

34 Bouclier thermique

Ce dossier comprend :

- une présentation du concept de bouclier thermique en aéronautique et de l'accident du bouclier thermique de la navette spatiale Columbia ;
- un article sur l'inspection du bouclier de la navette Endeavour ;
- une présentation des caractéristiques techniques du bouclier thermique ;
- une présentation du projet Shingle pour l'amélioration des boucliers thermiques.

▣ **L'objectif de cet exercice est de rédiger une synthèse de ces documents afin d'expliquer le rôle du bouclier thermique lors de l'entrée dans l'atmosphère d'un engin aéronautique, ainsi que les risques associés à ces boucliers et les développements en cours pour les réduire.**

Le texte rédigé, de 25 à 30 lignes, devra être clair et structuré, et l'argumentation reposera sur les différents documents proposés.

DOCUMENT 1. Concept du bouclier thermique et l'accident de la navette spatiale Columbia

Concept du bouclier thermique

La chaleur est le pire ennemi de la navette. À l'image des avions, sa structure est principalement constituée d'aluminium, qui ne peut tout simplement pas supporter une telle température sans subir de dégâts. L'aluminium fond à 660 °C et peut même s'enflammer. Il fallait donc trouver un autre moyen pour protéger les astronautes et l'avionique de la navette spatiale. L'idée fut de l'envelopper de matériaux hautement résistants, c'est le rôle du "bouclier thermique".

Les ingénieurs ont donc recouvert entièrement la navette spatiale de 24 000 tuiles réfractaires en céramique ajustées avec précision et toutes différentes les unes des autres, dont la dimension est d'environ 10 à 15 cm de côté pour une épaisseur oscillant entre 1 et 10 cm. Elles sont principalement constituées de silice, une sorte de compromis entre la craie et la frigolite et recouvertes de verre en borosilice. Ces tuiles sont fragiles et friables mais elles offrent en contre-partie un excellent bouclier thermique qui protège efficacement la navette et ses occupants pendant la phase de rentrée atmosphérique.

Les tuiles blanches qui recouvrent la partie supérieure de la navette supportent une température maximum de 650 °C. Le dessous de la navette est protégé par des tuiles noires qui absorbent le plus gros de la chaleur et résistent à 1 200 °C. Mais ce sont les bords d'attaque des ailes qui rencontrent les chaleurs les plus fortes, jusqu'à 1 650 °C. Ils sont protégés par des panneaux en carbone renforcé.

Accident de la navette spatiale Columbia

Le 1 février 2003 à 17 h 58 TU, la NASA annonçait que Columbia et ses sept membres d'équipage avaient disparu en vol à quelques dizaines de kilomètres d'altitude, juste avant que les astronautes ne reprennent les commandes manuelles pour atterrir à Cap Canaveral en Floride.

Pour comprendre ce qui s'est produit, il fallut revenir quelques jours en arrière pour trouver des éléments de réponses. La première hypothèse qui fut évoquée fut qu'un objet mystérieux aurait endommagé l'intrados des ailes puisque c'est la partie de la navette qui encaisse le plus

34 Bouclier thermique

gros de la chaleur. Beaucoup d'éléments auraient pu y contribuer : une météorite, un phénomène de corrosion, une sorte d'éclair atmosphérique, un incendie électrique, un débris spatial, etc. Il fallait absolument trouver un indice afin de limiter le champ des recherches. Pour cela, il fallait analyser toutes les données de vol recueillies jusqu'au moment de l'accident.

Deux problèmes se sont manifestés, auxquels ni les autorités ni les astronautes n'ont vraiment prêté attention. D'une part [...], le plus insolite fut que les sondes de température de l'aile gauche aient affiché des valeurs trop hautes ou ne fonctionnaient plus. C'était un indice clé. En effet, ces sondes étaient localisées sous l'aile gauche, dans le logement principal des roues. Quant à y voir une relation de cause à effet, c'était trop tôt, il fallait plus d'indices.

