

# Étude et simulation d'un jet chaud débouchant dans un écoulement transverse

David DONJAT\*, Hervé BEZARD, Farid BENYOUCEF, Philippe REULET, Francis MICHELI

Département Modèles pour l'Aérodynamique et l'Énergétique  
ONERA Centre de Toulouse - 2 avenue E. Belin - 31055 Toulouse

\*(auteur correspondant : david.donjat@onera.fr)

**Résumé** - Cet article présente un travail expérimental et numérique qui vise à améliorer la compréhension et les méthodes de prévision du mélange aérothermique généré par des jets chauds débouchant dans un écoulement transverse froid ainsi que leur impact thermique sur les parois situées en aval. Les résultats des essais de caractérisation du jet en soufflerie sont décrits ainsi que des simulations RANS et URANS de la configuration expérimentale avec un modèle de turbulence standard, un modèle modifié destiné à améliorer les prévisions et le modèle SAS permettant d'obtenir une description fine des structures turbulentes dans le jet.

## Nomenclature

$C_R$	rapport de Callaghan ( $\rho_j W_j / \rho_0 U_0$ )	$T$	température, $K$
$D$	diamètre de l'éjecteur, $m$	<i>Symboles grecs</i>	
$Q$	débit massique, $kg/s$	$\alpha$	incidence, $^\circ$
$Re$	Nombre de Reynolds	$\omega$	taux de dissipation spécifique, $s^{-1}$
$k$	énergie cinétique turbulente, $m^2 \cdot s^{-2}$	<i>Indices et exposants</i>	
$L$	échelle de longueur $m$	$p$	paroi
$U, V, W$	composantes de vitesse	$j$	relatif au jet

## 1. Introduction

Le type d'écoulement étudié concerne de nombreuses applications aéronautiques comme le refroidissement par film des parois d'aubes de turbomachines ou bien les sorties d'air chaud issues de différents systèmes présents dans un avion. La configuration choisie correspond ainsi au cas dimensionnant d'une évacuation d'air généré par le système d'anti-givrage de bord d'attaque de nacelles d'avion de transport dont le jet chaud vient impacter la paroi composite (voir figure 1).

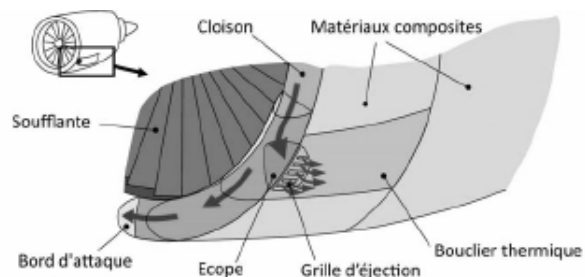


Figure 1 : Dispositif NAI (pour Nacelle Anti-Ice) installé sur avion A380 et principe du système

Cette configuration particulière a déjà fait l'objet d'une étude préliminaire en soufflerie [1] qui a permis l'optimisation des grilles d'évacuation montées sur avion. Néanmoins, cet écoulement est complexe, d'une part dans sa description physique (ce qui se traduit par une

importante littérature dans laquelle nous pouvons citer [2] et [3]), et d'autre part, par les limitations que rencontrent les approches numériques. Ainsi des études précédentes [1][5] ont montré que les modèles de turbulence RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) habituellement utilisés dans l'industrie, qu'ils soient simples comme les modèles à viscosité turbulente ou complexes comme les modèles aux tensions de Reynolds, sous-estiment fortement l'étendue transversale de la trace thermique en aval de l'éjection. Une première explication est la non prise en compte de l'instationnarité, ce qui peut être résolu par des calculs URANS (Unsteady RANS), une deuxième explication est la non résolution des échelles turbulentes, ce qui peut être fait par des méthodes adéquates telles que la LES (Large Eddy Simulation) ou les méthodes hybrides RANS/LES. Néanmoins sans en arriver à des méthodes coûteuses en maillage et temps de calcul, il peut être tenté d'abord de corriger les modèles de turbulence existants en modifiant les équations de transport, ce qui sera présenté dans la suite du papier. D'autre part il existe des méthodes résolvant la turbulence plus simples que la LES, telle que la SAS (Scale Adaptive Simulation) de Menter *et al.* [6], bien adaptée au cas d'écoulements présentant de fortes instabilités, ce qui est le cas des jets débouchants dans un écoulement transverse. Cette approche sera validée dans la suite du papier et comparée à une simulation URANS standard permettant de montrer l'apport de l'instationnarité.

