

Dimensionnement d'un banc d'essais pour l'étude de l'évolution aérothermique transitoire de la cavité nacelle d'un turboréacteur

E. DIVOURON², P. REULET^{1*}, P. MILLAN¹, M. BALLAND²

¹ Office National d'Études et Recherches Aérospatiales – centre de Toulouse

2, Avenue Édouard Belin – 31055 TOULOUSE Cedex 4

² SNECMA VILLAROCHE – Groupe SAFRAN

Rond-point René Ravaud - Réau – 77550 MOISSY-CRAMAYEL

* (auteur correspondant : philippe.reulet@oncert.fr)

Résumé - Un banc d'essais a été monté afin de réaliser une base de données sur le couplage fluide-solide en instationnaire qui soit représentatif des phénomènes aérothermiques existant au sein du compartiment nacelle d'une turbomachine. Sont présentés dans cet article les travaux de dimensionnement, les spécificités du banc et les travaux de traitement de données spécifiques à des mesures par thermographie infrarouge en cavité fermée avec prise en compte des multiréflexions.

Nomenclature

| | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| T | température, K | Dh | diamètre hydraulique |
| F | facteur de forme | <i>exposants</i> | |
| <i>Symboles grecs</i> | | p | partant |
| λ | longueur d'onde, m | \acute{e} | émis |
| ε | émissivité | r | réfléchi |
| ρ | réflectivité | o | émis par un corps noir |

1. Introduction

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du projet ATRAN qui a pour but la prise en compte des phénomènes de couplage Aérothermique lors des phases de vol TRANsitoires au niveau de la cavité nacelle d'une turbomachine. Cette enceinte, délimitée par le carter moteur, les capots internes des inverseurs de poussée (IFS) et le mât réacteur, est le siège d'échanges thermiques intenses (rayonnement, convection et conduction). Des équipements moteur et avion (comme des vannes, des conduites, des harnais électriques et des échangeurs thermiques) y sont installés. Une ventilation obtenue grâce à des trous effectués dans l'IFS qui souffle de l'air frais provenant du flux secondaire est nécessaire afin d'assurer la fiabilité des équipements critiques tout au long de la vie de l'avion. Des tubes ou des déflecteurs peuvent être installés sur ces trous afin de rediriger le flux d'air frais vers certains équipements spécifiques.

L'étude bibliographique sur le couplage aérothermique en transitoire et la réalisation d'un nouveau couplage assurant le meilleur ratio erreur - coût de calcul a été effectuée par Emmanuel Radenac [1]. Des mesures expérimentales sur des bancs d'essais représentatifs d'un phénomène aérothermique existant dans la cavité nacelle ont permis de valider ce couplage.

La seconde étape du projet, présentée ici, doit, dans un premier temps, établir une base de données expérimentales sur des configurations géométriques à mi chemin entre les premières configurations académiques et les modélisations actuelles du moteur réel afin de les comparer ensuite aux simulations numériques.