Puis il y eut cet incident au décollage en rapport avec le réservoir orange. Un bloc de mousse isolante s'est détaché du réservoir principal 81 secondes après le décollage. Il s'agissait d'un fragment grand comme une valise, dont le poids fut estimé à environ 1,2 kg. Selon les estimations, ce morceau d'isolant heurta l'Orbiter à environ 800 km/h ! L'effet fut similaire à celui d'une masse de 220 kg percutant une voiture roulant à 120 km/h.

Selon Paul Fishbeck qui avait étudié un cas similaire quelques années auparavant, il avait retrouvé plus de 1 000 impacts sur les tuiles noires. Il estime que seule la chance aurait évité de tels accidents par le passé. Il considère en effet qu'on peut perdre une navette suite à un accident de ce genre. Son inquiétude fut partagée par d'autres ingénieurs de la NASA qui avaient déjà évoqué ce risque dans des courriers internes, mais les autorités n'ont jamais considéré sérieusement ce problème.

Un nouvel élément déterminant apparut, remettant en cause tout ce qui avait été dit sur la sécurité de la navette. Hal Gehman [Président du CAIB (Columbia Accident Investigation Board), le Comité chargé d'enquêter sur l'accident de Columbia] réexamina l'endroit heurté par la mousse. Grâce à des techniques photographiques sophistiquées, l'impact de l'isolant révéla un événement hautement improbable. L'isolant semblait ne pas avoir touché les tuiles, blanche ou noire. Il aurait directement percuté le bord d'attaque de l'aile gauche protégé par du carbone très résistant. Le bord d'attaque est dur comme du roc et il est surprenant que la mousse ait pu l'endommager. Ce fait était embarrassant pour la NASA car ce matériau était censé être indestructible.

Les enquêteurs démontèrent le bord d'attaque d'une autre navette et l'installèrent dans un laboratoire proche. Pendant un mois entier, les scientifiques bombardèrent l'aile de débris isolants et enregistrèrent ses effets. Au terme de l'expérience, aucun doute ne subsista. Le bloc isolant avait bel et bien détruit l'aile et on parvint même à déterminer exactement l'endroit où le choc eut lieu, juste sous le panneau de carbone, entre les joints 7, 8 et 9. Il y avait bien une fissure et la navette vola 16 jours avec cette déchirure dans son aile.

Après sept mois de travail, les enquêteurs pensaient tenir leur solution. Grâce aux données télémétriques, nous savons qu'un problème thermique est apparu sur le train d'atterrissage et sur l'aile gauche quelques minutes avant l'accident. En fait, la mousse a percé le bord d'attaque de l'aile gauche et endommagé sa structure. Au cours de la mission en dehors de l'atmosphère, en raison du froid qui règne dans l'espace, cet accident n'a eu aucune conséquence. Mais le jour du retour sur Terre, la chaleur liée à la friction atmosphérique et l'onde de choc ont lentement élargi la fissure et la chaleur a pénétré d'au moins 40 cm dans l'aile. Les capteurs thermiques localisés à l'intérieur du compartiment du train d'atterrissage ont relevé une

34 Bouclier thermique

augmentation de température de 8 à 15 °C, soit encore relativement faible, mais ce qui a déclenché l'alarme. Malheureusement, rapidement la chaleur s'est propagée dans la structure et a lentement fait fondre l'aluminium, modifiant la résistance de l'aile. Sous la chaleur et la pression, la fissure s'est étendue, amplifiant le phénomène dans une réaction en chaîne. La combinaison de toutes ces anomalies a alerté les ordinateurs qui, en essayant de modifier l'assiette de la navette pour réduire la hausse de température a perdu tout contrôle. La navette se trouvant dans une phase très critique du vol, le funeste résultat était comme programmé. Incapable d'adopter l'assiette voulue et avec une aile à moitié brûlée, la navette se désintégra progressivement à mesure qu'elle plongeait dans l'atmosphère. Quand le Centre de vol reçut les alarmes sur ses écrans, il était déjà trop tard.