## 2. Etude expérimentale

### 2.1. Maquette d'étude et mesures effectuées

L'expérience a été menée dans la soufflerie F2 du centre Fauga-Mauzac de l'ONERA sur la maquette présentée en figure 2 et dont les principales caractéristiques sont décrites dans [1].

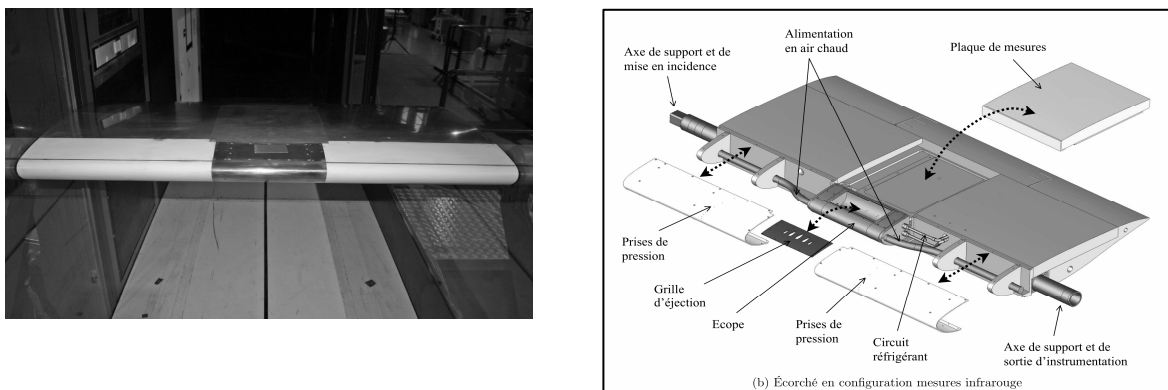


Figure 2 : Maquette d'essai et son montage dans la veine de F2

Elle consiste en un profil développé de nacelle intégrant un système d'éjection générant un jet carré chaud à 80°C. Ce système d'éjection est proche de la géométrie réelle sur avion et est constitué de deux écoulements opposés se mélangeant dans une écobe obstruée par une plaque trouée (éjecteur de forme carrée avec  $D=30$  mm). Ce profil est placé dans la veine avec un angle d'incidence de 1°. Les conditions de soufflerie correspondent à un nombre de Reynolds (basé sur la corde) de  $2,17 \cdot 10^6$ . L'interaction du jet chaud et de l'écoulement transverse se caractérise par un nombre de Callaghan-Ruggeri de 0,69 qui indique le développement d'un écoulement rampant qui vient réchauffer localement l'extrados du profil en aval de l'éjecteur.

Des mesures thermiques et aérodynamiques sont mises en œuvre dans le but d'analyser les phénomènes physiques mis en jeu. Une cartographie de la température du jet est réalisée au

niveau du plan d'éjection avec l'aide d'une sonde thermocouple. Ces données sont complétées par des mesures de thermographie infrarouge permettant d'évaluer les transferts thermiques au niveau de la paroi en aval du jet. De plus, une visualisation de l'écoulement est réalisée par technique de tomographie laser et par méthode BOS. Dans un second temps, des sondages haute fréquence sont effectués par LDA 3C permettant une quantification de la vitesse et des fluctuations dans la zone de développement du jet, ainsi qu'une étude spectrale poussée (à partir de l'analyse fréquentielle de 250000 particules acquises par point de mesures aux cadences maximales disponibles via la méthode de Nobach [7]).

## 2.2. Principaux résultats

D'un point de vue thermique, les mesures par thermographie IR révèlent la trace thermique laissée par le jet chaud rampant sur la surface du profil (voir figure 6). Ces mesures sont aussi réalisées au niveau de la grille d'éjection afin de rendre compte des conditions aux limites thermique amont. Un sondage thermométrique du jet est effectué au niveau du plan d'éjection afin de s'assurer des conditions de température en sortie d'éjecteur. La figure 3 illustre cette campagne et révèle un champ de température légèrement dissymétrique, résultat du mélange qui s'opère au niveau de l'écope. Cette dissymétrie se retrouve sur les champs de température plus aval.

