

Mesures de température en paroi externe d'une maquette de Montgolfière InfraRouge

Gillian LEPLAT^{1†}, Philippe REULET¹, David DONJAT¹, Marie-Claire MERIENNE² & Yves LE SANT²

¹ONERA - The French Aerospace Lab, F-31055 Toulouse, FRANCE

²ONERA - The French Aerospace Lab, F-92190 Meudon, FRANCE

† auteur correspondant : Gillian.Leplat@onera.fr

Résumé - La MIR ou Montgolfière InfraRouge est un ballon-sonde conçu par le CNES et dont le principe de vol repose principalement sur les forces naturelles de flottabilité pour maintenir sa trajectoire dans la stratosphère. La prévision de cette trajectoire impose la connaissance précise des transferts de chaleur convectifs à sa surface. L'étude présentée ici vient compléter les analyses précédentes de la dynamique de l'écoulement et s'intéresse à la mise en œuvre de techniques complémentaires de mesure de la température en paroi externe d'une maquette de MIR associée à une reconstruction en trois dimensions.

1 Contexte de l'étude

La Montgolfière InfraRouge (MIR) est un ballon-sonde conçu par le CNES pour l'observation scientifique et la mesure de stratosphère. Ses altitudes de vol oscillent entre environ 30km le jour et 20km la nuit. Ce ballon possède une enveloppe de 40m de diamètre se composant de deux types de films plastiques : du Mylar aluminisé face externe pour la partie supérieure qui absorbe le rayonnement infrarouge en provenance de la surface de la Terre de jour comme de nuit et du polyéthylène pour la partie basse transparent à ce même rayonnement infrarouge. Les contraintes actuelles imposées par les réglementations de sûreté imposent la connaissance précise de la trajectoire de la MIR dont le déplacement, pouvant durer plusieurs semaines, repose uniquement sur des forces naturelles telles que la flottabilité pour la portance et le vent pour la direction. Compte tenu de l'altitude et de ses dimensions, l'écoulement de convection naturelle généré autour du ballon chaud atteint des régimes turbulents caractérisés par un nombre de Rayleigh supérieur à 10^{11} . De tels écoulements restent encore méconnus et nécessitent des études en laboratoire afin de tenter de caractériser plus finement la dynamique mais également les transferts de chaleur pariétaux associés.

Ainsi, une étude expérimentale a été mise en œuvre sur une maquette à l'échelle 1/100 chauffée uniformément et confinée au sein d'une cavité afin d'être en mesure de pouvoir contrôler les conditions aux limites thermiques de l'expérience auxquelles la convection naturelle est connue pour être extrêmement sensible. L'analyse des résultats issus de mesures par vélocimétrie par images de particules (PIV) menées dans le plan de coupe vertical médian de la cavité a conduit à s'interroger sur la distribution de température réellement imposée à la surface de la maquette durant les essais [1]. De la même façon, la reconstruction numérique de l'écoulement dans les conditions de l'expérience, malgré l'utilisation de modèles 3D instationnaires hybrides avancés de type DDES, montre également des différences avec les mesures pouvant être imputées à la répartition de la chauffe à la surface du ballon.

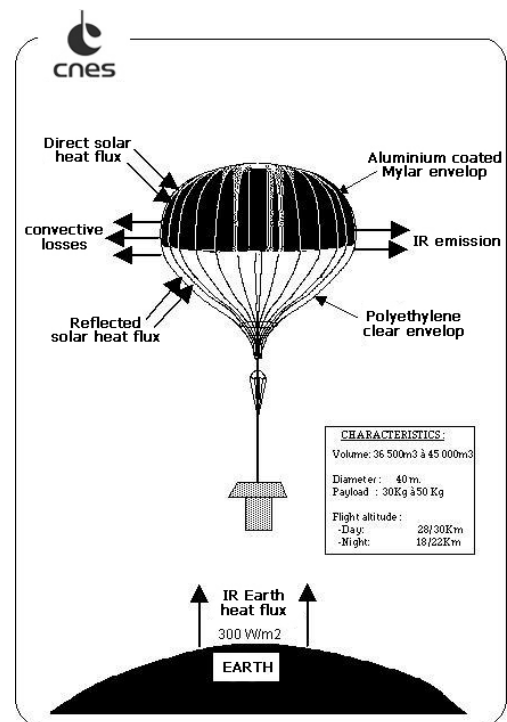


Figure 1 – Principe de la MIR

Dans ce contexte, une analyse complémentaire est apparue nécessaire afin de caractériser précisément le champ de température à la surface de la maquette. L'utilisation conjointe d'une instrumentation de la maquette à l'aide de micro thermocouples, de la thermographie infrarouge (ThIR) en atmosphère *libre* ainsi que d'une peinture thermosensible (TSP) dans les conditions de l'expérience a permis de quantifier les écarts entre la consigne de température utilisée lors des premiers essais et la distribution réellement imposée pour générer l'écoulement de convection naturelle. Différents points de vue ont été réalisés autour de la maquette de manière à reconstruire en 3 dimensions le champ de température sur toute la surface.

