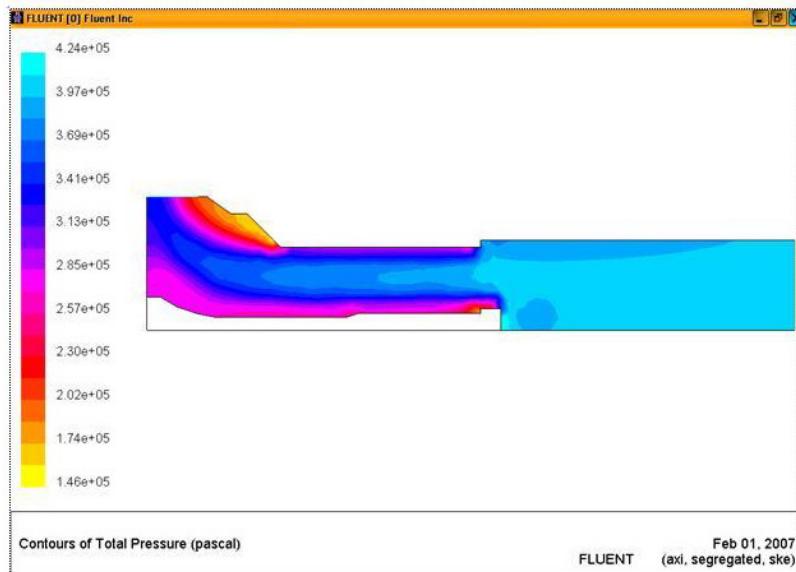


Fig. 5 – Variation de la pression totale à l'intérieur de la lance TURAP – $p_{\text{entrée}} = 4$ bars

Le régime turbulent d'écoulement à l'intérieur de la lance universelle à eau pulvérisée TURAP, est caractérisé par son énergie cinétique (k). Elle prend des valeurs comprises entre : 0,882 et 11,008 m^2/s^2 – figure 6 ;

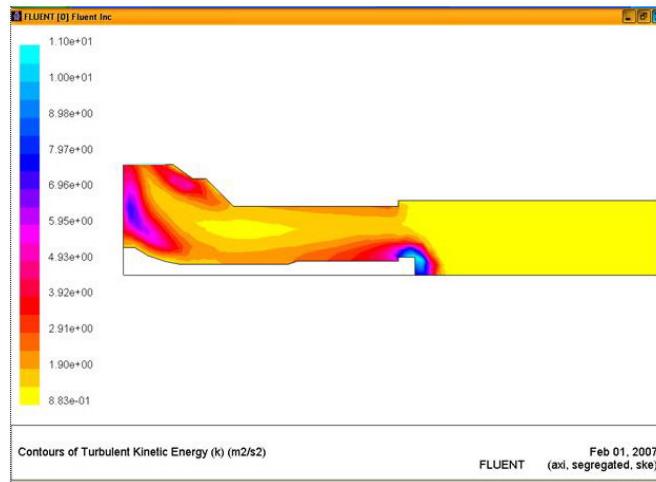


Fig. 6 – L'énergie cinétique en régime turbulent – $p_{\text{entrée}} = 4$ bars

Remarquons en fig. 6 que le régime d'écoulement à travers la lance TURAP est un régime turbulent (établi) et que les variations significatives se situent dans les sections où la direction d'écoulement de l'eau est modifiée.

A l'aide du modèle mathématique (du Fluent), nous déterminons également les valeurs de la vitesse de l'eau à l'intérieur de la lance TURAP. La vitesse varie entre 0 (au niveau de la paroi) et 23,24 m/s. La variation de la vitesse à travers la section de la lance est représentée en fig. 7.

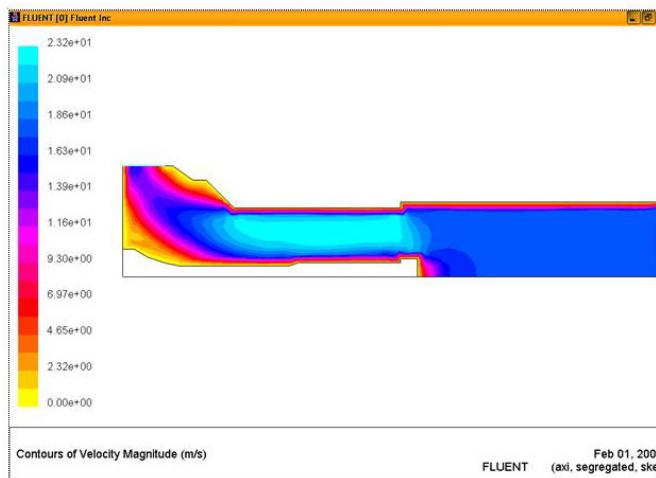


Fig. 7 - La variation de la vitesse à travers la section de la lance TURAP – $p_{\text{entrée}} = 4$ bars

A l'aide de graphique 7, on peut déterminer la vitesse maximale de l'eau en sortie de la lance : 15,1 m/s pour une pression d'entrée de 4 bars.