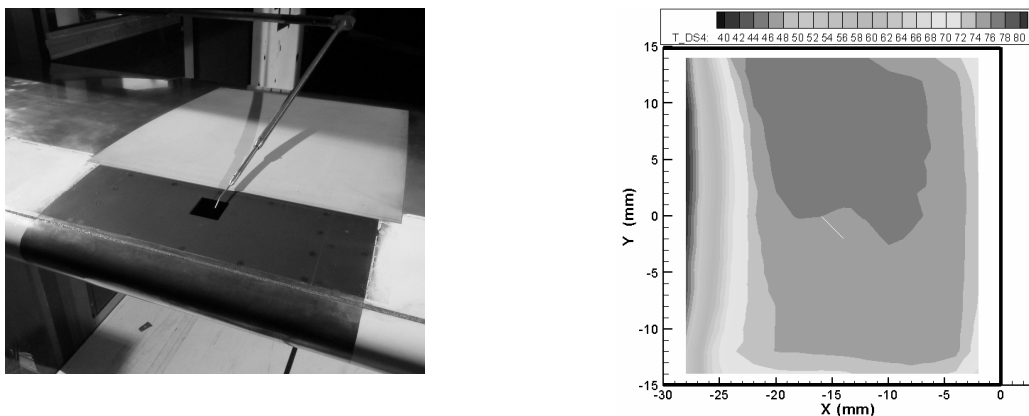


Figure 3 : Sondage par thermocouple de la section d'éjection du jet

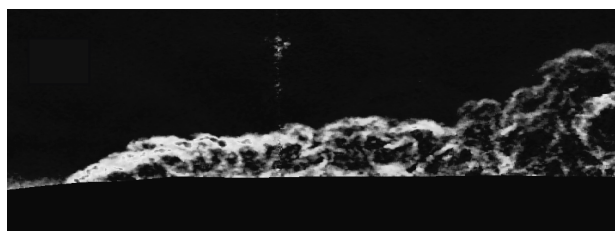


Figure 4 : Visualisation du jet obtenue par BOS (c.à.d par mesure des déviations optiques induits par les gradients de masse volumiques)

Sur le plan dynamique, les premières visualisations de l'écoulement illustrent le caractère rampant du jet couché par l'écoulement transverse et venant ainsi réchauffer la paroi du profil (figure 4). Les sondages réalisés par LDA dans la zone d'éjection ont permis d'une part une exploration du plan d'éjection et d'autre part une analyse fine de l'écoulement suivant les plans axial et transverse en aval du jet. La figure 5 montre la trajectoire moyenne du jet ainsi que la zone de recirculation derrière celui-ci. C'est dans cette région que la présence de structures cohérentes qui animent le jet rampant est clairement détectée via la mesure d'une fréquence caractéristique d'un battement latéral à 220 Hz.

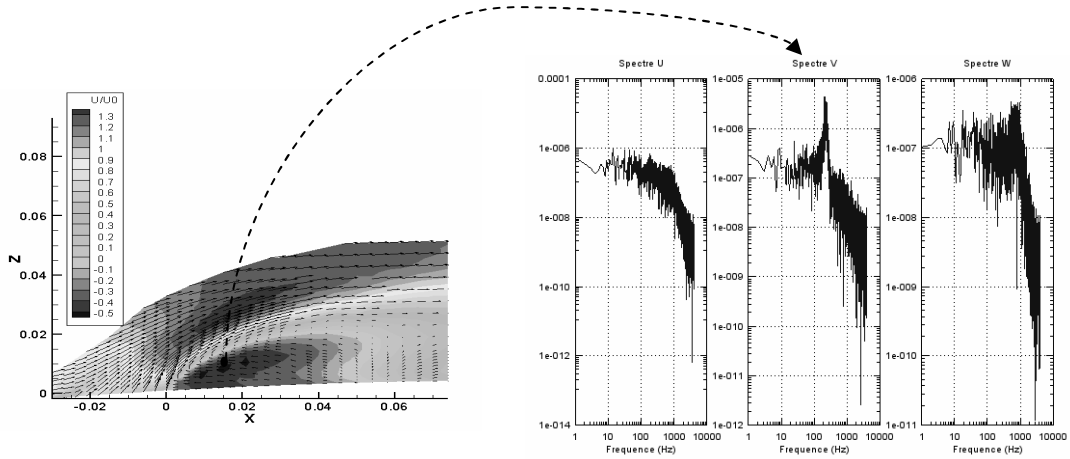


Figure 5 : Champ de vitesse axiale suivant le plan  $Y=0$  et analyse fréquentielle dans la zone de sillage

