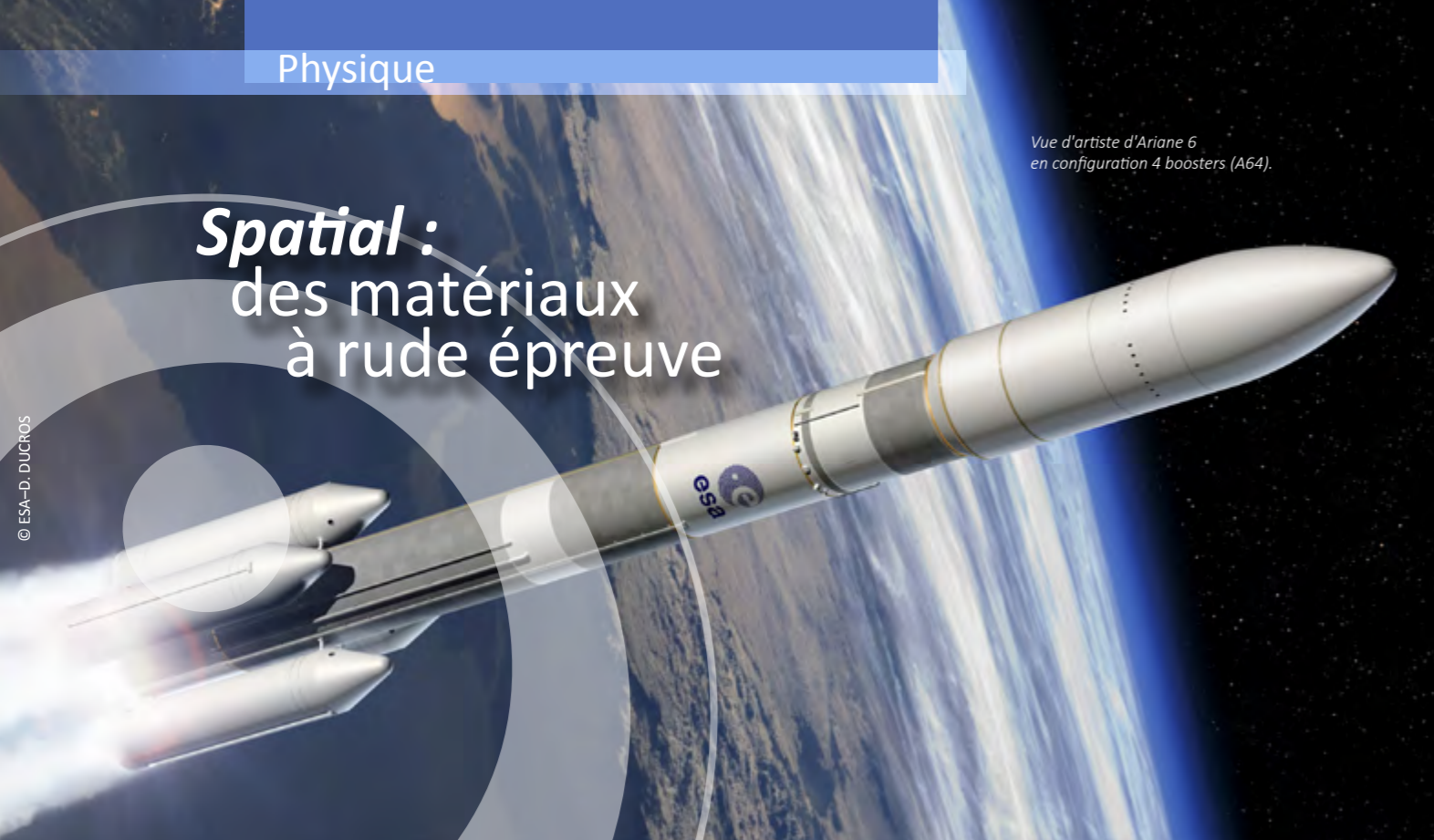


# Spatial : des matériaux à rude épreuve

Vue d'artiste d'Ariane 6 en configuration 4 boosters (A64).

© ESA-D. DUCHOS



Le laboratoire Science des procédés céramiques et de traitements de surface à Limoges\*, en collaboration avec Herakles et le CNES, a mis en place un banc d'essai approchant les conditions de dégradation par l'alumine liquide des matériaux constituant les tuyères des boosters de lanceurs spatiaux. Ces travaux contribuent à l'amélioration de la compréhension des phénomènes d'impact et d'ablation.