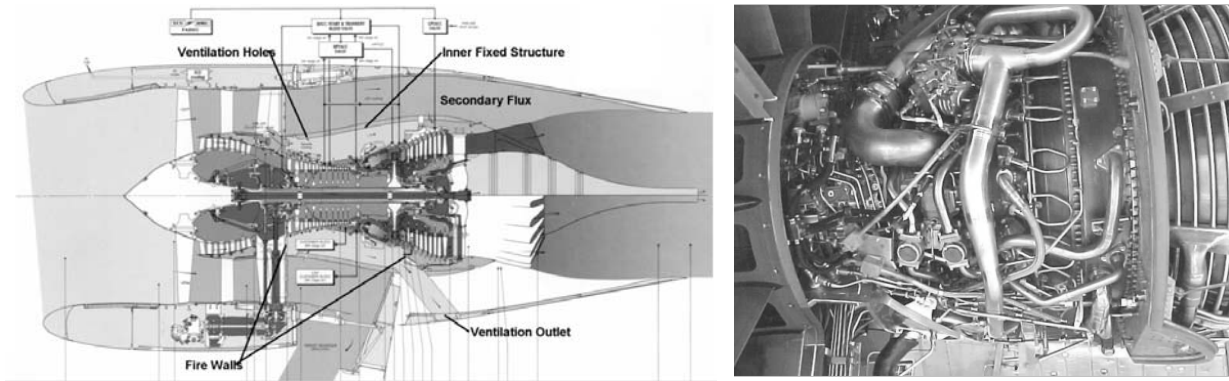


Figure 1 : Positionnement et vue d'une cavité nacelle

2. Dimensionnement du banc

Le banc doit permettre de réaliser des mesures entre deux conditions aérodynamiques simulant le ralenti sol et le plein gaz, pour deux types de moteurs et d'ajouter des équipements internes. Les deux types de moteurs se singularisent principalement par le nombre d'entrées d'air dans la cavité et la forme de la sortie. Le moteur A est constitué de quatre injections réparties régulièrement sur la circonférence et d'une sortie annulaire, tandis que le moteur B ne possède que deux entrées à $\pm 45^\circ$ par rapport à la verticale et l'air s'échappe par le bas de la cavité dans une conduite située sur le capot.

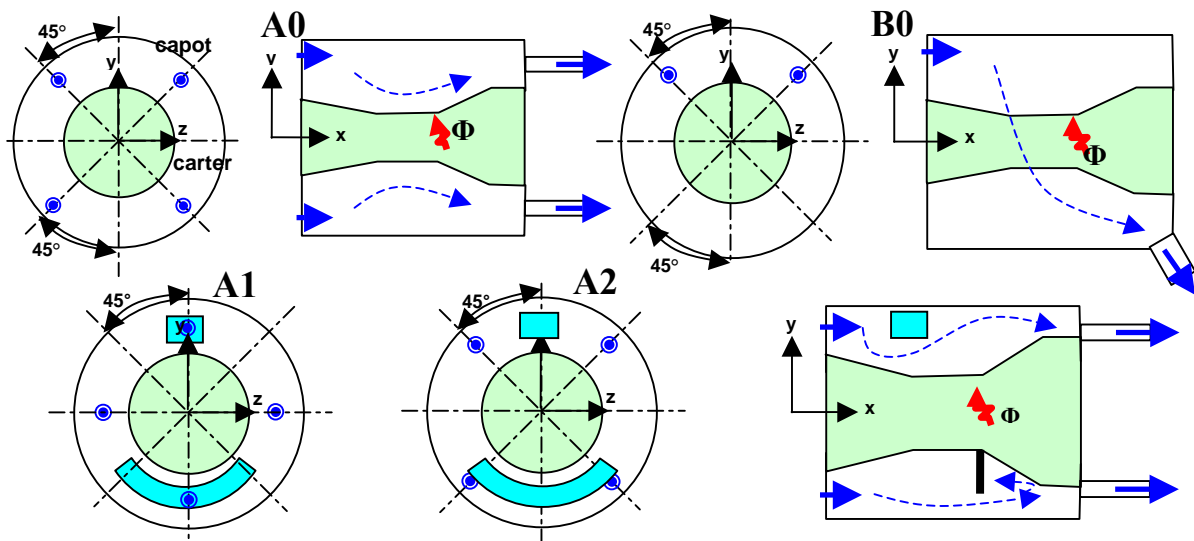


Figure 2 : Configurations étudiées

2.1. Paramètres de similitude

Afin de réaliser une maquette représentative d'un moteur réel, il est nécessaire de conserver un paramètre géométrique adimensionné, la nature de l'écoulement, ainsi que la nature des échanges thermiques entre le fluide et le solide. Il n'existe pas de formulation « universelle » des paramètres de similitude dans des configurations de cavité. Selon la forme de la cavité, le rapport de dimensions entre la source de chaleur et les parois externes, la position de la source dans la cavité et les conditions aux limites choisies, les formulations changent [2]. Il est donc nécessaire de choisir nos propres grandeurs caractéristiques et de s'y rattacher lors du dimensionnement de la maquette.

Les deux modes distincts de transfert de chaleur par convection sont la convection naturelle et la convection forcée dont les longueurs caractéristiques sont respectivement l'écart entre le carter et le capot interne et le diamètre hydraulique de la section considérée.