### 3. Etude numérique

#### 3.1. Simulations RANS

Afin d'améliorer les prévisions des modèles de turbulence classiques, des simulations LES (non présentées ici) ont été effectuées par le CERFACS sur une configuration géométrique simplifiée mais dans les mêmes conditions dynamiques et thermiques de l'expérience et qui ont fourni des résultats satisfaisants par rapport à l'expérience [6]. Le but était de fournir une base de données (grandeurs moyennes, valeurs rms et corrélations triples) permettant d'analyser l'écoulement du point de vue d'un modèle de turbulence. Il a ainsi été montré l'existence d'une forte production turbulente près de la paroi sous le panache du jet correspondant au battement latéral de l'écoulement et à la formation de structures en forme d'arches dans cette région.

Compte tenu de ces observations, une modification a été apportée à un modèle à viscosité turbulente à deux équations de transport, en l'occurrence le modèle  $k-\omega$  SST de Menter [6], par l'ajout d'un terme puits dans l'équation de transport pour  $\omega$  de la forme :

$$-\rho f_j C_j \max(\eta_4, 0) / \omega \text{ avec } \eta_4 = \text{trace}(S\Omega^2) \text{ et } f_j = \exp[-(\alpha_j Re_y)^6] \quad (1)$$

Ce terme est fonction du quatrième invariant  $\eta_4$  des tenseurs gradients de vitesse. Il est pondéré par une constante multiplicative  $C_j$  et une fonction d'amortissement  $f_j$  fonction du nombre de Reynolds turbulent  $Re_y$  formé avec la distance  $y$  normale à la paroi pour limiter son influence dans les zones de proche paroi. Ce terme est nul en écoulement bidimensionnel et s'active en écoulement tridimensionnel notamment en présence de vorticité normale à la paroi comme en aval de l'éjection sous le panache du jet. Le but est de diminuer la deuxième échelle turbulente de façon à augmenter la production turbulente dans cette région et à reproduire la physique observ e.

Afin de valider le développement proposé, des simulations RANS stationnaires ont été effectu es à l'aide du code Navier-Stokes *elsA* [9] de l'ONERA dans les conditions de l'expérience. Pour cela un maillage multiblocs structuré a été créé à l'aide du logiciel ICEM-CFD. Il possède environ 12 millions de cellules et comprend les conduites amenant l'air chaud dans l' coper situ e sous la grille d'éjection où une condition de débit est impos e en entrée. Le domaine de calcul est limité extérieurement par les parois de la soufflerie sur

lesquelles est imposée une condition de glissement. Du fait de la symétrie de la configuration, seule la moitié du maillage a été utilisée et une condition de symétrie est imposée sur le plan central.

Les champs d'efficacité thermique  $\eta = (T-T_0)/(T_{jet}-T_0)$  sur la paroi de la maquette en aval de l'éjecteur sont présentées sur la figure 6. L'efficacité thermique vaut 0, respectivement 1, quand la température de l'écoulement est égale à la température amont, respectivement à la température du jet. Les mesures sont comparées aux deux simulations avec le modèle  $k-\omega$  SST standard et avec le modèle modifié. On peut constater que le modèle initial présente une trace thermique pariétale très étroite contrairement à l'expérience, même si les niveaux le long de la ligne de symétrie en sont assez proches. La modification introduite permet d'élargir la trace thermique, mais son effet est encore trop faible pour reproduire parfaitement l'expérience.