Les lanceurs spatiaux de type Ariane 5 sont équipés de moteur à propulsion solide permettant de vaincre la gravité lors des premières minutes de la phase de lancement. Herakles, filiale du groupe Safran, développe et produit les tuyères des moteurs pour Ariane 5. Dans la perspective d'améliorer les performances et de réduire les coûts de production et d'exploitation, Herakles optimise et adapte ses moteurs aux nouveaux lanceurs. Elle mène des études de R&D tenant compte des possibilités d'améliorations identifiées avec les anciens et actuels lanceurs. L'une d'elle porte sur la problématique de l'endommagement des matériaux, constituant les protections thermiques des tuyères, lié à la présence de particules d'alumine issues de la combustion du propergol solide.

Le combustible solide utilisé dans les moteurs à propulsion solide (MPS) est, en partie, de l'aluminium sous forme de particules qui, lors de la combustion, génèrent des gouttes microniques d'alumine liquide. Ces gouttes sont accélérées par les gaz de combustion : une partie frappe les protections thermiques de la tuyère à des températures de 2000 à 3000 °C, avec des vitesses d'impact de 50 à

200 m/s et des débits d'impacts de 1 à 100 kg/m<sup>2</sup>. Ces chocs engendrent un endommagement de la tuyère se caractérisant par une perte de matière en surface. Cette ablation a pour conséquence une récession de la surface des protections thermiques et donc une diminution de leur épaisseur qui peut être critique dans certaines zones. Les impacts d'alumine forment un film d'alumine qui alimente ensuite une flaque d'alumine en fond arrière de la tuyère. Les matériaux des tuyères développés par Herakles sont des matériaux composites dotés de renforts fibreux, usuellement en carbone, et d'une matrice polymère de type résine phénolique. Cette résine ralentit la propagation du flux de chaleur dans le matériau en consommant une partie de l'énergie par pyrolyse : il s'agit d'un matériau sacrificiel, nommé matériau « ablatif ». Les fibres assurent la tenue mécanique du matériau et des propriétés thermiques isotropes permettant, par exemple, une bonne conduction thermique à la surface de la tuyère.

### L'indispensable expérimentation en laboratoire

Dans la logique d'optimisation des boosters, Herakles et le CNES, mènent conjointement

des études visant à comprendre et quantifier le phénomène d'ablation des matériaux composites par l'alumine liquide. La difficulté technique d'étudier ces mécanismes sur la paroi d'une tuyère d'un booster, du fait de l'environnement complexe, rend indispensable le développement de solutions expérimentales et numériques pour reproduire le phénomène et l'étudier en laboratoire.

C'est donc le banc d'essai du SPCTS, basé sur le procédé de la projection thermique par plasma, qui reproduit et caractérise des impacts de gouttes à haute température (2100 à 2300 °C) et à des vitesses de 200 à 500 m/s sur un matériau composite ablatif chauffé à environ 2250 °C. Le dispositif mesure *in situ* la récession de surface du matériau testé et révèle, par des diagnostics appropriés, les paramètres conditionnant cette ablation.

Plus globalement, le laboratoire a pour objectif de quantifier et de décrire les différents phénomènes en fonction des conditions d'ablation et du matériau testé. Les conditions d'ablation du banc liées à l'alumine liquide doivent représenter au mieux

celles des boosters. Il est pour cela nécessaire de pouvoir reproduire les différents types d'interaction entre l'alumine et le matériau testé. Pour ce faire les travaux sont articulés autour de trois axes de travail :

## «... se rapprocher des conditions d'ablation du moteur à l'échelle réelle...»

### La modélisation d'un procédé

Les conditions étaient difficilement mesurables *in situ*, notamment les caractéristiques des particules à l'impact, telles que la vitesse et la température. La modélisation de l'écoulement plasma et du traitement thermique et cinématique des particules a permis de mieux estimer certaines conditions d'ablation du banc d'essai.

