

# Étude numérique et expérimentale des effets aéro-thermo-optiques sur les hublots infrarouges de missiles supersoniques intercepteurs

Jean-Claude KRAPEZ<sup>1\*</sup>, Michel BEJET<sup>2</sup>, Jean-Lou COCHON<sup>2</sup>, Briec DANET<sup>3</sup>,  
Didier DEMANGE<sup>2</sup>, Ruy DERON<sup>4</sup>, Paulo D'ESPINEY<sup>5</sup>, Agnès LUC-BOUHALI<sup>3</sup>,  
Francis MENDEZ<sup>4</sup>, Philippe SAGNIER<sup>1†</sup>, Béatrice SORRENTE<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ONERA Département d'Optique Théorique et Appliquée  
BA 701 – 13300 Salon de Provence

<sup>2</sup>ONERA Département Matériaux et Systèmes Composites  
Chemin de la Hunière – 91761 Palaiseau

<sup>3</sup>ONERA Département Prospective et Synthèse  
Chemin de la Hunière – 91761 Palaiseau

<sup>4</sup>ONERA Département d'Optique Théorique et Appliquée  
29 av. de la Division Leclerc – 92320 Châtillon

<sup>5</sup>ONERA Département d'Aérodynamique Appliquée  
8 rue des Vertugadins – 92190 Meudon

\* [krapez@onera.fr](mailto:krapez@onera.fr)

**Résumé** – L'ONERA a réalisé une chaîne d'outils logiciels pour la simulation par modèles physiques des effets aéro-thermo-optiques (ATO) qui viennent perturber le signal des autodirecteurs de missiles supersoniques. On décrit ici plus particulièrement les effets perturbateurs dont le hublot IR est le siège. Une action expérimentale a été menée pour valider la chaîne de logiciels relative aux effets TO dans la fenêtre infrarouge. Les essais ont porté sur des éprouvettes de saphir chauffées au moyen d'un laser CO<sub>2</sub> de forte puissance. La confrontation modèle-expérience a porté sur la température, le champ de luminance émise par l'éprouvette et sur les altérations du front d'onde induites par les variations d'indice et les déformations thermomécaniques. Enfin, on présente des résultats de simulation des effets ATO pour une trajectoire particulière du missile.

## 1. Introduction

Les autodirecteurs (AD) infrarouges (IR) des missiles intercepteurs endo-atmosphériques de missiles balistiques tactiques doivent répondre à des critères de résolution angulaire et de résolution radiative de plus en plus exigeants. Cela multiplie d'autant les phénomènes susceptibles de perturber la formation des images dans le plan focal de l'imageur. Ces perturbations interviennent par déviation, atténuation ou dégradation du signal optique à la traversée des différents dioptries se trouvant en amont de l'imageur : onde de choc, couche limite, fenêtre infrarouge. Ces phénomènes perturbateurs sont identifiés sous le nom d'effets aéro-thermo-optiques (ATO). Une action a été menée à l'ONERA pour étudier les différents contributeurs, tant dans l'air environnant que dans la fenêtre IR. Une chaîne de logiciels a ainsi été élaborée pour quantifier les phénomènes suivants : transition laminaire-turbulent dans la couche limite, champ de densité moyen et ses fluctuations, position et rayonnement de la couche de choc, déformation du front d'onde à la traversée du champ d'indice variable, transferts thermiques dans le hublot, déformation thermomécanique, déformation du front d'onde dans le hublot. Les frottements aérodynamiques qui se manifestent sur le hublot induisent un flux thermique intense et non uniforme sur sa paroi externe. Il s'ensuit un échauffement transitoire et inhomogène, un transfert radiatif au sein du matériau semi-transparent et une déformation thermomécanique. Ceci entraîne une altération optique (dégradation du front d'onde provenant de la cible, dépointage) et l'apparition d'un signal

parasite (émission propre du hublot dans la bande spectrale de l'AD). On présente ici l'expérience qui a permis de valider la portion de la chaîne numérique concernant les effets thermo-optiques dans le hublot IR. Le matériau de hublot qui a été considéré pour cet exercice est le saphir. Les calculs aéro-optiques ont pour leur part été validés par des essais dans une soufflerie à faible température d'arrêt dont il ne sera pas question ici. Pour finir, on présentera un exemple de calcul d'effets couplés aéro-thermo-optiques pour une trajectoire particulière d'un missile supersonique avec un hublot latéral en saphir et une transition déclenchée au nez.