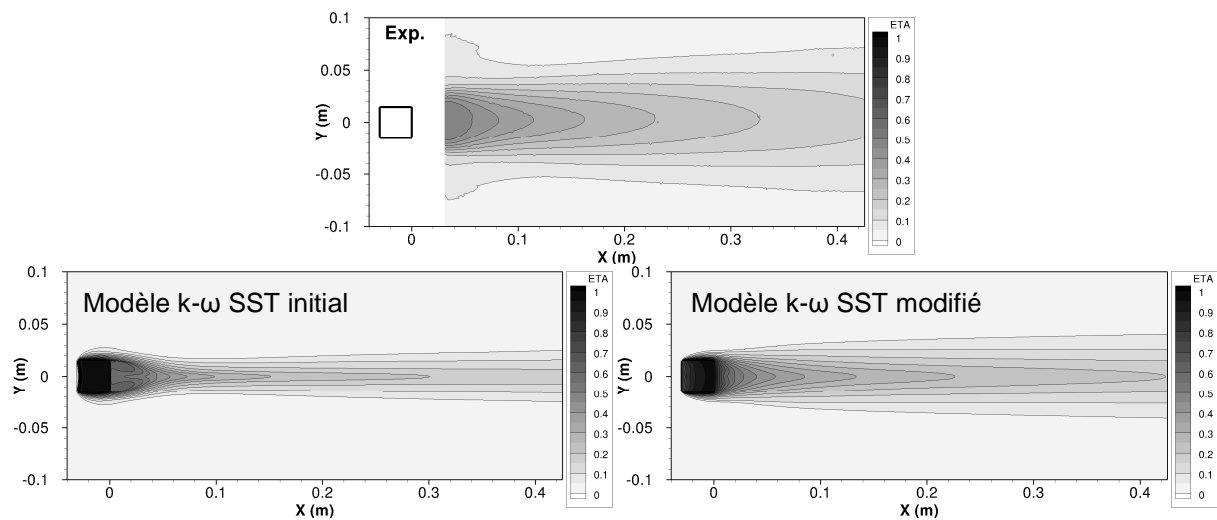


Figure 6 : Champs pariétaux d'efficacité thermique

Dans le plan de symétrie de la configuration (figure 7), la modification introduite permet de retrouver l'allure qualitative et quantitative de l'expérience, alors que le modèle initial donne une efficacité maximale selon une ligne qui s'écarte fortement de la paroi, contrairement à l'expérience ou au modèle modifié qui donnent l'efficacité maximale à la paroi. La différence entre l'expérience et la simulation avec le modèle  $k-\omega$  SST standard s'explique par le fait que le jet simulé ne diffuse pas assez près de la paroi et s'écarte vers le haut, ce qui explique la faible étendue latérale. La modification introduite, en augmentant la production turbulente en aval de l'éjecteur sous le panache du jet, permet de reproduire une partie de la physique observée et de diffuser le jet vers la paroi.

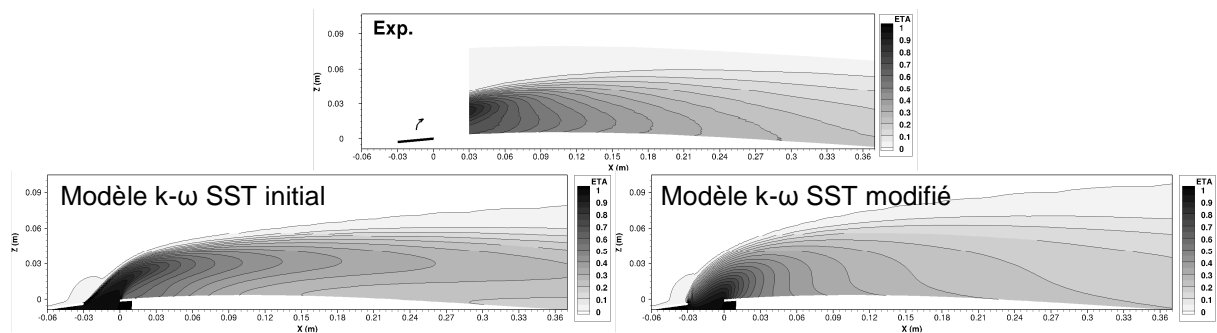


Figure 7 : Champs d'efficacité thermique dans le plan de symétrie

Différents tests paramétriques ont été effectués en modifiant les valeurs de la constante multiplicatives  $C_j$  du modèle modifié, ainsi que la constante  $\alpha_j$  de la fonction d'amortissement (voir équation (1)) permettant de limiter plus ou moins l'influence de la modification dans l'écoulement. Ces tests n'ont pas permis d'améliorer les prévisions. On voit donc ici les limites des approches RANS pour la prévision des écoulements de jets débouchants.