La nature de l'écoulement est donnée respectivement par la valeur du nombre de Grashoff Gr et du nombre de Reynolds Re , qui sont définis par :

$$Gr = \frac{g\beta(T_{carter} - T_{capot}) \cdot (r_{ext} - r_{int})^3}{\nu^2} \text{ et } Re = \frac{U_{zone} \cdot D_h}{\nu} \quad (1)(2)$$

Le nombre de Richardson Ri qui correspond au rapport entre le nombre de Grashoff et le carré du nombre de Reynolds, donne le mode de transfert de chaleur dominant :

- $Ri \ll 1$: c'est le cas de la convection forcée où c'est l'air injecté qui fixe la dynamique et donc l'échange de chaleur entre le fluide et la paroi.
- $Ri \gg 1$: c'est le cas de la convection naturelle où c'est l'écart de température entre le capot et le carter qui détermine l'écoulement
- $0,1 < Ri < 10$: les deux modes de convection coexistent et influent sur l'écoulement.

Si la caractérisation est faite en calculant des paramètres de similitude uniques sur toute une circonférence pour un plan axial donné, les échanges thermiques sont de type convection mixte. Mais la présence des jets de ventilation et de zones de recirculation entre les jets crée de fortes disparités de vitesses dont la moyenne ne tient pas compte, ce qui a conduit à une étude par zone angulaire qui a mis en évidence un écoulement en convection forcée dans l'axe des jets et de la convection naturelle à mixte dans les zones moins ventilée. La présence d'un équipement déviant ou obstruant le jet devrait générer localement des zones non ventilées sièges d'un écoulement de convection naturelle.

Dans le tableau 1, sont fournis les paramètres de similitude pour les deux moteurs sur un ou deux régimes de vol. Les paramètres de similitude sont calculés au niveau du carter chambre de combustion sur toute la circonférence et en divisant la section par les zones représentatives de l'écoulement.

| MOTEUR B | | PLEIN GAZ | | MOTEUR A | | PLEIN GAZ | | RALENTI | |
|-----------------------|----|-----------|----|----------|------|-----------|------|---------|--|
| SECTION ENTIERE | Gr | 3E+7 | Tu | Gr | 9E+6 | L | 9E+6 | L | |
| | Re | 7E+3 | Tu | Re | 1E+4 | Tu | 5E+3 | Tu | |
| | Ri | 6E-1 | M | Ri | 7E-2 | F | 4E-1 | M | |
| ZONE AXE JETS | Gr | 3E+7 | Tu | Gr | 9E+6 | L | 9E+6 | L | |
| | Re | 1E+5 | Tu | Re | 4E+4 | Tu | 1E+4 | Tu | |
| | Ri | 3E-3 | F | Ri | 5E-3 | F | 6E-2 | F | |
| ZONE LATERALE | Gr | 3E+7 | Tu | Gr | 9E+6 | L | 9E+6 | L | |
| | Re | 2E+4 | Tu | Re | 5E+3 | Tu | 3E+3 | Tu | |
| | Ri | 7E-2 | F | Ri | 4E-1 | M | 1E+0 | M | |
| ZONE AXE SORTIE | Gr | 3E+7 | Tu | | | | | | |
| | Re | 5E+4 | Tu | | | | | | |
| | Ri | 1E-2 | F | | | | | | |

Écoulement : Laminaire (L) Turbulent (Tu)
 Convection : Mixte (M) Forcée (F)

Tableau 1 : Valeur des paramètres de similitude au niveau du carter chambre de combustion

2.2. Dimensions et conditions choisies

Le respect des paramètres de similitude, la volonté de générer un écoulement tridimensionnel complexe et les contraintes expérimentales ont conduit à la construction d'un banc dont les caractéristiques sont données sur la figure 3 et le tableau 2. Pour pouvoir atteindre les températures carter souhaitées des résistances électriques chauffantes

commandées en puissance sont collées à l'intérieur de chacune des trois pièces du carter, tandis qu'un réchauffeur placé sur le réseau d'air permet de fournir de l'air régulée à 20°C.

