

Approche Méthodologique du Diagnostic d'une Fuite dans un Générateur de Vapeur Sodium - Eau: Résultats de Synthèse et Modèles

L. Loukarfi ⁽¹⁾, J.L. Carreau ⁽²⁾, F. Roger ⁽²⁾, B. Elandalousi ⁽¹⁾ et A. Bettahar ⁽¹⁾

⁽¹⁾ C. U. Chlef, Institut de Mécanique, B.P. 151, Route de Sendjas, 02000 Chlef, Algérie-

⁽²⁾ Université de Poitiers, 40, Avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers, France

(Accepté le 20.09.98)

Résumé – L'éventualité d'une fuite de vapeur d'eau à travers la paroi d'un tube d'un échangeur de chaleur, constitue un problème important pour la sécurité des réacteurs des distributions de quantité de mouvement et de l'énergie cinétique du liquide, est proposé.

L'influence d'une plaque sur le nucléaire à neutrons rapides au sodium. Le jet formé peut percer les tubes voisins (wastage).

Cette étude traite des jets diphasiques du point de vue de leurs formes, radiale et axiale, ainsi que l'entraînement de liquide. Un modèle, basé sur un écoulement bidimensionnel avec glissement, rendant compte jet est étudié parallèlement: des empreintes dues à l'impact de gouttes de soude sont mesurées; leurs forme est comparée à la distribution de l'énergie cinétique du liquide. Quant à l'énergie thermique du jet réactif vapeur d'eau-sodium liquide, une équation est utilisée pour le calcul de la longueur de la zone réactive. Un modèle permet le calcul de l'évolution de la température axiale dans la zone de refroidissement du jet.

Ce phénomène de fuite dans les générateurs de vapeur de "Super Phoenix" est appréhendé selon une démarche qui allie différentes expériences en vue d'une modélisation paramétrique du wastage.

Abstract - The possibility of water vapour leakage through of heat exchanger wall pipe presents a important problem for the safety of sodium nuclear reactor with quick neutrons. The induced jet can pierce the next pipes (wastage).

This study treat the two-phase jets according to their forms, radial and axial, thus the entrainment of liquid. A model is proposed, based on a dimensional flow with slip, reporting on the momentum and the kinetic energy of liquid distributions.

The influence of a plate on the jet is jointly studied: the marks due to the impact of soda drops are measured, their form are compared to the kinetic energy of the liquid distribution.

As for the thermal energy of the reactive jet water vapour-liquid sodium, an equation allows the calculation of the reactive zone length. A model forecast the evolution of axial temperature into the cooling zone of jet. This leakage phenomenon in "Super Phoenix" vapour generators is approached according to a step witch combine different experiments with a view to doing a parametric modelisation of wastage.

Mots Clés: Wastage - Jet diphasique - Jet réactif - Jet impact - Densité d'énergie - Générateur de vapeur - Sodium liquide.

1. INTRODUCTION

Le réacteur "Super Phoenix" compte trois circuits principaux :

- Le circuit primaire de sodium qui absorbe la chaleur produite par le coeur (sodium actif),
- Le circuit secondaire de sodium (inerte) qui transfère au circuit eau-vapeur la chaleur absorbée,
- Le circuit eau-vapeur, où l'eau vaporisée et surchauffée dans les générateurs de vapeur, alimentent les turbines.

Les générateurs de vapeur (G.V.) sont des échangeurs de chaleur où se côtoient de la vapeur d'eau à haute pression et du sodium liquide. Ces deux fluides sont séparés par la paroi d'un tube en Incoloy 800.

Dans la calandre de chaque échangeur, où circulent 3270 kg/s de sodium dont la température est égale à 525 °C à l'entrée, passe à 345 °C à la sortie.

La nécessité d'évacuer les flux importants d'énergie produite dans le coeur, rendent difficile l'emploi des gaz. L'eau n'est pas utilisable en raison de son pouvoir modérateur et enfin les sels fondus posent de nombreux problèmes de corrosion.

La seule solution possible consiste donc à faire appel à un métal liquide, le sodium dans la pratique, en raison de ses intéressantes propriétés (capacité calorifique et conductivité thermique élevées, basse température de fusion (100°C), haute température d'ébullition (882°C), faible viscosité, faible section de capture neutronique ainsi qu'un bas prix.