## 2. Description de l'outil numérique

La chaîne de logiciels comprend :

- le code aérodynamique elsA, développé à l'ONERA, pour étudier l'écoulement autour du missile en supersonique. Un calcul Euler est tout d'abord effectué avec elsA, suivi d'un calcul de couche limite avec le code 3C3D puis de calculs de stabilité avec le code CASTET, ceci dans le but de positionner la transition laminaire-turbulent. Pour l'exemple présenté au §6 avec transition déclenchée, un calcul Navier-Stokes (NS) est entrepris avec le modèle de turbulence Spallart-Allmaras en prenant en compte le champ de température pariétale instationnaire non uniforme sur le hublot.
- le code RPR (raie par raie), développé à l'ONERA, pour le calcul de la luminance spectrale de la colonne de gaz le long de la ligne de visée entre la cible et le hublot, incluant la couche de choc [1]. Il se base sur le champ de masse volumique des espèces susceptibles de rayonner dans l'IR (en l'occurrence H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>) et le champ de température obtenus à l'issue du calcul NS.
- le code Fluent pour le calcul des transferts thermiques par conduction et par rayonnement dans le hublot. Pour les transferts radiatifs dans le hublot semi-transparent, on utilise le solveur exploitant la méthode des ordonnées discrètes. Le hublot est considéré absorbant, non-diffusant et gris par bandes (10 bandes). Pour l'exemple du saphir qui sera traité ici, on a pu prendre en compte le fait que toutes les propriétés (sauf l'indice de réfraction) dépendent de la température.
- le code ZeBuLoN, développé en partie à l'ONERA, pour le calcul des déformations thermomécaniques dans le hublot.
- le code RAYON, développé à l'ONERA, pour le calcul de la trajectoire d'un rayon optique et de la déformation de la surface d'onde au sein de l'écoulement et du hublot, c'est-à-dire dans les milieux où l'indice de réfraction est inhomogène.

## 3. Description de l'expérience de validation

Faute d'une soufflerie adéquate en Europe, il a été décidé de simuler l'échauffement aérodynamique que subit le hublot en vol supersonique par rayonnement laser. Les essais ont donc consisté à chauffer, au moyen d'un laser CO<sub>2</sub> de forte puissance ( $P_{\max} = 2$  kW) pendant quelques dizaines de secondes, des éprouvettes cylindriques de saphir placées dans une enceinte sous vide primaire (cf. figure 1). Leur diamètre était de 25,4 mm et leur épaisseur de 2, 4, 6, et 8 mm. Les grandeurs exploitées ont été :

- la température au centre de la face avant mesurée par un pyromètre IR sensible dans la bande [7,77  $\mu$ m - 8,07  $\mu$ m], bande où le saphir est opaque et particulièrement émissif ;
- le champ de luminance émis par le saphir vers l'arrière dans une bande spectrale particulière de l'infrarouge moyen, tel qu'enregistré par une caméra infrarouge filtrée ;
- la déformation du front d'onde d'un faisceau laser de sondage à 0,63  $\mu$ m après la traversée d'une éprouvette, mesurée par un analyseur HASO.

Les codes thermiques Fluent et ZeBuLoN recevaient en entrée une carte de la répartition de flux laser qui était mesurée périodiquement avec un analyseur de faisceau. La fig. 2 présente une de ces cartes de flux. Les éprouvettes étaient maintenues sur leur périphérie au moyen de trois pions en zircone, garantissant ainsi des pertes thermiques minimales avec le porte-échantillon et l'absence de contraintes significatives.

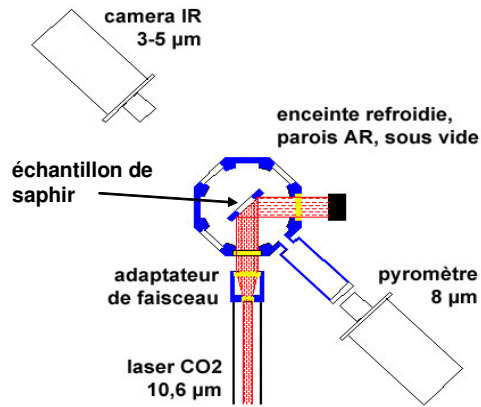


Figure 1 : Schéma de l'installation utilisée pour la mesure des effets thermiques au sein d'une fenêtre de saphir.