D'après le site Internet <http://astrosurf.com/luxorion/astronautique-challenger.htm>

DOCUMENT 2. Inspection du bouclier de la navette Endeavour

Les astronautes de la mission STS-134 vont procéder à l'inspection minutieuse du bouclier thermique de la navette Endeavour ce samedi, en raison de plusieurs impacts de débris spatiaux sur le bouclier thermique de celle-ci. Ces débris proviennent sans doute de la mousse isolante du réservoir externe lors de sa séparation avec le vaisseau spatial américain.

Ces impacts ont pu être observés grâce aux photos prises par les astronautes de l'ISS lors de la manœuvre de retournement de la navette, lors des opérations d'arrimage. Les ingénieurs ont pu écarter six des sept points d'impacts, mais préfèrent, par mesure de précaution, vérifier la dernière tuile endommagée qui pose un doute.

Pour ces vérifications, les astronautes vont se servir du Canadarm, le bras robotique de l'ISS, doté d'un laser et d'une caméra haute définition afin de déterminer la profondeur de la cavité et sa taille.

Si cette dernière est jugée trop importante, la NASA envisagera alors une sortie dans l'espace afin de réparer et de remplacer la tuile endommagée, permettant ainsi un retour sans danger sur Terre. En effet, les tuiles céramiques du bouclier thermique ont une importance capitale pour le retour dans l'atmosphère, ce sont elles qui protègent l'engin spatial et ses occupants, des températures de frottements sur les couches d'air denses générées par la vitesse lors de la rentrée.

Ces températures peuvent atteindre plus de 1 500 degrés en certains endroits du bouclier. La navette spatiale Columbia s'était désintégrée lors de sa rentrée dans l'atmosphère le 1^{er} février 2003 lors de la mission STS-107, coûtant la vie des sept astronautes à son bord. L'Agence spatiale américaine ne veut prendre aucun risque.

Extrait de « Endeavour : Les astronautes vont inspecter le bouclier thermique »,
Leonardo da Vinci, *Planet Techno Sciences* (2011).

<http://www.planet-techno-science.com/ciel-et-espace/endeavour-les-astronautes-vont-inspecter-le-bouclier-thermique/>