L'eau entre dans l'échangeur à 235 °C et 21 MPa, la vapeur en ressort à 490 °C et 18 MPa avec un débit de 340 kg/s.

Les tubes de l'échangeur, d'une longueur voisine de 36 km, ont une épaisseur de 2,6 mm. Ces tubes fonctionnent sous contrainte et la possibilité accidentelle de la diffusion de vapeur d'eau vers le sodium à travers une fissure n'est pas à exclure. Ainsi, cette phase latente d'incubation serait contrôlée par des lois de diffusion moléculaire avec réaction chimique à l'interface sodium - eau.

Des phénomènes, dont le mécanisme met enjeu les contraintes mécaniques et thermiques et l'interface des produits de réaction, s'associent pour produire la fuite et provoquer par conséquent l'attaque rapide d'un ou des tubes proches de la fissure. Ces tubes peuvent éventuellement à leur tour devenir des sources de fuite. La compréhension et la maîtrise de ce phénomène appelé "wastage" est capitale pour la sécurité de fonctionnement de tels échangeurs de chaleur.

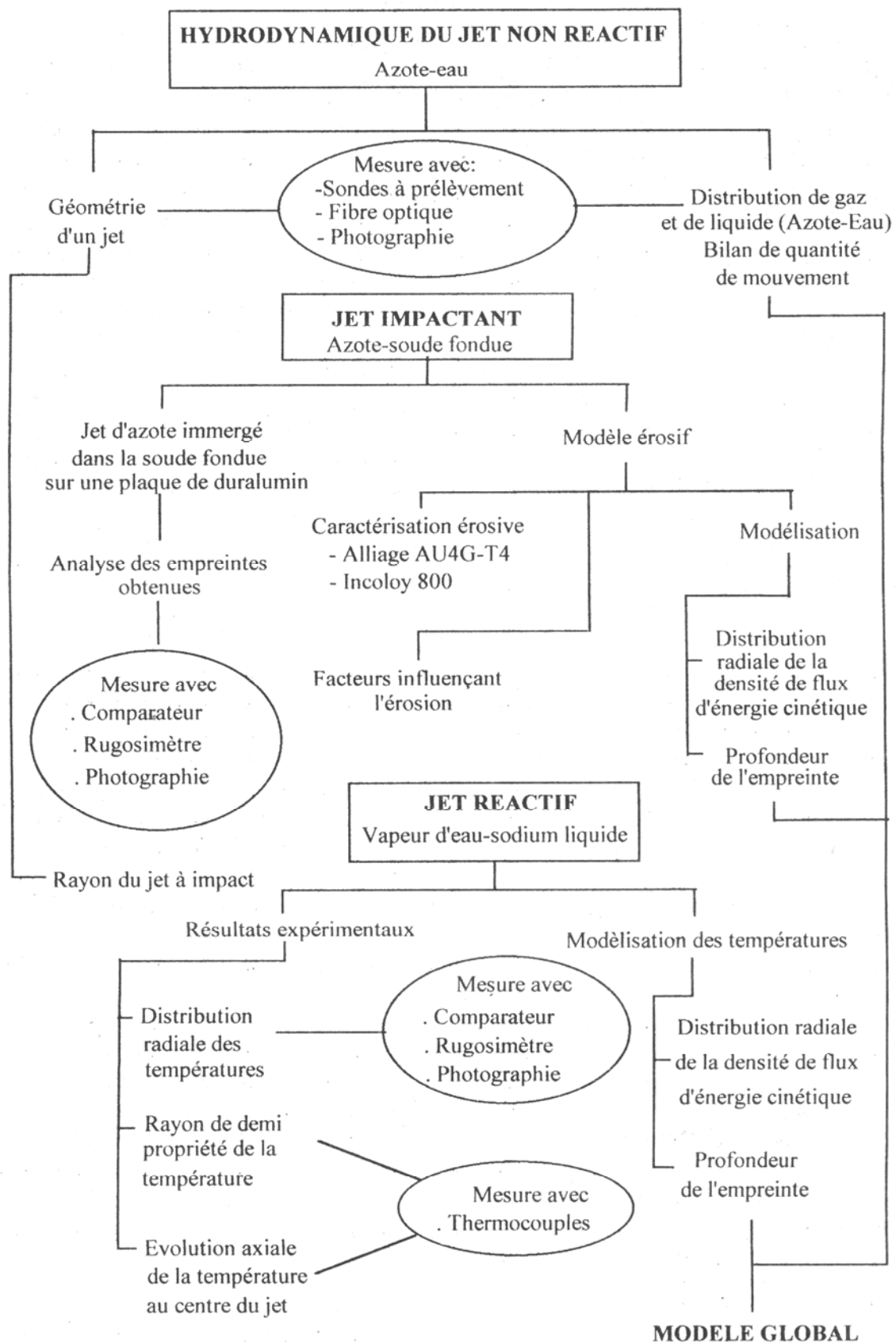
2. APPROCHE METHODOLOGIQUE

Cette approche globale du phénomène, fait appel aux différents transferts mis en jeu dans un jet réactif vapeur d'eau - sodium liquide impactant sous-tendus par des paramètres tels que la forme du jet, l'entraînement de liquide, la vitesse du gaz, la vitesse des gouttes entraînées et la température de la cible et le transfert de chaleur jet - cible.

Pour étudier ces paramètres, différentes installations ont été nécessaires pour mettre en oeuvre :

- L'étude d'un jet froid non réactif en vue de connaître les caractéristiques dynamiques et géométriques ainsi que les distributions des phases en présence.
- La caractérisation de l'aspect érosif du wastage par l'étude des impacts dus à des jets d'azote dans de la soude fondue,
- La détermination de la distribution des températures dans un jet sodium - eau pour estimer celle de la cible.

L'organigramme, reporté ci-après détaille les différentes études et démarches destinées à modéliser le phénomène en question [1].



3. DEMARCHES ET RESULTATS

3.1 Jets froids non réactifs