2 Dispositif expérimental

2.1 Description du banc d'essais

La maquette est constituée d'une base de liège sur laquelle sont positionnées 17 bandes chauffantes reproduisant la géométrie facettée de la MIR à l'échelle 1/100 (soit un diamètre maximal équivalent d'environ 40cm). Ces bandes sont alimentées par une baie unique de tension continue connectée à 17 potentiomètres reliés à chacune des bandes de façon à pouvoir ajuster indépendamment la puissance qui leur est appliquée. Une enveloppe en Kapton[®] chargé carbone, qui se présente sous forme de plusieurs fuseaux étroits fixés à l'aide de masse adhésive, recouvre la totalité de la maquette. La cuve dans laquelle est positionnée la maquette de la MIR est présentée sur la figure 2. Cette cuve se compose de 4 parois verticales de verres réalisées en double vitrage, d'une paroi basse en bois recouverte d'une plaque d'aluminium et d'une paroi plafond dans laquelle circule un fluide régulé en température afin de maintenir une condition de paroi isotherme *froide*. Les dimensions globales internes de la cavité atteignent 1m × 1m à sa base et 2m en hauteur.



Figure 2 – Maquette de la MIR en milieu confiné

2.2 Métrologie

2.2.1 Microthermocouples

35 microthermocouples sont installés sur la maquette de la MIR et sont positionnés au centre de chaque bande chauffante le long de 2 méridiens sous l'enveloppe en Kapton[®] chargé carbone. Ils sont étalonnés sur la gamme [20 – 200°C] et présentent une incertitude globale de $\pm 0.8^\circ\text{C}$.

2.2.2 Thermographie infrarouge

L'émissivité de l'enveloppe en Kapton[®] chargé carbone a fait l'objet d'une caractérisation à partir d'un échantillon extrait d'un fuseau non utilisé pour le revêtement. Deux essais ont été réalisés dans la gamme [3 μm – 21 μm] et sont symbolisés par les courbes sur la figure 3. L'émissivité sur le spectre IR complet s'élève respectivement à 0.867 et 0.873 pour chacun des deux essais.

Néanmoins, il apparaît que l'émissivité n'est pas constante sur tout le spectre. Elle a donc également été calculée sur les bandes spectrales compatibles avec chacune des caméras à disposition. L'utilisation des caméras *Medium Wave* [3 – 5 μm] s'avère plus adaptée à la mesure de la température sur cette enveloppe. Les mesures présentés dans la partie suivante ont été réalisées avec la caméra FLIR SC7650 MWIR dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Détecteur InSb 640 × 512, sensibilité spectrale [1.5 – 5.0 μm] ;

- Objectif 25mm ;
- Temps d'intégration 380 μ s, sans filtre dans la gamme [63 – 128°C] ;
- Acquisition température moyenne sur 60s.

La totalité de la température de surface de la maquette est mesurée selon :

- 2 points de vue : haut et bas à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'horizontale à mi-hauteur de la maquette ;
- 8 positions par rotation de la MIR tous les 45° autour de son axe.

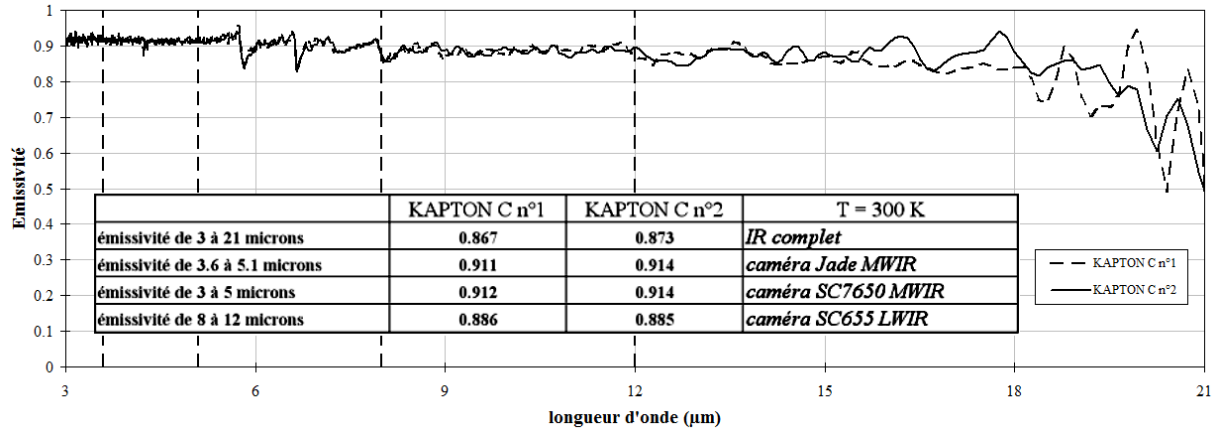


Figure 3 – Émissivité spectrale de l'enveloppe en Kapton® chargé carbone

Ces mesures sont mises en œuvre en milieu *libre* à l'extérieur de l'enceinte d'essais compte tenu de l'absence d'accès optiques dans l'infrarouge. Des marqueurs réfléchissants (la double pastille visible 4(b) symbolise l'origine angulaire de la maquette) sont positionnés sur l'enveloppe de manière à pouvoir procéder à une reconstruction 3D du champ de température pariétale selon le principe détaillé en section 2.3.