### 3.2. Simulations URANS

Compte tenu des résultats précédents et sachant que l'étendue latérale de la trace thermique du jet est due à un battement instationnaire à faible fréquence (figure 5), une meilleure approche est de prendre en compte l'instationnarité intrinsèque de l'écoulement par la simulation instationnaire. Les simulations hybrides RANS/LES sont toutes indiquées pour ce genre de configuration. Néanmoins il est intéressant d'utiliser une approche intermédiaire comme la SAS (Scale Adaptive Simulation) de Menter et al. [6] qui relève plus d'une méthode URANS avancée. En effet, elle permet de capter les instabilités de l'écoulement lorsqu'elles sont présentes et de rester naturellement en mode RANS dans les couches limites. L'approche SAS consiste à ajouter un terme source dans l'équation de transport pour  $\omega$  fonction des dérivées premières et deuxièmes de la vitesse. Ce terme s'active en présence d'instabilités et provoque la diminution de la viscosité turbulente, ce qui conduit à entretenir et développer ces instabilités.

Des simulations instationnaires ont été réalisées avec une version légèrement modifiée du modèle SAS développée à l'ONERA par Benyoucef *et al.* [10] (nommé SAS- $\alpha L$  ci-après) et permettant un meilleur développement des instabilités au sein des couches de mélange. Par comparaison on a également réalisé des simulations instationnaires avec le modèle  $k-\omega$  SST standard, ce qui permet de juger de la prise en compte de l'instationnarité dans un modèle de turbulence classique. Ces simulations ont été réalisées à l'aide du code *elsA* de l'ONERA. La résolution spatiale est obtenue par une extension à l'ordre 7 du schéma AUSM+ et la résolution temporelle est implicite avec une méthode sous-itérative de GEAR et un pas de temps de  $10^{-5}$  s. Le même maillage que précédemment à 12 millions de cellules a été utilisé.

On présente tout d'abord sur la figure 8 un champ instantané de l'écoulement en traçant les iso-surfaces du critère  $Q$  colorées par la température, permettant de visualiser les structures turbulentes. On peut constater que l'approche SAS- $\alpha L$  capture de nombreuses structures contrairement au modèle de turbulence standard qui dissipe très rapidement les instabilités captées au départ du jet.

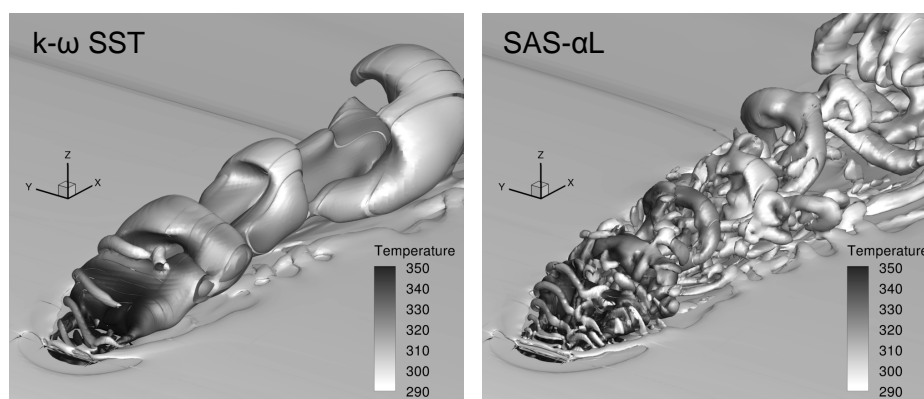


Figure 8 : Iso-surfaces de critère  $Q$  colorées par la température

Malgré un schéma spatial et temporel précis, un modèle de turbulence classique utilisé en instationnaire n'est pas apte à reproduire toute l'instationnarité d'un écoulement de jet

débouchant. Sur la simulation SAS, on voit clairement les instabilités de Kelvin-Helmholtz à haute fréquence se développant dans la couche cisailée au départ de l'arête frontale de l'éjecteur, et la formation des arches en aval de l'éjection à une fréquence plus faible. Le battement latéral du jet à faible fréquence n'est pas visible sur cette figure, mais une animation sur quelques centaines de pas de temps permet de le mettre en évidence.