Afin de réaliser des mesures anémométriques et thermiques, des accès optiques ont été aménagés sur le capot qui est lui-même monté sur galets afin de pouvoir tourner vis-à-vis du carter et ainsi accéder à toutes les positions angulaires.

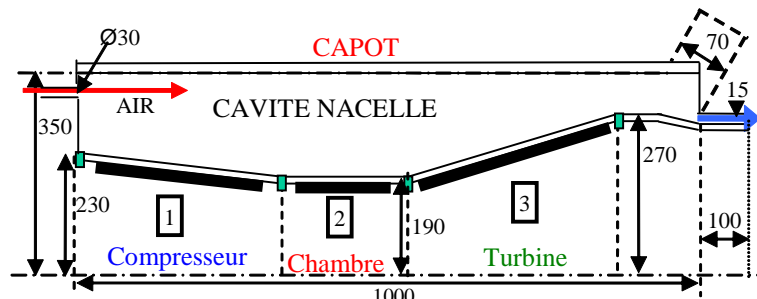


Figure 3 :Caractéristiques du banc

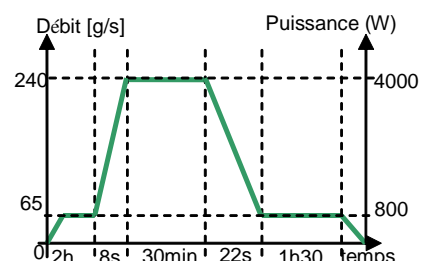


Figure 4 :Exemple de cycle

| Type de moteur | RALENTI | | | | PLEIN GAZ | | | |
|----------------|-------------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|
| | Débit [g/s] | T1 [K] | T2 [K] | T3 [K] | Débit [g/s] | T1 [K] | T2 [K] | T3 [K] |
| A | 60 | 310 | 355 | 340 | 240 | 340 | 400 | 340 |
| B | 40 | 310 | 355 | 340 | 100 | 340 | 400 | 340 |

Tableau 2 : Grandeurs aérothermiques utilisées

Les premières simulations du fluide et du solide non couplées en stationnaire ont été effectuées avec le solveur fluide MSD de l'ONERA et le code de calcul thermomécanique ABAQUS.