Cette étude consiste à mettre en forme des variations de longueurs de pénétration, d'une part en fonction de la pression d'injection ($10 \leq Pa \leq 150$ bar), d'autre part en fonction du nombre de Reynolds à l'origine ($10^4 < Re_0 < 10^6$) et cela pour des jets azote - eau et hélium eau, avec des diamètres d'injecteur d_0 (mm) = 0,3 - 0,5 et 0,7. Une mise en forme globale a permis ainsi de rendre compte correctement de la pénétration du jet dans le liquide [2].

Cette étude sur les longueurs de pénétration a servi tout d'abord à dimensionner la cuve à entraînement, utilisée pour cette partie, puis à déterminer la géométrie du jet (enveloppes du jet, angle d'ouverture, zone de détente, zones de perturbations), enfin à dimensionner les différentes installations mises au point et cela, dans les conditions d'expérimentations propres à chacune d'entre-elles.

Le débit liquide entraîné augmente avec la distance axiale et décroît avec la pression. L'entraînement décroît suivant une loi en puissance en fonction du nombre de Reynolds à l'origine et beaucoup plus vite pour des distances axiales élevées. Par ailleurs, est établie selon l'équation (1), une mise en forme adimensionnelle de l'entraînement, analogue à celle utilisée pour les jets homogènes quelle que soit la pression utilisée.

$$\frac{m}{m_0} = 1 + E \left(\frac{x}{d_0} \right) \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (1)$$

Il devient alors clair que le rapport des masses volumiques des fluides est déterminant pour l'entraînement [3]. Des mesures de l'entraînement du liquide sur une section ont permis de préciser la structure interne du jet. L'évolution du titre massique en gaz dans le jet, en fonction des conditions d'injection et des paramètres caractérisant la zone explorée est étudiée.

Ainsi, des profils gaussiens sont obtenus pour les débits de gaz et des profils 'bi-gaussiens' pour les débits du liquide entraîné, à travers une section. Ces derniers, s'étalent à mesure que la distance axiale et/ou la pression augmente. Les maxima observés coïncident avec ceux de l'intensité de turbulence [4].

Les résultats des débits globaux de gaz ou de liquide sur une section, obtenus par intégration des profils, se regroupent parfaitement avec ceux mesurés directement sur les sections correspondantes. Ceci conforte la méthode de mesure utilisée et consolide les résultats obtenus.