2.2.3 Peinture thermosensible

La TSP est une peinture luminescente dont l'intensité de luminescence décroît avec la température ce qui permet de mesurer cette grandeur. Le composé utilisé est un oxysulfure de terre rare (Gadolinium ou Yttrium) dopé à l'Europium. Le choix de l'oxysulfure dépend du domaine de température à mesurer. Le Gadolinium présente une plus grande sensibilité à la température entre 300 et 340K. Au-delà, c'est l'Yttrium qui présente une plus grande sensibilité à la température. L'oxysulfure d'Yttrium est dispersé dans un polymère de silicone commercial en solution dans du toluène à une concentration de 100% en masse par rapport à la résine. Cette concentration permet d'avoir un signal de luminescence élevé tout en conservant une bonne cohésion du mélange et une bonne adhérence sur le support. Excitée dans l'UV au moyen d'une lampe continue Hg-Xe, la TSP émet un spectre de raies dans différentes longueurs d'onde comprises entre 400 et 650nm. L'utilisation de deux domaines spectraux pour les mesures permet de corriger l'intensité de luminescence des variations d'intensité d'illumination. En pratique, deux filtres sont utilisés dans le bleu [430 – 510nm] et le rouge (> 600nm). La sortie de la lampe est connectée à une fibre optique à double bras pour assurer l'illumination à travers la paroi transparente de l'enceinte d'essais. Deux caméras sont utilisées pour réaliser les prises de vue en positions haute et basse de l'ensemble de la surface de la MIR. Le système illumination/caméra est monté sur un support fixe et l'ensemble peut être déplacé suivant les 4 faces de l'enceinte afin d'obtenir la cartographie à 360° de la surface de la MIR. Les images sont enregistrées par des caméras numériques 16bits (Roper Scientific) à faible bruit grâce à un système de refroidissement du capteur CCD. La technique de mesure de température par TSP nécessite une image de référence à une température uniforme connue, réalisée à *froid*. Il est également nécessaire d'enregistrer des images d'obscurité afin de prendre en compte la lumière résiduelle dans l'environnement de l'enceinte ainsi que le courant d'obscurité et le bruit de lecture du capteur CCD de la caméra. Ces images sont prises pour chaque série (référence et essai à *chaud*) afin de tenir compte d'une éventuelle modification de l'obscurité au cours du temps (notamment la luminosité extérieure au cours de la journée).

2.3 Reconstruction 3D des champs de température

La reconstruction a pour but de fournir, pour chaque prise de vue, des cartes 3D de température sur un maillage 3D représentatif de la maquette. Cette étape désigne l'incrustation d'images, c'est-à-dire le repérage dans l'image de la position de la maquette. Pour cela, des marqueurs sont disposés à la surface de la maquette. Les positions 3D de ces marqueurs sont identifiées à l'aide d'une méthode photogrammétrique. Après l'étalonnage géométrique des caméras, ces marqueurs sont utilisés pour identifier la position des caméras. Les marqueurs détectés sont associés aux marqueurs 3D en utilisant une initialisation grossière du point de vue de la caméra. L'identification précise est réalisée grâce aux marqueurs liés qui sont connus à la fois par leurs coordonnées 3D et par leurs coordonnées image. Le calcul des cartes en température est alors immédiat en appliquant la loi d'étalonnage, après compensation des décalages entre les filtres et également entre les images d'essai et de référence.