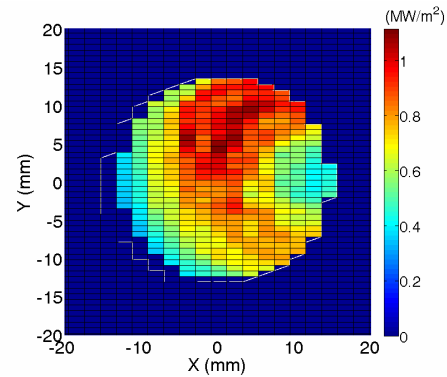


Figure 2 : Exemple de distribution de flux laser dans le plan de l'éprouvette (densité moyenne :  $0,69 \text{ MW/m}^2$ ).

#### 4. Caractérisation des propriétés thermophysiques et radiatives du saphir

Les échantillons qui ont servi aux essais et ceux qui ont été utilisés pour les caractérisations thermophysiques et radiatives provenaient d'une même « boule » de saphir. Les caractérisations ont porté sur la diffusivité et la capacité calorifique massique (méthode flash appliquée de l'ambiante à 2000K [2]) et sur l'indice optique complexe spectral. Les parties réelles et imaginaires ont été identifiées à partir des mesures des facteurs de réflexion et de transmission entre  $1,8 \mu\text{m}$  et plus de  $25 \mu\text{m}$ , de l'ambiante à 2300K (caractérisation effectuée par le CRMHT/CNRS). Les caractérisations optiques effectuées au CRMHT et des données de la littérature sur les propriétés du saphir ont permis d'identifier, en fonction de la température, l'absorptivité à la longueur d'onde du laser CO2 ( $10,6 \mu\text{m}$ ) à  $45^\circ$  d'incidence (cf. fig. 3) et le coefficient d'absorption spectral utilisé dans les calculs radiatifs Fluent (cf. fig. 4).

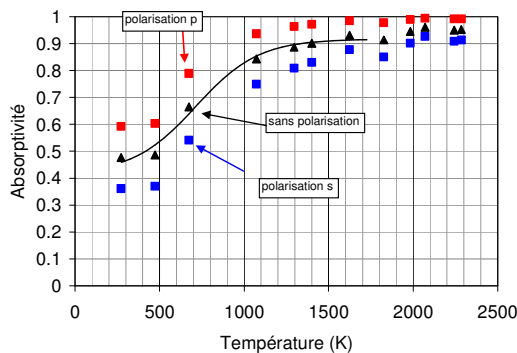


Figure 3 : Absorptivité du saphir à  $10,6 \mu\text{m}$  et à  $45^\circ$  d'incidence en fonction de la température

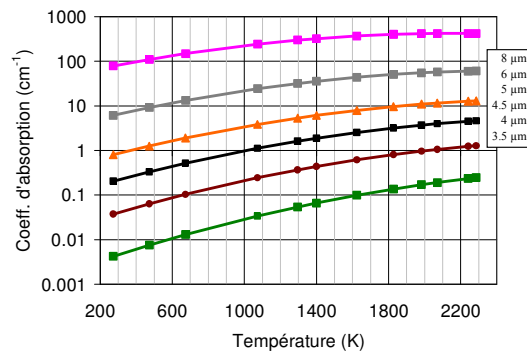


Figure 4 : Coefficient d'absorption du saphir dans l'IR moyen [4-5].