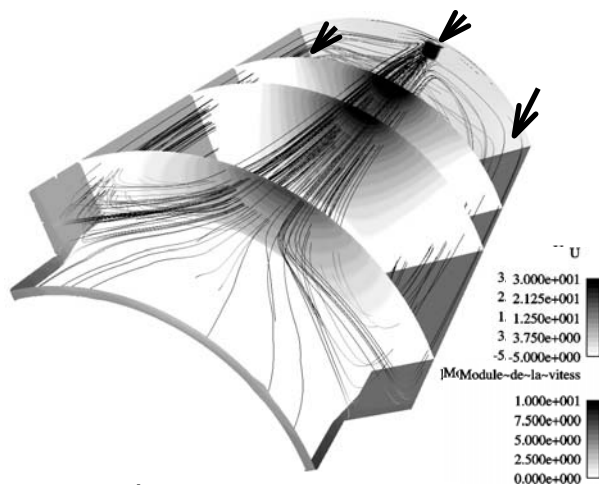


Figure 5 : Écoulement sans équipement

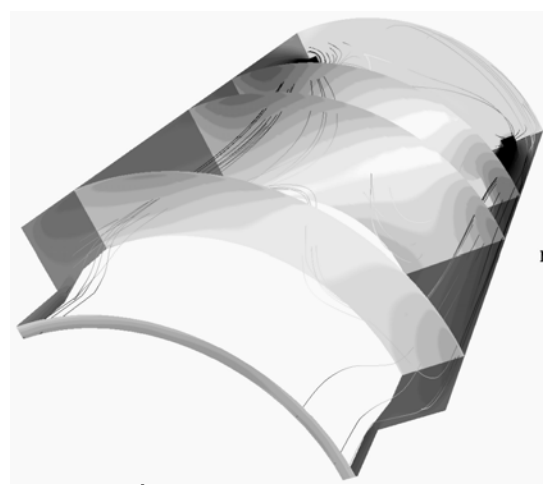


Figure 6 : Écoulement avec cube

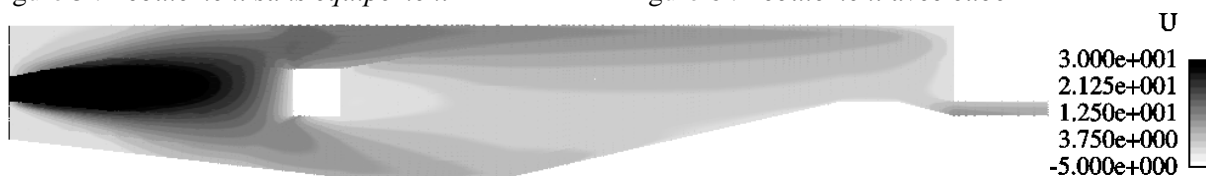


Figure 7 : Coupe longitudinale dans l'axe du jet obstrué

Ces simulations ont permis de visualiser l'écoulement pour le comparer aux simulations numériques sur les moteurs de référence et de déterminer :

- les puissances des résistances électriques chauffantes à appliquer sur le carter pour avoir les niveaux de température souhaités,

- l'épaisseur et le matériau du carter pour voir la « trace » des injections,
- l'emplacement des « équipements » à ajouter dans la cavité pour perturber au mieux l'écoulement : un cube de 5cm de côté au milieu de la cavité face à un jet et une portion de couronne de 120° collée au carter au niveau de la bride chambre-turbine et de 50 mm de haut. Les figures ci-dessous montrent l'effet d'un cube situé dans l'axe des jets sur la vitesse et la direction du jet de ventilation ce qui génère une homogénéisation de la température du fluide et un refroidissement localisé sur le carter chambre. Les flèches montrent les positions respectives des injections.

Un « couplage » entre le solveur thermique et un bilan énergétique par zone sur le fluide a permis de déterminer la durée du transitoire thermique qui est d'environ 2 h (voir figure 4).

3. Mesures

3.1. Instrumentation

La réalisation de calculs numériques nécessite de connaître les propriétés des matériaux et les conditions aux limites précisément :

- au niveau des tubes d'injection (à 15 diamètres en amont de l'ajutage), profil de vitesse et taux de turbulence mesurés par Vélocimétrie Laser à effet Doppler (LDV) au travers d'une conduite transparente et température du jet mesurée par thermocouple,
- puissance fournie aux éléments chauffants,
- températures sur les parois extérieures mesurées par une trentaine de thermocouples.

Afin de comparer résultats expérimentaux et numériques, des mesures de température sont effectuées sur le carter par thermographie infrarouge et sur l'air en sortie par thermocouple. Des champs de vitesse dans la cavité sont également mesurés par vélocimétrie par images de particules pour différents plans axiaux et longitudinaux. La vitesse de sortie est, quant à elle, mesurée en différents points par LDV.

La réalisation de mesures en transitoire en vélocimétrie nécessite d'effectuer une moyenne de phase sur plusieurs centaines de doublets et c'est pourquoi l'hypothèse de fluide incompressible est faite afin de se ramener à un cycle « froid » de l'ordre de la minute.

3.2. Traitement des mesures par Thermographie Infrarouge (ThIR)

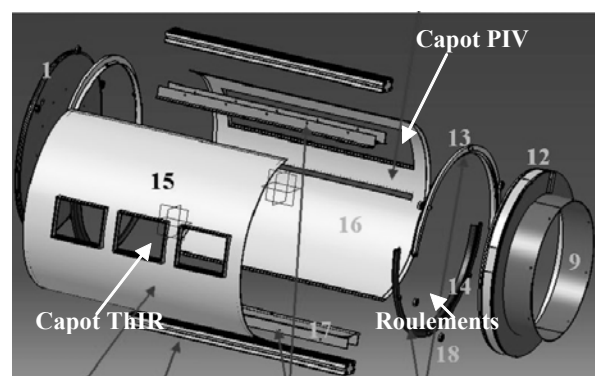


Figure 8 :Montage pour la thermographie Infrarouge

Sur le capot qui tourne autour du carter, trois ouvertures ont été faites à une position angulaire donnée permettant d'avoir la mesure de la température d'un huitième du carter par ThIR au travers d'un hublot en Sélénite de Zinc. Le support de la caméra infrarouge étant

monté sur le capot, le champ de température sur toute la circonférence est obtenu par des rotations de 45°.