### L'amélioration de la représentativité des conditions d'ablation

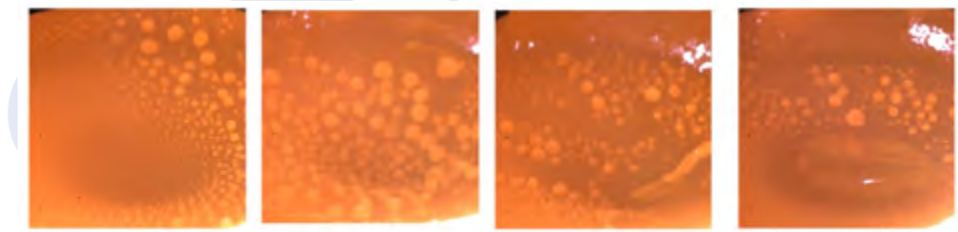
Les chercheurs se sont fixés pour but de se rapprocher des conditions d'ablation du moteur à l'échelle réelle. Cela s'est traduit, par rapport aux performances optimales du banc définies dans les travaux antérieurs, par une diminution de la vitesse d'impact des particules et une augmentation de leur température et de l'échantillon testé. Cette modification des paramètres opératoires a engendré un film liquide d'alumine à la surface de l'échantillon à 2070 °C, soumis à un écoulement de vitesse d'environ 76 m/s. Cette formation se déroule en plusieurs étapes (phases) :

- des gouttes d'alumine de diamètre compris entre 5 à 50 µm percutent la surface ;
- les gouttes coalescent pour former des agglomérats de gouttes (1 à 2 mm) ;
- les agglomérats sont éjectés en périphérie de l'échantillon ;
- un film d'alumine se forme sur le pourtour ;
- le film s'étend vers le centre de l'échantillon ;
- une fois le film établi, son épaisseur se stabilise du fait de la compétition entre l'arrivée de nouvelles particules et l'éjection du film en périphérie de l'échantillon.

L'obtention de ce film d'alumine a conduit à modifier les conditions d'ablation et donc d'élargir les paramètres d'études des phénomènes se déroulant au sein du booster.

### L'étude qualitative et quantitative

L'observation, l'identification, la description, la compréhension et la quantification des différents phénomènes d'ablation (thermiques, chimiques et mécaniques) en fonction des conditions d'ablation et des

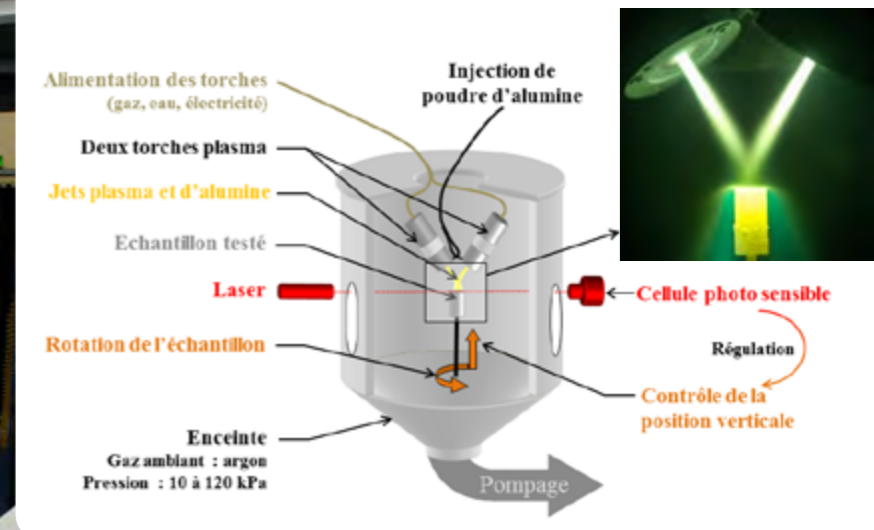


Séquence d'image de formation du film liquide d'alumine sur la surface d'un échantillon en graphite. 5 mm

© SPCTS



© SPCTS



Principe de base du banc d'ablation développé au SPCTS en partenariat avec le CNES et Héralès. A gauche : vue complète du banc d'ablation.

matériaux testés a mis en évidence le lien important entre les propriétés du matériau et son ablation.

Au-delà des travaux spécifiques liés à la reproduction et à la mesure de l'érosion d'un matériau équipant des moteurs à propulsion solide, le banc expérimental du SPCTS intervient pour tester toutes sortes de matériaux soumis à des conditions d'utilisations sévères aussi bien de température que de flux de particules chaudes. C'est le cas dans le domaine des protections thermiques comme par exemple lors de la rentrée atmosphérique des modules spatiaux ou encore pour les turboréacteurs au niveau des aubes de turbines.

**Simon GOUTIER < SPCTS**

simon.goutier@unilim.fr

[www.unilim.fr/spcts](http://www.unilim.fr/spcts)

\* SPCTS UMR 7315 CNRS/Université de Limoges/ENSCI