## 5. Comparaisons calculs/expérience

Les éprouvettes ont été soumises à des créneaux de flux de durée variable. La durée a été déterminée, pour chaque épaisseur, de sorte à ne pas dépasser environ 900 K au milieu de la face avant (plafond déterminé empiriquement sur la base de quelques essais préliminaires ayant été poursuivis jusqu'à la fracture des éprouvettes). La question était alors de statuer sur l'importance relative des échanges radiatifs internes dans le bilan thermique à ces niveaux de température. Un modèle 1D de transferts thermiques couplés conduction/rayonnement a été développé pour quantifier l'erreur commise si l'on ne prend pas en compte la divergence du flux radiatif dans l'équation de la chaleur. L'équation de transfert radiatif est résolue par bandes, sur la base d'un modèle par volumes finis, à symétrie azimutale, et avec des parois transparentes diffuses [6]. Les résultats montrent que, pour le type de sollicitation thermique envisagé et jusqu'à 1700 K dans le saphir, les échanges par conduction dépassent de beaucoup les échanges par rayonnement. De ce fait, l'omission du couplage entraîne des erreurs sur la température et sur la luminance en bande II (infrarouge moyen) qui restent inférieures à 3%, respectivement à 5%. Les calculs radiatifs peuvent donc se limiter, en 1D comme en 3D avec Fluent, à la bande spectrale de la caméra IR simulant l'autodirecteur.

Les comparaisons ont tout d'abord porté sur la température enregistrée par un pyromètre visant un disque de 6,6 mm de diamètre sur la face avant et la température calculée avec Fluent sur la même zone. Un bilan sur tous les essais entrepris indique un écart quadratique moyen d'à peine 3%.

Lorsque l'on compare ensuite la carte de luminance mesurée en face arrière par la caméra IR filtrée (fig. 5) et la carte calculée avec Fluent (fig. 6), on constate que les caractéristiques géométriques sont bien restituées mais que la dynamique est plus importante. Selon l'épaisseur de l'éprouvette, l'écart quadratique va de 15 à 35%. Différentes causes ont été invoquées : la connaissance imparfaite du coefficient d'absorption et l'existence de réflexions parasites résiduelles dans l'enceinte de mesure qui contribuent à « diluer » les contrastes de luminance.

On a également mesuré la déformation du front d'onde d'un laser HeNe à  $0,63 \mu\text{m}$  à la traversée des éprouvettes durant la phase de chauffage (analyseur Shack-Hartmann). Le front d'onde enregistré à la fin de la séquence de chauffe a été choisi pour effectuer la comparaison des résultats de mesure et de calcul (le code ZeBuloN a fourni les cartes de déplacement – fig. 7 -et le code Rayon a servi à effectuer les lancers de rayon).

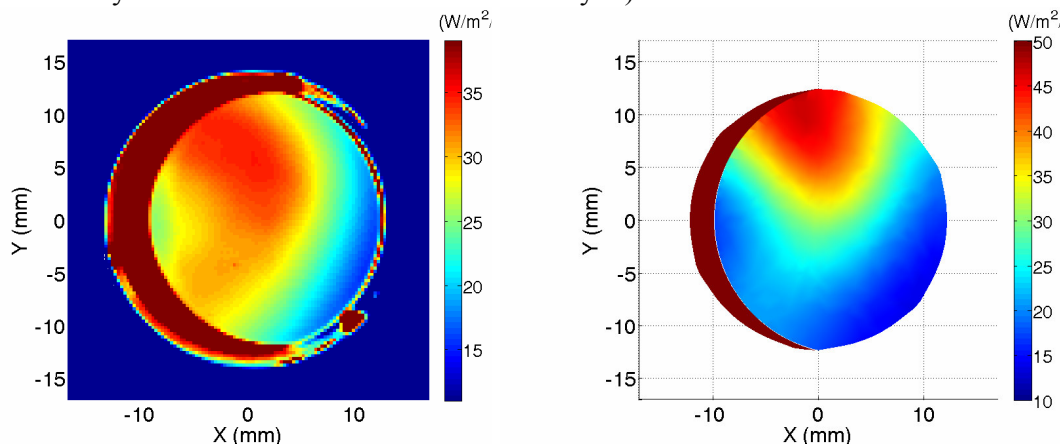


Figure 5 : Luminance mesurée par thermographie IR sur l'éprouvette de 4 mm (20 s de chauffage). Figure 6 : Luminance calculée par Fluent

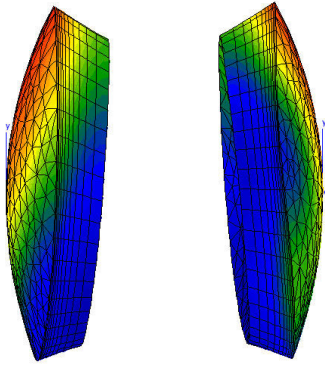


Figure 7 : Vues de l'échantillon de 4 mm après déformation due à l'échauffement ( $\times 1000$ ).