Un modèle bidimensionnel de l'entraînement sur une section, avec glissement local, est proposé [5]. Il décrit d'une manière plus réaliste les phénomènes qui ont effectivement lieu dans les jets. En effet, en appliquant la théorie de Zuber et Findlay au jet diphasique qui introduit la notion de 'vitesse de dérive locale' des phases en présence, il a été possible, par la mesure de l'entraînement, complétée par les résultats des mesures des taux de vide déterminés par sondes optiques [6] d'avoir accès à des mesures des grandeurs dans le jet telles que les vitesses de dérive locale pondérées [7].

De même, quelques résultats sur le taux de glissement local et sur le paramètre de distribution du jet décrivant le type d'écoulement ont été obtenus [7].

3.2 Impacts sur cible azote - soude

En parallèle avec cette étude, les effets d'un jet d'azote immergé dans de la soude fondue sur une plaque de Duralumin ont été analysés [8].

- Le diamètre d'un jet diphasique à impact est semblable à celui d'un jet libre.
- Les empreintes passent progressivement de la forme torique à celle d'un cratère unique. Le volume d'empreinte est considéré comme une conséquence du potentiel énergétique du jet. C'est alors que les fonctions liant la profondeur d'une empreinte ou de son volume aux grandeurs expérimentales courantes ont pu être établies.
- La vitesse de wastage volumique maximale est fonction du nombre de Froude modifié.
- L'analogie de Reynolds a été réalisée.
- L'énergie incidente effective est déterminée à partir des expressions donnant l'énergie cinétique moyenne et l'enthalpie, dans une section droite du jet. Ainsi, un modèle mettant en évidence l'importance de la densité d'énergie cinétique, permet d'évaluer la conductance globale de transfert. Les distributions radiales de cette grandeur et de la profondeur des empreintes ont une forme similaire. Par contre, cette profondeur varie comme la racine carrée de la densité du flux d'énergie cinétique du liquide.

3.3 Températures dans le jet réactif sodium-eau et modèle

Enfin, l'analyse des températures dans le jet réactif a permis de dégager quelques points importants [9]:

- La distribution de température peut être assimilée à la fonction erreur, sauf très près de l'injecteur et pour des débits de vapeur supérieurs à 1 g/s.
- Le rayon de demi-propriété de température ne suit pas une loi analogue à celle de la vitesse dans un jet froid. Ceci peut être dû à la présence d'un métal liquide dont le nombre de Prandtl est très éloigné de celui obtenu en [1].
- La température au centre du jet passe par un maximum lorsque la distribution axiale augmente. Ce maximum sera considéré comme la fin de la zone réactionnelle.

Si les diamètres des empreintes obtenues sur l'Incoloy 800 et l'alliage de Duralumin ont le même ordre de grandeur (à condition de conserver le diamètre de l'injecteur, la distance axiale, le nombre de Reynolds et le nombre de Froude), il n'en va pas de même pour la profondeur qui est nettement plus élevée dans le premier cas. Le wastage ne résulte donc pas de l'érosion seule mais accompagnée d'une attaque chimique et de transfert de matière.

Sur la base des équations de conservation du flux massique des produits formés, du flux de quantité de mouvement, du flux d'énergie thermique, un modèle s'appuyant sur un écoulement bidimensionnel avec glissement et utilisant la méthode intégrale est proposé. Il permet le calcul de la vitesse des phases ainsi que la température au centre du jet. La vérification expérimentale en est relativement correcte sauf pour les faibles débits de vapeur.

4. CONCLUSION

Le wastage peut être expliqué par l'érosion, la corrosion ou une interaction entre les deux, lorsqu'il y a une fuite de vapeur d'eau à travers les parois des tubes d'échangeurs.

L'étude paramétrique et expérimentale traite d'un système d'équations extrapolées aux cas des fuites réelles et montre que les facteurs hydrodynamique, thermique et chimique jouent un rôle fondamental dans ce processus.