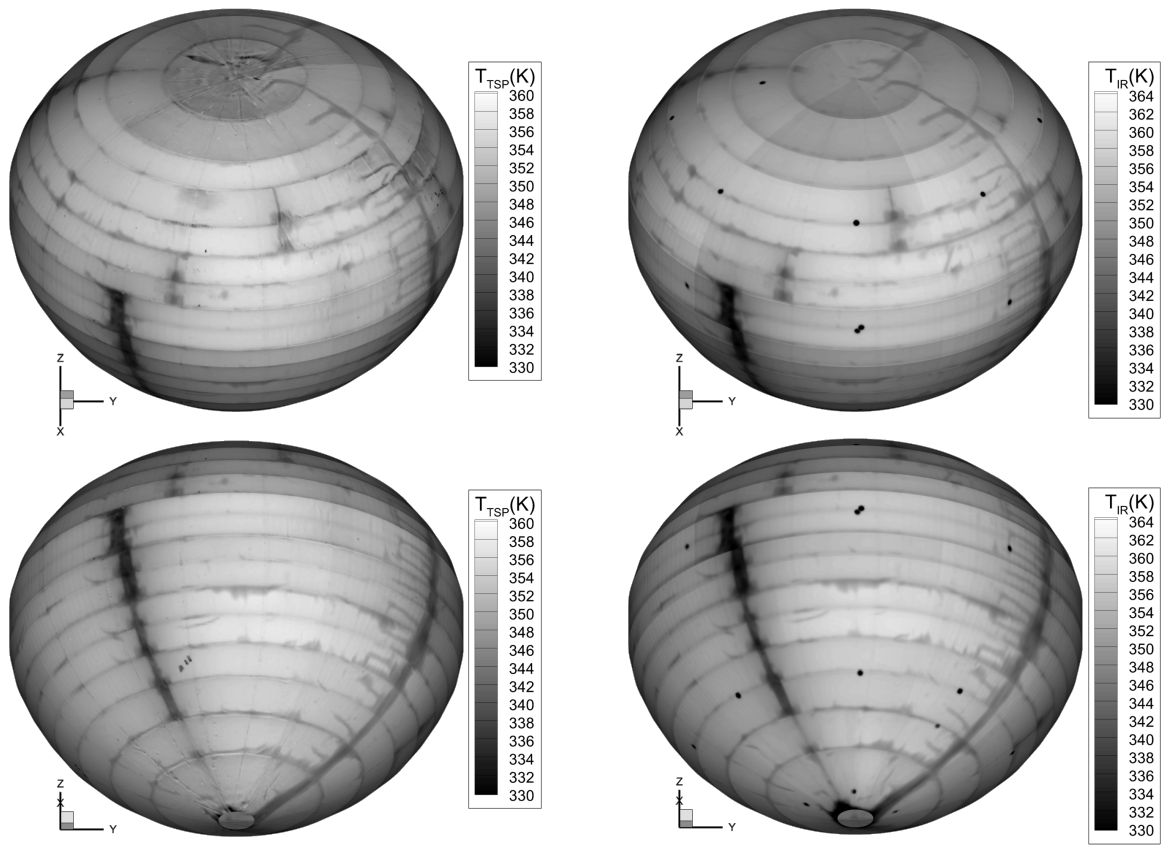
2.4 Conditions d'essais

La température de consigne pour la chauffe de la maquette est fixée à 90°C, limitation imposée par la sensibilité du composé pour la TSP. Cette température est contrôlée à l'aide des thermocouples présents initialement sous les bandes chauffantes de la maquette. Le plafond de la cavité est quant à lui réglé à la température de 20°C. Ces conditions génèrent un écoulement de convection naturelle à un nombre de Rayleigh égal à $Ra = 2.79 \times 10^8$, caractéristique d'un régime transitionnel à turbulent.

3 Analyse des résultats

La reconstruction 3D des images acquises sur les différentes prises de vue permet de visualiser la température pariétale mesurée par TSP sur l'ensemble de la surface de la maquette MIR. Ces champs sont présentés sur les figures 4(a) et 5(a) affichant des vues de dessus et de dessous centrées respectivement à $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 180^\circ$ autour de la maquette. La visualisation de ces résultats met en évidence des inhomogénéités de température à la surface de la MIR dont les origines sont diverses :