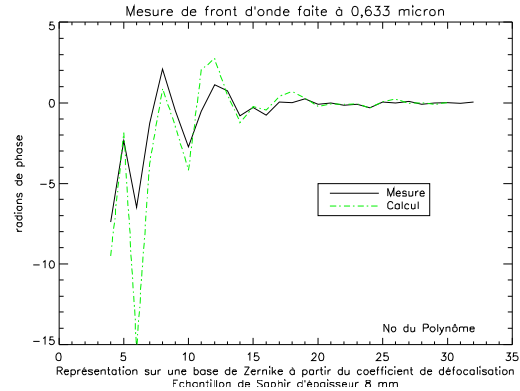


Figure 8 : Représentation modale de Zernike des défauts de phase à  $0,63 \mu\text{m}$

Une comparaison fine s'est faite en utilisant les représentations modales de la phase reconstruite ou simulée sur une base de polynômes de Zernike. La mesure et le calcul reproduisent remarquablement bien l'excitation des différents modes de la phase dégradée par la traversée de l'échantillon de saphir chauffé sauf pour le 6<sup>ème</sup> mode (mode associé à de l'astigmatisme) en raison d'un léger décalage entre les champs thermiques expérimental et simulé (cf. fig. 8). Le fait de travailler à  $0,63 \mu\text{m}$  permet d'exacerber les déformations que l'on attend dans l'infrarouge. La transposition à l'IR des résultats précédents et leur traduction en terme de fonction de transfert de modulation (FTM) fournit une quantification de l'effet TO réel. On constate, pour les cas traités (4 mm et 8 mm), une chute rapide de la FTM et une très faible transmission des fréquences spatiales au-delà de 20% de la fréquence de coupure instrumentale (cf. fig. 9). Ceci est dû à la présence de gradients thermiques latéraux et axiaux très importants dans les échantillons.

Ces résultats ont contribué à la validation de la chaîne des calculs « thermiques, thermo-mécaniques et optiques ».

## 6. Illustration pour une trajectoire particulière

Les codes pour l'aérodynamique externe et la thermique du hublot ont ensuite été couplés pour évaluer l'historique du champ de température dans le hublot et, *in fine*, la carte du flux IR parasite émis en direction de l'AD et l'erreur de pointage. Les figures 10 à 12 sont des exemples illustratifs pour un vol à 1600 m/s et 15 km d'altitude (Mach 5,3). La figure 10 est une représentation du champ de température à la surface d'un hublot en saphir de 6 mm d'épaisseur placé sur l'ogive du missile intercepteur. A l'issue de chaque seconde d'itération, le champ de température calculé par Fluent est retourné au code aérodynamique elsA afin de réactualiser le champ de flux convectif pariétal (modification de la couche limite). La figure 11 qui rapporte le profil de ce flux dans le plan vertical en fonction du temps, illustre l'importance de la prise en compte du couplage aérothermique pour le calcul de la sollicitation thermique que rencontre le hublot au cours du vol.

Des calculs de déviation de ligne de visée dans la couche limite ont été effectués et la figure 12 rapporte des résultats concernant un pointage dans la direction à  $90^\circ$  de l'axe de la trajectoire. Les courbes indiquent le cumul de la déviation à partir de la surface externe du hublot au début du vol et après 8s de vol. La déviation totale est plus faible à 8 s (0,011 mrad) qu'au début du vol (0,024 mrad). Ceci s'explique par la décroissance du flux pariétal au cours du temps (cf. fig. 11).

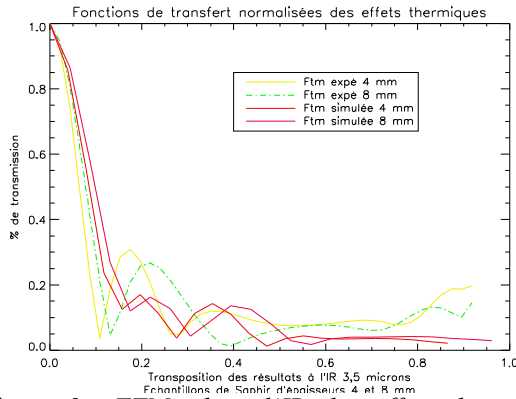


Figure 9 : FTMs dans l'IR des effets thermo-mécaniques dans les éprouvettes de 4 et 8 mm. Comparaison simulation/expérience. La fréquence est normalisée par la fréquence de coupure instrumentale.