NOMENCLATURE

D_0 : Diamètre de l'injecteur (m)

X : Distance axiale (m)

ρ_l : Masse volumique du liquide (kg/m^3)

ρ_o : Masse volumique du agz (kg/m^3)

Re_0 : Nombre de Reynolds à l'origine de l'injecteur
 m : Débit massique liquide et gazeux en une section (kg/s)
 m_0 : Débit massique gazeux initial (kg/s)

REFERENCES

- [1] F. Roger, '*Contribution à la Théorie des Jets Gaz-Liquide - Application à la Modélisation de Phénomènes d'érosion-Corrosion*', Thèse de Doctorat d'état, Université de Poitiers, France, 1987.
- [2] J.L. Carreau, F. Roger, L. Loukarfi, L. Gbadoue and P. Hobbes, '*Penetration of an Horizontal Gas Jet Submerged in a Liquid*', Proc. 21st IECEC, San Diego, USA, Paper 869077, pp. 315-319, 1986.
- [3] J.L. Carreau, L. Loukarfi, L. Gbadoue, P. Hobbes and F. Roger, '*Hydrodynamics of an Axisymmetric, Submerged no-Reactive Gas Jet Measurement of Entrainment : Contribution to the wastage modelling*', Proc 20th IECEC, Miami, USA, Paper 859176, pp. 688-695, 1985.
- [4] L. Loukarfi, B. Elandaloussi and A. Bettahar, '*Mesures de l'Entraînement dans la Section d'un Jet non Réactif de Gaz Immérgé dans un Liquide*', Proc. Séminaire National de Mécanique, C. U. de Guelma, Algérie, pp. 62-70, 29-30 Novembre 1994.
- [5] L. Loukarfi, B. Elandaloussi and A. Bettahar, '*Modèles Simplifiés pour les débits de gaz et de Liquide Entraînés dans un Jet Immérgé non Réactif*', Actes du 4^{ème} Séminaire National de Mécanique, E.N.S.E.T. d'Oran, Algérie, pp. 105-110, 25-26 Avril 1995).
- [6] A. Colleoc, '*Caractérisation de l'Écoulement Diphasique dans un Jet Immérgé non réactif*', Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, France, 1990.
- [7] L. Loukarfi, B. Elandaloussi et A. Bettahar, '*Vitesses Débitantes et Vitesses de Dérive Locale dans un Jet Diphasique non Réactif*', Proc. 2^{èmes} Journées d'Etudes Nationales de Mécanique, C. U. de Mostaganem, Algérie, pp. 34-45 et 14-15, Décembre 1994).
- [8] B. Elandaloussi, L.G. Gbadoue, J.L. Carreau, P. Hobbes and F. Roger, '*Wastage Simulation with Submergea Impinging hot Nitrogen Jet in Molten Sodium Hydroxid - Volume Losse Wastage Rate Modelisation*', Proc. 21st IECEC, San Diego, USA, Paper 869075, pp. 305-309, 1986.
- [9] N. Sekkouti, '*Caractéristiques Thermiques d'un Jet Réactif Vapeur d'Eau - Sodium Liquide - Modélisation Monodimensionnelle de la Température dans un Jet Diphasique*', Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle, Université de Poitiers, France, 1985.

ANNEXES

La détermination des températures dans la zone de refroidissement tient compte du glissement entre les phases, obtenu grâce aux expériences faites avec un jet azote - eau simulant le jet vapeur d'eau - sodium liquide. Il s'écrit

$$S = \frac{\langle 1 - \alpha \rangle}{\frac{J}{C_0 + \varpi_{gl}} - \langle \alpha \rangle}$$

α : Taux de présence du gaz,

C_0 : Coefficient de distribution,

ϖ_{gl} : Vitesse de dérive locale pondérée par le taux de présence de gaz.

Le modèle repose sur des hypothèses simplificatrices. En effet, le régime est stationnaire; l'influence de la réaction chimique et de la poussée d'Archimède sur le jet sont négligeables; le système est adiabatique; et les variations de quantité de mouvement lors de la vaporisation ou de la condensation du sodium sont négligées. Le modèle s'écrit :

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_c} = \exp \left(-k \cdot \left[\frac{r}{bT} \right]^2 \right)$$

avec :

ΔT : Différence de température $T - T_{in}$

T_{in} : Température ambiante

ΔT_c : Différence de température $T_c - T_{in}$

T_c : Température au centre du jet

bT : Rayon de demi propriété de la température

k : ln 1

r : Coordonnée radiale

x_v : Abscisse de l'origine virtuelle

Le modèle, appelé DT3, utilise les équations de conservation des produits de la réaction, de conservation de la quantité de mouvement et de conservation de l'énergie thermique.