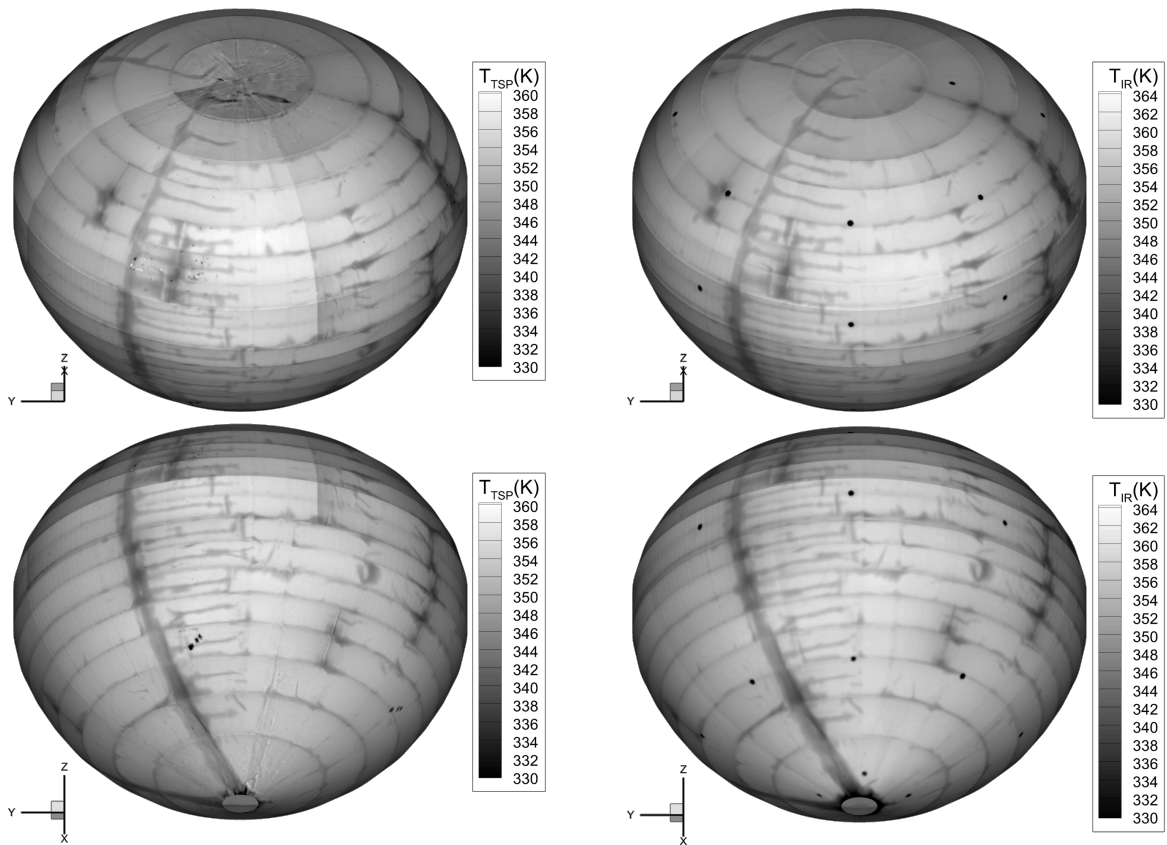
- des défauts de la maquette sont observés et liés à la pose des bandes chauffantes dont les raccords entre les différentes portions se sont avérés imparfaits avec par conséquent des zones où la maquette n'est pas chauffée. Ces défauts entraînent des écarts de température par rapport à la consigne pouvant atteindre 30K et constituent la principale cause d'inhomogénéité de la température. Le défaut majeur est particulièrement visible sur la vue à 0° (Figure 4).
- l'instrumentation en microthermocouples installés sur la maquette rajoute également des défauts apparents dans les zones où les fils de thermocouples sont acheminés. L'amplitude de écarts observés est de l'ordre de 15K à proximité des méridiens à 45° et 180° sur la MIR.
- certaines zones sont marquées par un défaut d'adhérence de l'enveloppe en Kapton[®] sur la maquette. Dans ce cas, les écarts sont du même ordre de grandeur que dans le cas précédent et sont à relier à la présence d'une couche d'air entre la surface de la maquette et l'enveloppe qui se traduit par une température mesurée plus faible que celle où le contact est bon. Ce défaut d'adhérence de l'enveloppe peut être observé sur la vue de dessus à 180° (Figure 5) au niveau du faisceau horizontal de fils des thermocouples et également dans une moindre mesure aux jonctions entre les différentes bandes.
- enfin, des discontinuités dans le champ de température sont visibles aux raccordements entre les différentes prises de vue et sont imputables à la technique de mesure et plus particulièrement au manque d'illumination sur les bords des images TSP qui se traduisent par un signal plus faible. Les contraintes expérimentales imposées par la géométrie de la maquette, de la cavité et du châssis d'une part et par le nombre et le positionnement des sources lumineuses UV d'autre part, ont conduit à une illumination non homogène de la maquette sur la prise de vue que l'utilisation des 2 filtres n'a pas permis de compenser en totalité. Ces écarts sont de l'ordre de 5 à 7K au niveau des raccords entre 2 points de vue de la maquette.



(a) TSP

(b) ThIR

Figure 4 – Champs 3D de température pariétale (vue centrée à $\theta = 0^\circ$)



(a) TSP

(b) ThIR

Figure 5 – Champs 3D de température pariétale (vue centrée à $\theta = 180^\circ$)

Malgré ces inhomogénéités dont l'origine était connue sinon prévisible, l'analyse des cartographies de température issues des mesures par TSP ne montre pas d'écarts majeurs entre les températures des différentes bandes dont la chauffe n'était contrôlée jusqu'à présent que par les thermocouples initialement présents sous les bandes chauffantes et dont la position était dispersée tout autour de la maquette. A l'exception des parties hautes (pôle nord) et basses (proche du pied) difficilement mesurables compte tenu de l'angle élevé que fait la surface dans ces zones avec l'axe de prise de vue, la température est relativement homogène. Ces cartographies permettent également de vérifier le caractère axisymétrique de la chauffe à la surface de la maquette. Ce point était discutable compte tenu du confinement de la maquette dans une enceinte à base carrée. Le niveau de confinement n'est par conséquent pas le même selon que sont considérés le centre des parois ou les diagonales. La visualisation des différents champs ne montre aucune influence de la forme de cavité sur la distribution de température pariétale de la maquette.