Les mesures effectuées par ThIR fournissent des « niveaux numériques » (DL). Un étalonnage préliminaire de la caméra a permis de déterminer une loi entre le DL mesuré sur un corps noir (DL°) et sa température. Or expérimentalement, les surfaces observées sont des corps gris d'émissivité connue et le flux rayonné par la surface visée est modifié par les réflexions multiples des flux émis par toutes les surfaces de la cavité. Les différentes lois sur le rayonnement définies dans [3] et [4] permettent de poser le système suivant à résoudre :

$$\begin{cases} d\varphi_{j,\lambda}^p = \varepsilon_{j,\lambda} \times d\varphi_{\lambda}^o(T_j) + \rho_{j,\lambda} \times d\varphi_{j,\lambda}^i \\ d\varphi_{j,\lambda}^i = \sum_{k=1}^N d\varphi_{k \rightarrow j,\lambda}^p = \sum_{k=1}^N F_{jk} \times d\varphi_{k,\lambda}^p \end{cases} \quad (1)$$

Le calcul des facteurs de forme s'effectue sur un maillage de la cavité de N mailles qui sert de référence pour le calcul des multiréflexions. En intégrant sur la gamme de longueur d'onde à laquelle est sensible la caméra, en considérant que les propriétés radiatives sont constantes sur cet intervalle, le système (2) devient :

$$B = E \times X + R \times F \times B \quad (2)$$

avec $X = [DL^o(T_j)]_{[1,N]}$, $B = [DL_j]_{[1,N]}$, $F = [F_{ij}]_{[1,N]^2}$, $R = [\rho_i \times \delta_{i,j}]_{[1,N]^2}$ et $E = [\varepsilon_i \times \delta_{i,j}]_{[1,N]^2}$

Les inconnues sont les N_1 termes de X correspondant aux surfaces du carter (X_1) et les $N - N_1$ autres termes de X sont déterminés en interpolant à partir des températures mesurées par thermocouples (X_2), les N_1 termes de B sont calculés en moyennant les DL mesurés par la caméra sur chaque surface du carter (B_1). L'équation (2) devient :

$$X_1 = [A_{11} + A_{12} \times A_{22}^{-1} \times A_{21}] \times B_1 + [A_{12} \times A_{22}^{-1}] \times X_2 \text{ où } A = E^{-1} \times [I - R \times F] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

4. Conclusion

L'étude adimensionnelle, complétée par différentes simulations, a permis de passer d'une cavité nacelle de turbomachine, siège d'un écoulement complexe à fort couplage aérothermique et non mesurable, à une maquette, où des mesures de vélocimétrie et de température sont possibles, et qui soit néanmoins représentative de la cavité d'origine.

La maquette étant terminée et la chaîne de traitement des données étant finalisée, les mesures de caractérisation de l'écoulement et des champs de température du carter interne sont en cours de réalisation et vont permettre d'acquérir une base de données étoffée qui servira à quantifier la qualité des outils de simulation numérique pour des calculs aérothermiques couplés en instationnaire.

Références

- [1] E. Radenac, *Développement et validation d'une méthode numérique pour le couplage fluide / structure en aérothermique instationnaire*, Rapport de Thèse ENSAE (2006)
- [2] L. Perrin, *Analyse expérimentale des écoulements de convection naturelle mixte en espace confiné*, Rapport de Thèse ENSAE (2006)
- [3] J. Taine & J.P. Petit, *Transferts thermiques : Mécanique des fluides anisothermes*, Ed. DUNOD
- [4] J.F. Sacadura, *Initiation aux transferts thermique*, Ed. TEC&DOC (2000)