Le système d'équations est résolu par la méthode de convergence explicite.

1. Conservation des produits de la réaction

La conservation du flux massique des produits formés s'écrit :

$$\frac{41}{18} m_0 = 2 \cdot \pi \int_0^{R_j} \rho_g \cdot W_g \cdot (1 - Y_3) \cdot \alpha \cdot r \cdot dr$$

avec :

m_0 : Débit massique de gaz injecté

R_j : Rayon du jet

Y_3 : Titre massique du sodium vaporisé

W_g : Vitesse du gaz

ρ_g : Masse volumique de gaz

α : Taux de présence local du gaz

2. Conservation du flux de quantité de mouvement

Pour la conservation du flux de quantité de mouvement, la relation suivante est utilisée :

$$I_0 = 2 \cdot \pi \int_0^{R_j} (\rho_g \cdot W_g^2 \cdot \alpha + \rho_l \cdot W_l^2 \cdot (1 - \alpha)) \cdot r \cdot dr$$

avec :

ρ_l : Masse volumique du liquide,
 W_l : Vitesse du liquide.

3. Conservation du flux d'énergie thermique

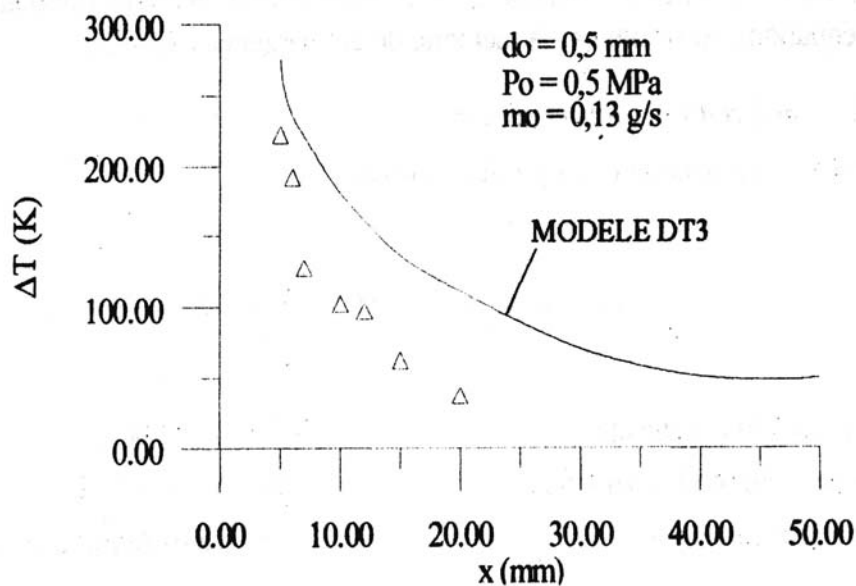
Le flux d'énergie thermique est représenté par la chaleur sensible véhiculée par le gaz, la chaleur latente véhiculée par le sodium vapeur et la chaleur sensible véhiculée par le liquide. Il s'écrit :

$$m_0 H_0 = 2 \cdot \pi \int_0^{R_j} \rho_g \cdot W_g \cdot \alpha \cdot \overline{C_{pg}} (T - T_{in}) r \cdot dr + 2 \cdot \pi \int_0^{R_j} \rho_g \cdot W_g \cdot \alpha \cdot Y_3 \cdot L_v \\ + 2 \cdot \pi \int_0^{R_j} \rho_l \cdot W_l \cdot (1 - \alpha) \cdot \overline{C_{pl}} \cdot (T - T_{in}) r \cdot dr$$