34 Bouclier thermique

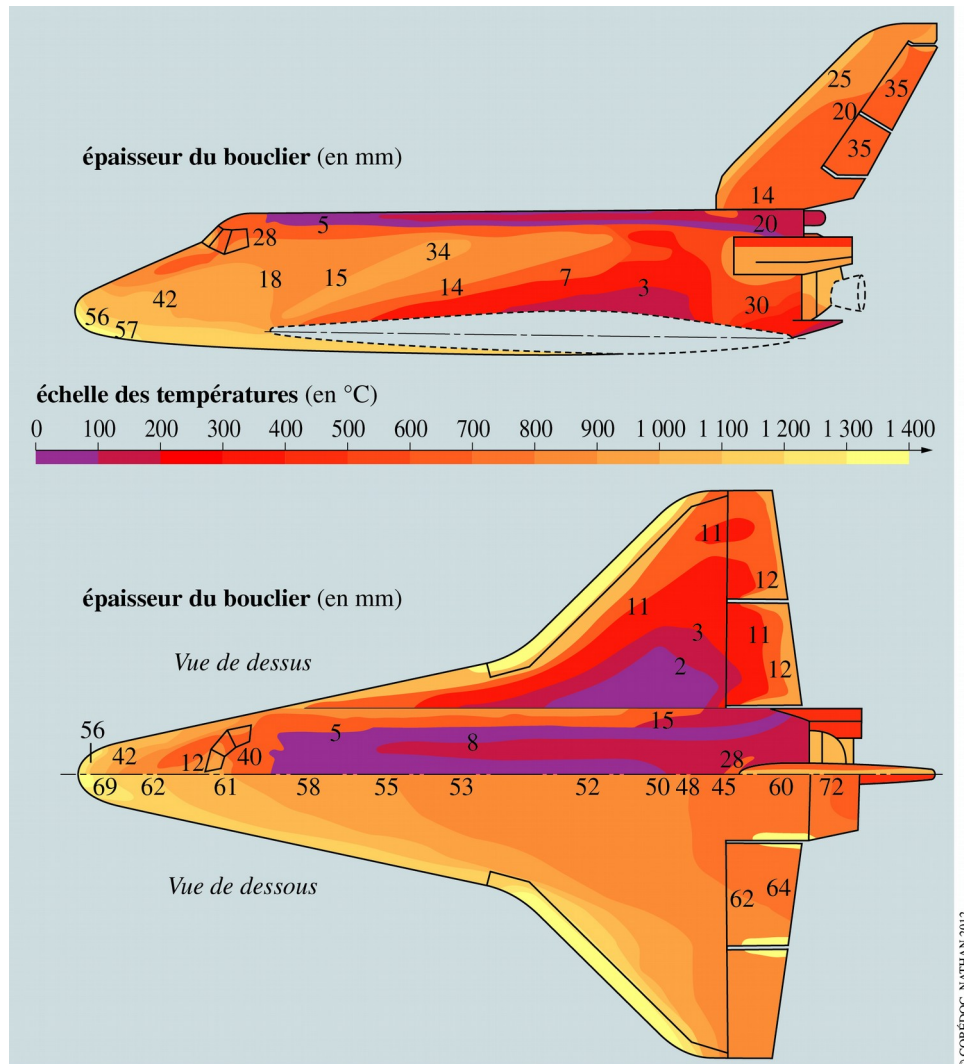
DOCUMENT 3. Caractéristiques techniques du bouclier thermique

Les conditions extrêmes de chaleur pendant la descente dans l'atmosphère ont obligé les ingénieurs à trouver une solution pour élaborer le bouclier thermique. Ce dernier sera constitué de fibres super fines d'oxyde de silicium (l'analyse de tous les composants du bouclier a montré que le rayonnement peut être fortement affaibli par l'utilisation de fibres de 1,5-2 microns), capable d'affaiblir le rayonnement thermique et d'augmenter la dispersion de la chaleur pour protéger la structure de la voilure.

Différentes exigences étaient requises pour le bouclier thermique : solidité des plaques, faible poids, résistance à de hauts gradients de température, conductibilité thermique faible, haut degré de noirceur (0,8-0,9), résistance à l'oxydation. Tous ces points ont conduit les ingénieurs à créer des tuiles à base de fibres de quartz.

Dans les zones de fortes chaleurs (supérieures à 1 250 °C), le nez, le bord d'attaque des ailes, il fallait créer un matériau très résistant à base de carbone car les températures pouvaient monter jusqu'à 1 650 °C. Alors que dans les zones où la température n'excédait pas 370 °C, le bouclier était fait à base de composés organiques.

34 Bouclier thermique



répartition de la température sur l'avion

La technique élaborée pour la fabrication des tuiles thermiques et leurs caractéristiques physico-mécaniques sont supérieures à leurs homologues étrangers.

Les caractéristiques techniques des tuiles étaient : une grande récurrence d'utilisation (100 cycles), des gradients de températures importants (150 °C à 1 650 °C), coefficient de conductibilité thermique faible $0,06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 100 °C, $0,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 1 100 °C, un coefficient de dilatation de $7/10\ 000\ 000$ et une densité inférieure à $0,15 \text{ g/cm}^3$.