Les champs de température mesurés par thermographie infrarouge à l'extérieur de l'enceinte d'essais sont présentés sur les figures 4(b) et 5(b), et reconstruits en 3D suivant le même principe que pour la TSP. Étonnamment, ces mesures se distinguent par une distribution relativement homogène de la température sur la surface de la MIR avec des raccords entre les différentes prises de vue moins marqués que dans le cas précédent. La localisation des défauts ainsi que l'amplitude des écarts en température sont en parfait accord avec les mesures par TSP avec un maximum de température relativement plus proche de la consigne appliquée.

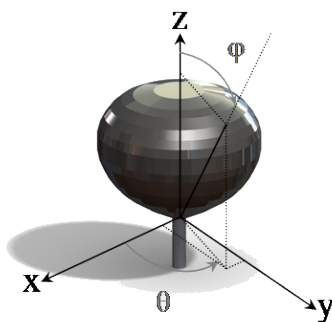
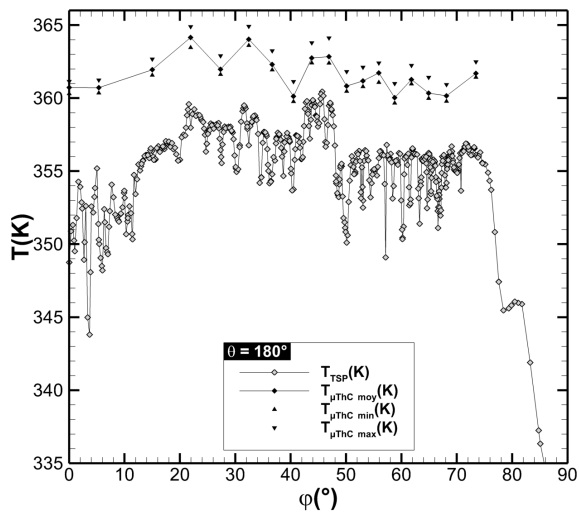


Figure 6 – Représentation en coordonnées sphériques

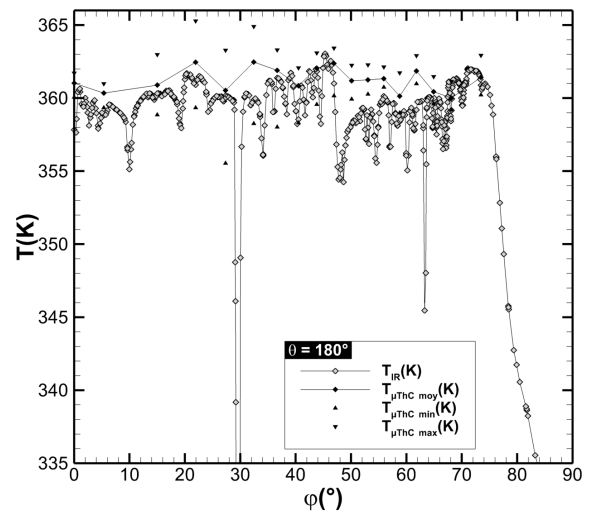
Afin de pouvoir comparer aisément les différents profils extraits des cartographies précédentes et des relevés de température issus des thermocouples, les résultats sont présentés dans un repère sphérique (figure 6) caractérisé par R le rayon depuis l'origine du repère (placé à la base du pied de la maquette) ainsi que les angles θ et ϕ désignant respectivement la longitude et la colatitude. Les figures 7 et 8 représentent les profils de température à une longitude de 180° et 45° issus des mesures par TSP, ThIR et microthermocouples le long de la coordonnée ϕ . Étant donné que ces profils sont extraits à l'endroit où sont localisés les thermocouples, les raies de faible température marquent l'emplacement de ces thermocouples. A ceux-ci s'ajoutent également les défauts pouvant apparaître aux jonctions inter-bandes quand celles-ci ne sont pas parfaitement alignées. Pour les mesures par TSP et ThIR, c'est donc la température dans les zones proches de ces thermocouples qui est à comparer avec les valeurs des microthermocouples.

De manière générale, l'analyse de ces profils montre un écart de 2 à 3K sur les mesures par TSP par rapport aux mêmes mesures issues des thermocouples. Néanmoins, l'évolution des profils est parfaitement représentée. L'homogénéité de la température entre les différentes bandes est ici encore vérifiée, abstraction faite des raies dues à la présence des thermocouples et des jonctions inter-bandes. La difficulté de mesurer les parties haute et basse de la maquette est observable sur ces profils également avec une chute de la température notamment pour les grandes valeurs ϕ , zone où l'intensité du signal peut être faible pour de tels angles de la prise de vue par rapport à la surface de la maquette.