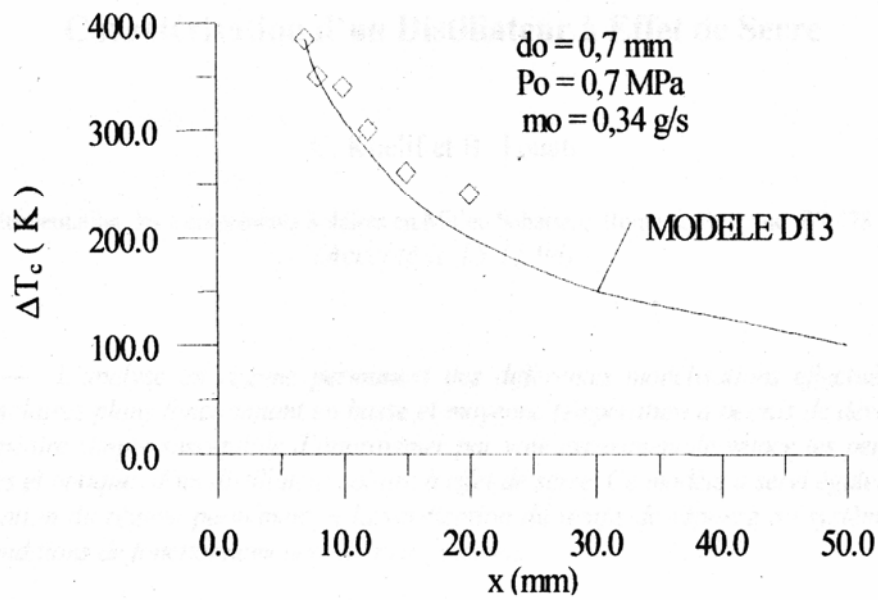
avec :

H_0 : Chaleur fournie au système par la réaction chimique par unité de masse de vapeur d'eau,
 $\overline{C_{pg}}$: Chaleur spécifique massique moyenne du mélange gazeux,
 L_v : Chaleur de vaporisation du sodium,
 $\overline{C_{pl}}$: Chaleur spécifique massique moyenne du sodium liquide.

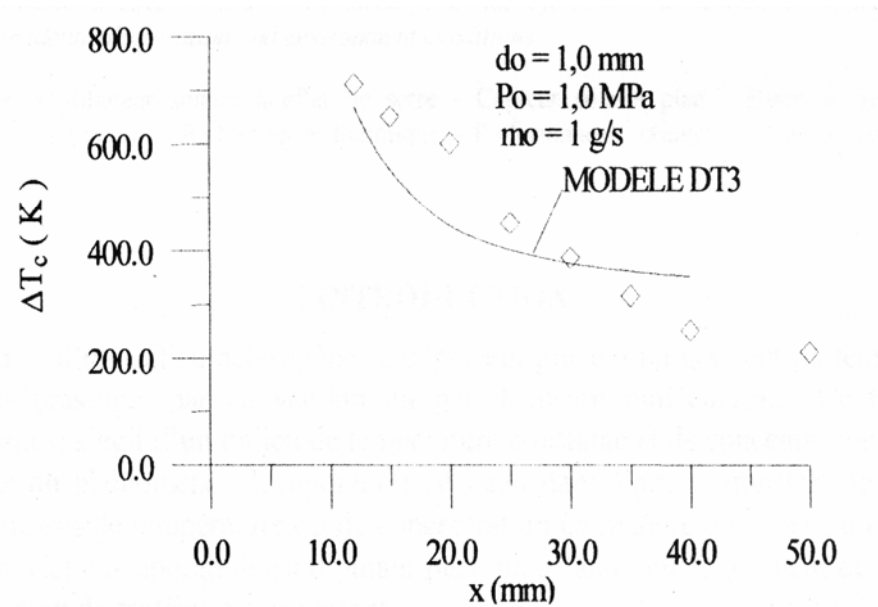
Les suffixes 1, 2, 3, 4 et 5 sont affectés respectivement à l'hydrogène, à la soude, au sodium, à l'aérosol soude - hydrogène et au sodium liquide.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1: Comparaison des valeurs de ΔT_c calculées et expérimentales [1]

Sur la base des résultats obtenus par ailleurs comme le montre l'organigramme général de l'étude, associés aux autres équations de conservation et grâce à une méthode de convergence explicite, l'équation du flux thermique est résolue numériquement. Les graphes présentés permettent de rendre compte de ce modèle comparé aux résultats d'expérience selon trois différentes conditions de mesures, dans la direction axiale du jet.