Pour des comparaisons plus quantitatives, les simulations ont été exploitées d'un point de vue statistique en effectuant des moyennes sur 50 000 pas de temps. Les champs surfaciques pariétaux d'efficacité thermique sont présentés sur la figure 9. Bien que le modèle  $k-\omega$  SST standard sous-estime toujours fortement l'étendue latérale de la trace thermique, ses résultats sont meilleurs en instationnaire qu'en stationnaire (cf. figure 6). Néanmoins on est loin de la prévision obtenue avec la SAS qui donne une excellente comparaison avec l'expérience.

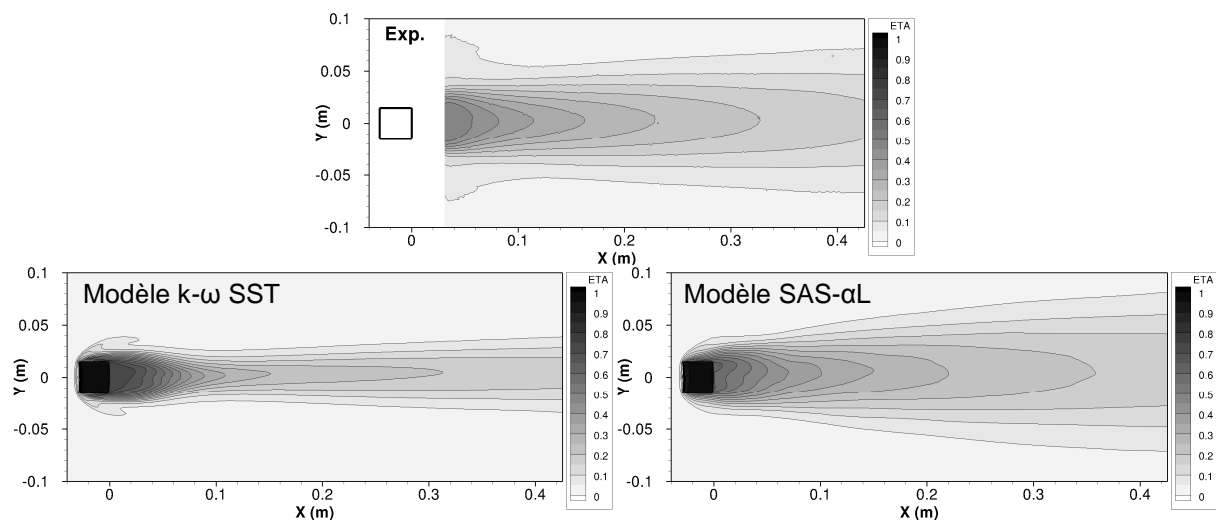


Figure 9 : Champs pariétaux d'efficacité thermique

Les comparaisons de l'efficacité thermique à la paroi sont présentées suivant différentes lignes transverses à  $x$  constant sur la figure 10. A un diamètre en aval de l'éjecteur ( $x = 0,03 \text{ m}$ ) le modèle standard surestime l'efficacité au niveau de la ligne centrale et présente déjà une étendue plus faible que dans l'expérience, alors que la SAS est proche de l'expérience. Des différences notables apparaissent sur les bords du jet mais proviennent de la non prise en compte dans la simulation de la condition thermique sur la grille d'éjection qui est chauffée par l'écoulement dans l'écope et réchauffe à son tour l'écoulement de couche limite se développant sur les bords. A  $x = 0,07 \text{ m}$  le modèle standard donne un niveau central correct mais sous-estime fortement l'étendue latérale expérimentale, contrairement à la SAS.