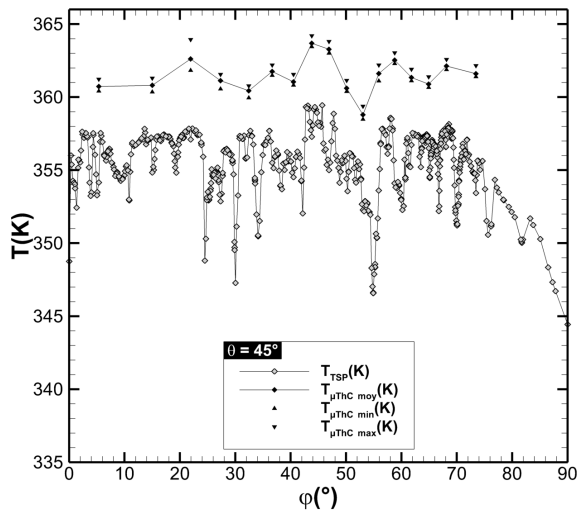
L'analyse de ces mêmes profils issus des mesures par ThIR confirme le meilleur accord observé auparavant sur les cartographies 3D de température relativement aux données extraites des microthermocouples. L'amplitude et l'évolution de la température sont parfaitement mesurées par la thermographie infrarouge en atmosphère libre. Ces profils présentent des pics de faible température bien plus prononcés que dans les mesures par TSP du fait de l'utilisation de marqueurs réfléchissants pour l'incrustation 3D des images créant une chute d'émissivité sur l'enveloppe parfaitement noire. Ces marqueurs se devaient également d'être plus grands pour couvrir quelques pixels sur le capteur moins résolu de la caméra afin d'être correctement identifiés. Il est important de noter que la position de ces marqueurs n'est pas précise ce qui explique que tous les pics n'apparaissent pas sur les profils extraits. Néanmoins, la reconstruction 3D s'est chargée d'identifier la position réelle de ces marqueurs.



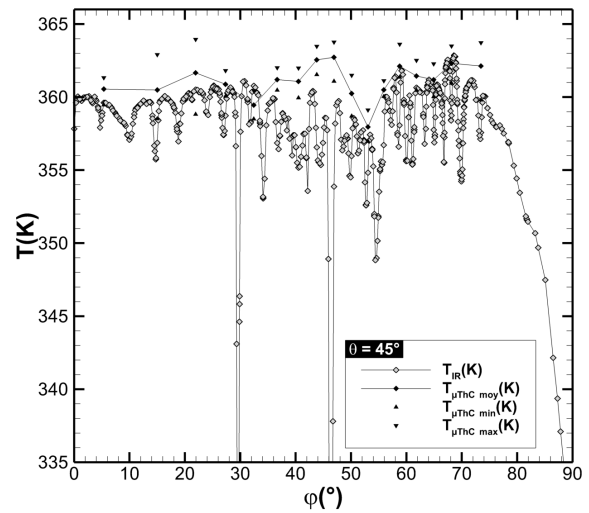
(a) TSP



(b) ThIR

Figure 7 – Comparaison des profils de température extraits à $\theta = 180^\circ$ 

(a) TSP



(b) ThIR

Figure 8 – Comparaison des profils de température extraits à $\theta = 45^\circ$

Enfin, deux profils sont extraits des mesures par TSP et ThIR à $Z = 250\text{mm}$ et $Z = 270\text{mm}$ correspondant respectivement à une altitude proche de l'équateur et légèrement au dessus. Ces résultats sont visibles sur la figure 9 en représentation polaire. Ces profils montrent, autour de la maquette, une température proche de 360K relativement homogène dans les zones ne présentant pas de défaut. Les défauts décrits précédemment sont particulièrement visibles et quantifiables avec cette représentation. La superposition des 2 profils permet de distinguer l'origine des défauts :

- les sauts de température visibles à $\theta \sim [20^\circ; 110^\circ; 200^\circ; 290^\circ]$ sur la figure 9(a) sont imputables aux raccordements entre les différents champs issus des mesures par TSP où l'illumination en bord d'image n'est suffisante ce qui augmente l'incertitude de la mesure et explique des écarts. Ces discontinuités sont quasi inexistantes sur les mesures par ThIR (figure 9(b)) qui ne nécessite pas d'éclairage de la maquette autre que la lumière ambiante, contrairement à la mesure par TSP où l'illumination est un facteur important de la qualité de la mesure.
- les zones présentant 2 pics de température superposés pour les 2 profils s'expliquent par l'acheminement des fils des microthermocouples le long de la maquette pour $\theta \sim 60^\circ$ et $\theta \sim 150^\circ$ correspondant respectivement aux méridiens instrumentés à $\theta = 45^\circ$ et $\theta = 180^\circ$.
- les pics d'amplitude similaire aux défauts précédents correspondent soit à la présence des thermocouples, soit à un défaut d'adhérence de l'enveloppe sur la maquette caractérisant dans les deux cas la présence d'une couche d'air isolante.

- enfin, les pics de plus forte amplitude caractérisent les défauts de raccordement des bandes chauffantes dans des écarts de 30K dans le cas $\theta = 330^\circ$ sur le profil à $Z = 250\text{mm}$.