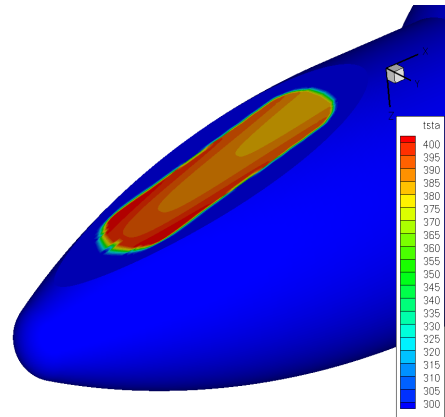


Figure 10 : Champ de température se développant à la surface d'un hublot en saphir de 6 mm après 1 s de vol à Mach 5,3, à 15 km d'altitude

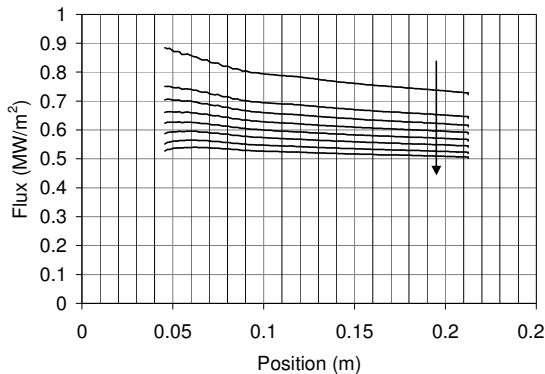


Figure 11 : Décroissance du flux pariétal le long de l'axe central du hublot au cours du temps. De haut en bas : flux prévalant pendant la 1<sup>ère</sup>, la 2<sup>ème</sup>, ... la 8<sup>ème</sup> seconde du processus itératif

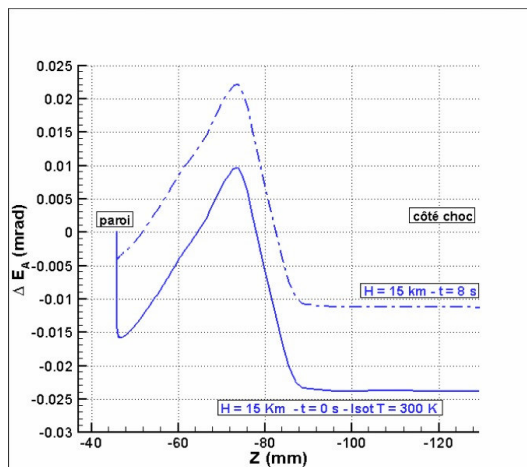


Figure 12 : Évolution cumulée de la déviation (en mrad) pour un tiré de rayon à la verticale, à 0,1 m du nez

## Références

- [1] L. Ibgui, Études de spectres infrarouges pour des applications de télédétection : développement d'un calcul raie par raie optimisé, mesures en laboratoire sur des trajets kilométriques ou à hautes températures, *Thèse Université Paris-Sud*, UFR scientifique d'Orsay, n°6124, 2000.
- [2] D. Demange, M. Bejet, Développement d'un nouveau moyen de mesure adapté à la mesure simultanée de la diffusivité thermique et de la chaleur spécifique à haute température, *ONERA, RTI 1/10390 DMSC*, 2006
- [4] D.W. Roy, J.L. Hastert, Polycrystalline MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> for use as windows and domes from 0.3 to 6 micrometers, *Proc. of the SPIE* vol. 400 (1983), 37-43.
- [5] M.E. Thomas., R.I. Joseph, W.J. Tropf, Infrared transmission properties of sapphire, spinel, yttria, and ALON as a function of temperature and frequency, *Appl. Opt.*, 27 (1988), 239-245.
- [6] Modest M.F., *Radiative Heat Transfer*, Academic Press (2003).

## Remerciements

Le Programme d'Étude Amont ATOMIC a été réalisé sous financement de la DGA que les auteurs tiennent à remercier.