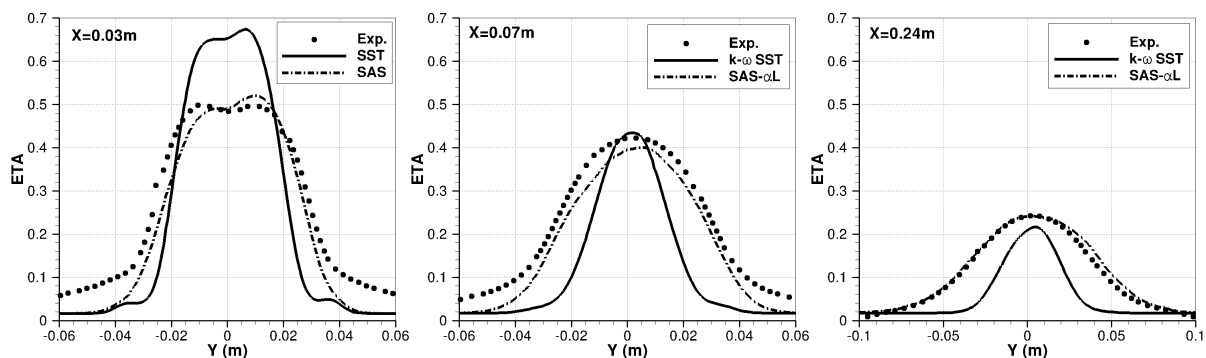


Figure 10 : Efficacité thermique pariétale à différentes positions en aval de l'éjecteur

A  $x = 0,24 \text{ m}$  la SAS reproduit parfaitement la courbe expérimentale alors que le modèle standard sous-estime à la fois le niveau central et l'étendue latérale. Des comparaisons sur les champs de vitesse et les grandeurs turbulentes, non présentées ici, montrent que la SAS reproduit très bien la dynamique de l'écoulement ainsi que la fréquence caractéristique du battement latéral du jet autour de  $220 \text{ Hz}$ , contrairement au modèle de turbulence standard.

## 4. Conclusion

Une étude expérimentale a permis de compléter une première base de données sur la configuration présentée. Les mesures thermiques par thermocouple au niveau de l'éjection ainsi que les mesures thermo infrarouges ont permis d'obtenir des conditions aux limites thermiques précises. Elles ont aussi mis en évidence une dissymétrie de l'écoulement de jet induit par la configuration particulière de son alimentation. Les mesures dynamiques ont confirmé ces tendances. Enfin, les mesures haute cadence de LDA ont amélioré la description instationnaire de ce type d'écoulement. D'un point de vue numérique, il a été montré qu'il est possible d'améliorer les prévisions d'un modèle de turbulence pour un écoulement de jet chaud débouchant dans un écoulement transverse par une modification simple de l'équation de transport pour la deuxième échelle turbulente. Néanmoins cette modification a ses limites et seule la prise en compte de l'instationnarité et la résolution des échelles turbulentes grâce à l'approche SAS permet de reproduire fidèlement la physique de l'écoulement.

## Références

- [1] L. Albugues, Analyse expérimentale et numérique d'un jet débouchant dans un écoulement transverse, Thèse de l'ISAE-SUPAERO, 2005.
- [2] R.J. Margason, Fifty years of jet in cross flow research. *AGARD CP-534* (1993), 1.1-1.41
- [3] T.F. Fric, A. Roshko, Vortical structure in the wake of a transverse jet. *JFM* 279 (1994), 1-47
- [4] J. Alvarez, W.P. Jones, R. Seoud, Predictions of momentum and scalar fields in a jet in cross-flow using first and second order turbulence closures. *AGARD CP-534* (1993), 24.1–24.10
- [5] S. Acharya, M. Tyagi, A. Hoda, F. Muldoon, From RANS to DNS: Application to film cooling, *26<sup>th</sup> National Conference on Fluid Mechanics & Fluid Power*, IIT, Kharagpur, India (1999)
- [6] F.R. Menter, Y. Egorov, A scale-adaptive simulation model using two-equation models. *43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, January 10-13 (2005)
- [7] H. Nobach, E. Müller, C. Tropea, Correlation estimator for two-channel, non-coincidence Laser Doppler Anemometer, *9th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbonne, Juillet 1998
- [8] J.-C. Jouhaud, L.Y.M. Gicquel, B. Enaux, M.-J. Estève, LES modeling for aerothermal predictions behind a jet in cross-flow, *AIAA Journal*, 45-10 (2007), 2438-2447
- [9] L. Cambier, M. Gazaix, elsA: An Efficient Object-Oriented Solution to CFD Complexity, *40<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, January 14-17 (2002)
- [10] F. Benyoucef, H. Bézard, B. Aupoix, B. Michel, SAS-SST Model Assessment and Improvement, *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12)*, Budapest, Hungary, September 4-7 (2012)

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace (FRAE) pour son soutien financier dans le cadre du projet de recherche ASTHER en collaboration avec Airbus et le CERFACS, ainsi que la Communauté Européenne pour son soutien financier dans le cadre du projet de recherche CRESCENDO.