En fig. 8, nous pouvons voir le graphique en forme vectorielle de la vitesse de l'eau à l'intérieur de la lance à débit variable.

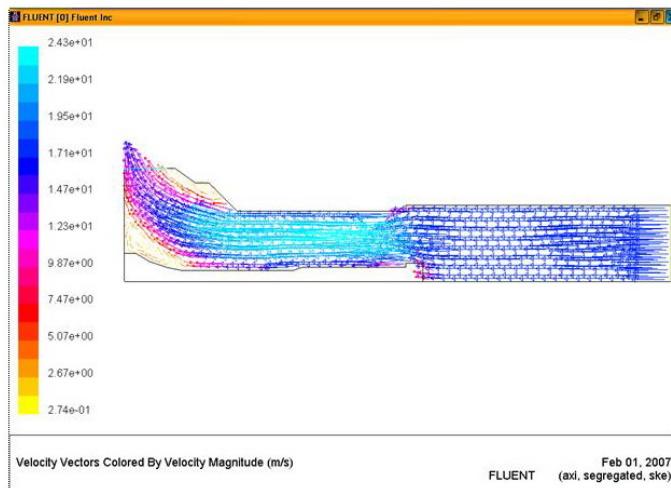


Fig. 8 – Le vecteur vitesse de l'eau à l'intérieur de la lance TURAP – $p_{\text{entrée}} = 4$ bars

L'interprétation de résultats pour le cas étudié : écoulement de l'eau à travers la lance universelle à eau pulvérisée, pression d'entrée de 4 bars.

- Les codes couleurs de la variation de la pression, de la vitesse et de l'énergie mettent en évidence les changements de régime d'écoulement à l'intérieur de la lance à débit variable.
- La valeur maximale de la vitesse à la sortie de la lance est 15,1 m/s.
- La valeur maximale de l'énergie à la sortie de la lance est 3,92 m^2/s^2 .
- Là où se trouve le disque qui permet de changer le type de jet, des tourbillons apparaissent. Ils sont dus au changement de direction de l'écoulement et ont une influence sur les paramètres de sortie du jet.

3. L'utilisation pratique des résultats de la simulation numérique

Les résultats numériques et graphiques obtenus à la suite de la modélisation de l'écoulement de l'eau à travers la lance TURAP nous permettent de comprendre les phénomènes physiques qui se passent à l'intérieur de celle-ci. Ils nous permettent aussi d'améliorer l'hydrodynamique de la lance en modifiant la géométrie et ainsi de proposer une nouveau modèle de lance, appelée TURAP-modifiée : muni d'un hydrocône.

Ainsi, la nouvelle géométrie de la lance modifie la forme de la zone de sortie du jet. En effet, l'hydrocône est inséré dans la zone de liaison entre la vis centrale et le disque métallique qui permet de changer le type de jet. De plus, nous avons dû arrondir l'extrémité de la lance comme le montre le schéma ci-dessous, fig. 9.

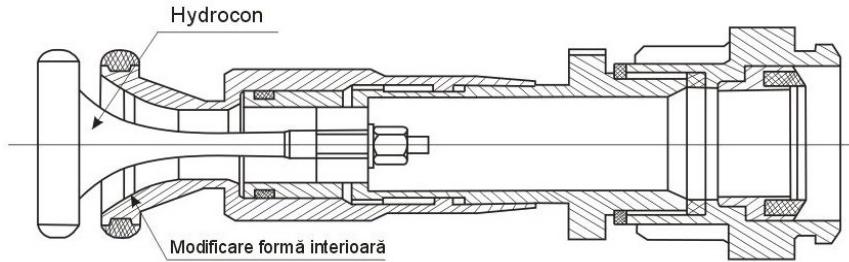


Fig. 9 – La géométrie de la lance **TURAP-modifiée**

La nouvelle géométrie de cette lance permet un écoulement uniforme à travers toute la zone (l'écoulement va suivre les lignes de contour de la géométrie). Les tourbillons n'existant plus, les dissipations énergétiques n'existent non plus. Donc les caractéristiques du jet pulvérisé sont meilleures.

Prouvons-le en réalisant des calculs de simulation dans les mêmes conditions que précédemment. Ici, nous ne présenterons que les graphiques de pression (fig. 10), de vitesse (fig. 11 et 13) et d'énergie cinétique (fig. 12). Si nous les comparons aux résultats obtenus précédemment, nous constatons que les valeurs numériques sont plus élevées.