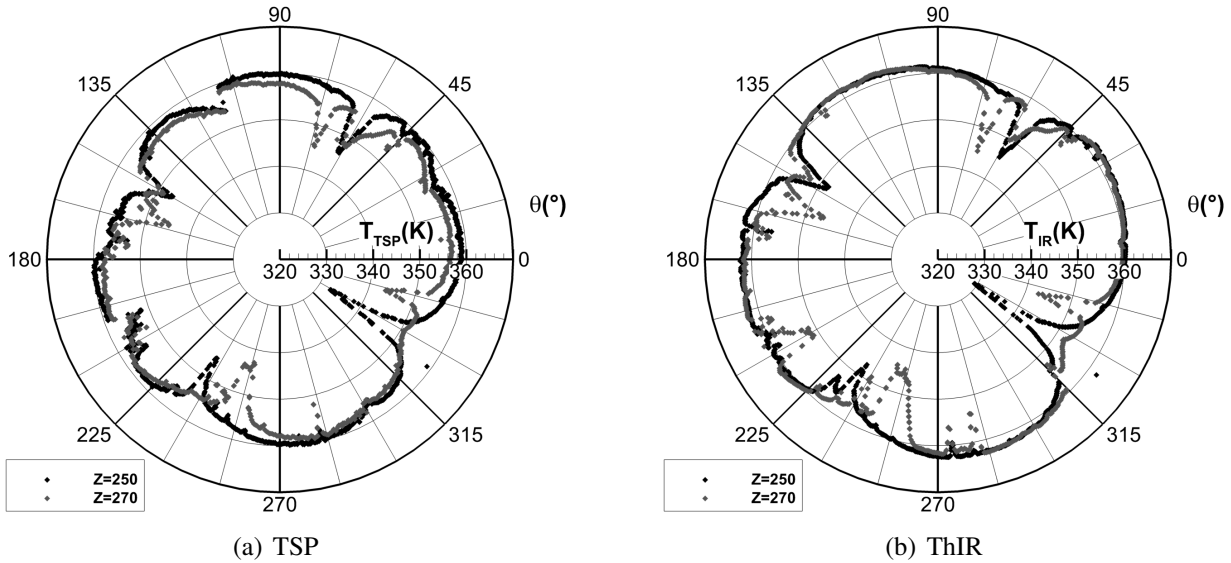


Figure 9 – Comparaison des profils de température à $Z = 250\text{mm}$ et $Z = 270\text{mm}$

4 Conclusions et perspectives

Deux techniques de mesure surfacique de la température ont été employées sur une maquette de MIR afin d'identifier les défauts et quantifier les écarts de température par rapport à la consigne de chauffe. La ThIR s'est révélée concluante malgré sa mise en œuvre à l'air libre donc sans contrôle sur les conditions environnantes. La comparaison relative avec les mesures par TSP a mis en évidence la régulation très satisfaisante de la température. Le confinement introduit par la cavité ne semble pas affecter la distribution moyenne de température pariétale. Ce fait est d'autant plus remarquable que la géométrie de la cavité n'introduit pas non plus de dissymétrie sur la température de la maquette. En effet, hormis les défauts, la température de la maquette présente en moyenne un caractère quasi axi-symétrique à l'intérieur comme à l'extérieur de l'enceinte d'essais avec une température relativement homogène entre les différentes bandes.

Malgré la différence constatée sur les maxima de température, la TSP a permis la mesure de température au sein de l'enceinte dans un environnement confiné et contrôlé. À la fois l'illumination et les prises de vue ont été réalisées à l'extérieur de la cavité pour ne pas perturber l'écoulement. Le caractère non intrusif de ces mesures n'a pu se faire qu'au détriment de biais potentiels introduits par la présence de parois de verre entre la maquette et la source UV associée aux caméras. Ainsi, des réflexions parasites, certes minimisées durant les essais, ont pu perturber les mesures. Le nombre de prises de vue réduit et la quantité de sources lumineuses limitées constituent également deux pistes d'amélioration de la qualité des mesures. Il s'agit de contraintes techniques auxquelles viennent s'ajouter des limitations d'accès optiques dues au banc d'essais. La mise en œuvre de différentes méthodes de mesure s'avère donc indispensable afin d'obtenir des données complémentaires et recouvrantes pour l'analyse des phénomènes en présence. Chaque méthode de mesure possède ses contraintes propres dont il s'agit de tirer le meilleur compromis selon l'objectif visé et les quantités à mesurer. Ces résultats viennent ainsi fournir des conditions aux limites représentatives pour améliorer les simulations numériques en cours.

Références

- [1] G. LEPLAT, D. DONJAT, P. REULET, E. LAROCHE, P. MILLAN, G. PAROT ET G. LETRENNE : Experimental Investigation and Numerical Modeling of Natural Convection Around an Infrared Montgolfiere Balloon at High Rayleigh Number. *In ASME Summer Heat Transfert Conference - HT2012-58237*, Puerto Rico, USA, July, 2012.