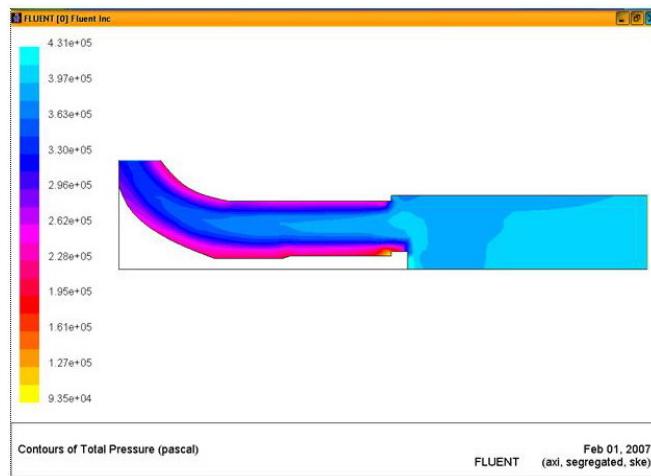


Fig. 10 – La variation de la pression totale à l'intérieur de la lance TURAP modifiée – 4 bars

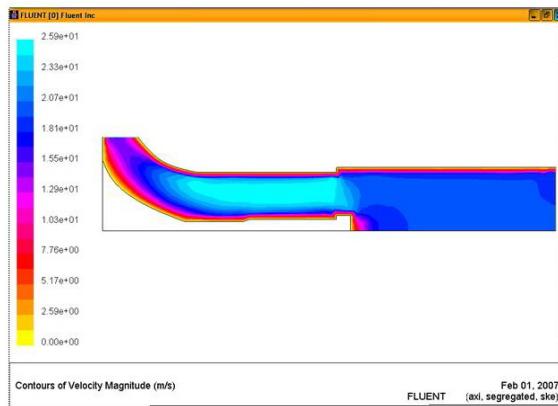


Fig. 11 – La variation de la vitesse à l'intérieur de la lance TURAP-modifiée

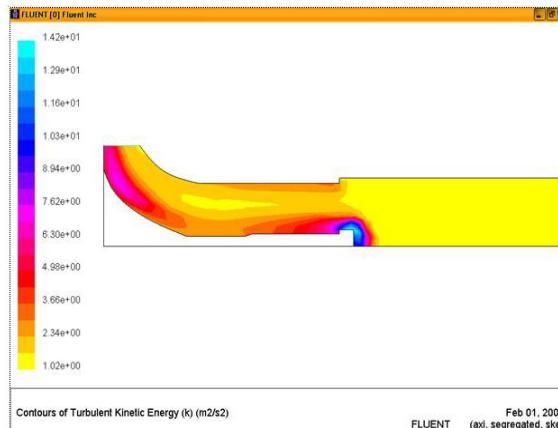


Fig. 12 – L'énergie cinétique en régime turbulent à l'intérieur de la lance TURAP-modifiée

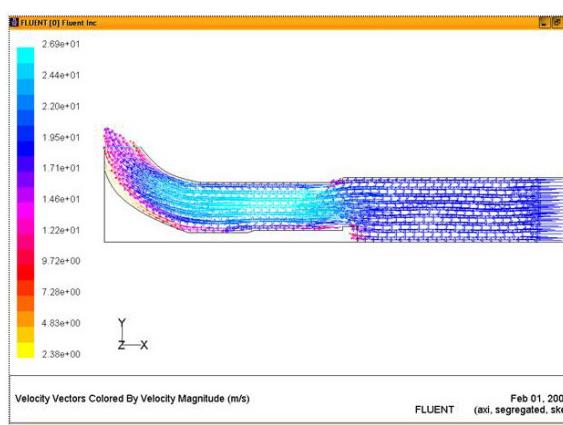


Fig. 13 – Le vecteur vitesse de l'eau à l'intérieur de la lance TURAP-modifiée – $p_{\text{entrée}} = 4$ bars

5. Conclusion

Les valeurs maximales de la vitesse, de la pression et de l'énergie cinétique obtenues pour la nouvelle lance TURAP-modifiée sont supérieures aux valeurs obtenues pour la lance à eau pulvérisée d'origine.

D'après le graphique 13, le vecteur vitesse de l'eau à l'intérieur de la lance TURAP-modifiée nous montre l'absence de tourbillons dans le champ de l'écoulement contrairement à celui représenté pour la lance d'origine.

Nous pouvons donc en conclure que du fait de sa géométrie, la lance munie de l'hydrocône a des caractéristiques hydrodynamiques meilleures et qu'ainsi les jets seront des meilleures qualités.

La modélisation de l'écoulement de l'eau à travers les lances utilisées par les sapeurs-pompiers lors d'interventions opérationnelles représente une démarche de recherche des aspects hydrodynamiques de l'écoulement, dans la détermination des paramètres initiaux du jet, ainsi que dans l'étude de la stabilité du jet pulvérisé à certaines pressions de refoulement.

R E F E R E N C E S

- [1]. *Fluent & Gambit – User's guide.*
- [2]. *SC. FEPA SA Bârlad* - Manualul de utilizare al țevii universale de refulare a apei pulverizate cu perdea de protecție tip TURAP.
- [3]. *Iamandi C, Petrescu V, Damian R, Sandu L, Anton A – Hidraulica instalațiilor* – Editura didactică și pedagogică, București, 1994.
- [4]. *Davidson L. - „An Introduction to Turbulence Models”* Goteborg, 2003.
- [5]. *Speziale C, Abid D, Anderson E. - „Critical evaluation of two-equation models for near-wall turbulence* - Jurnalul AIAA nr. 30, 1992.
- [6]. *Robescu Dan, Robescu Diana – Dinamica fluidelor polifazate poluante*, Universitatea Politehnică, București, 1998.