Pour que les tuiles offrent une haute résistance aux charges thermiques il était nécessaire d'utiliser des matières pures, la concentration en impuretés devait être minimale (particulièrement en alcalin et alcalino-terreux). La concentration du dioxyde de silicium était de 99,9 %, ce qui assurait la stabilité à la cristallisation de l'oxyde amorphe et permettait la garantie des propriétés du matériau.

Les tuiles du bouclier sont collées à une couverture extérieure en tissu de 0,3 mm d'épaisseur, laquelle est aussi collée au fuselage. Cette couche de tissu réfractaire sert d'isolant thermique

34 Bouclier thermique

entre le bouclier et le fuselage, et permet de minimiser l'impact de la déformation du bouclier sur ce dernier.

Les tuiles sont positionnées sur toute la surface de la navette avec un jeu qui prend en compte la déformation du bouclier due aux montées de température et aux différences de charges mécaniques durant le vol. Ce jeu n'excède pas 0,3 à 0,5 mm pour permettre un écoulement harmonieux de l'air chaud. L'espace entre certaines tuiles est parfois comblé par des feuilles à base de fibre de quartz.

Le principal problème de l'utilisation d'un bouclier constitué de tuiles est la perte de l'une d'elle. Les études faites sur la navette de test ont permis de conclure que l'endommagement ou la perte de quelques tuiles n'entraînerait pas la fusion de la structure de la voilure, et donc la destruction de la navette.

Au total le bouclier thermique est constitué de 38 600 tuiles (38 800 suivant les sources), 15 % d'entre elles sont irrégulières ou particulièrement complexe (rigole, chanfreiné, etc.).

De **Vassili Petrovitch**, d'après le site Internet :
<http://www.buran.fr/bourane-buran/bourane-consti-bouclier.php>

34 Bouclier thermique

DOCUMENT 4. Présentation du projet « Shingle »

Shingle veut dire « plaque » en anglais. Ce nom résume à lui seul les objectifs du projet : obtenir une protection thermique de grande taille, standardisée, simple à entretenir. Tout le contraire de ce qui a été fait jusqu'à présent.

Car il existe déjà un lanceur partiellement réutilisable, la navette spatiale américaine. Mais avec des coûts de maintenance exorbitants et une fragilité tragiquement mise en évidence après la perte de Columbia en 2003, son système de protection thermique a presque valeur de contre-exemple.

L'essentiel de la protection thermique de la navette spatiale américaine est assuré par des pavés d'environ 10 cm d'épaisseur et guère plus pour les cotés, reposant sur un feutre collé à la structure en aluminium du véhicule. Ces pavés sont constitués d'un enchevêtrement de fibres céramiques, et sont séparés par des joints d'étanchéité. *« Sur le principe, poursuit Yves Prel, la technologie que nous comptons employer n'est pas très différente. Il y a également des céramiques et des fibres composites dans notre concept, mais c'est la façon de les mettre en œuvre qui change tout. Nous recherchons des solutions plus souples et plus simples à entretenir, notamment en jouant sur des effets d'échelle. Plutôt que des pavés collés, nous réfléchissons donc à des plaques ».*

Avez-vous déjà essayé de nettoyer une de ces très jolies fenêtres de style rustique constituées de petits carreaux de verre séparés par des croisillons ? C'est un travail qui réclame beaucoup de soin et de patience. À présent, imaginez que cette fenêtre difficile à entretenir soit la protection thermique de la navette. Le principe du shingle, c'est de remplacer ces petits carreaux par une seule grande vitre, qui se nettoierait d'un simple coup de chiffon. *« Là où la navette compte plus de 25 000 pavés, nous n'aurions besoin, pour couvrir une surface équivalente, que de 1 000 shingles ».*

Démontables, ces boîtes faciliteraient grandement l'inspection et la maintenance non seulement des parois mais aussi du matelas isolant, et bien sûr leur remplacement éventuel.

Extrait de l'interview « Shingle, un bouclier contre la chaleur » de Yves Prel, ingénieur d'affaires au CNES, CNES, août 2006.

<http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/5336-shingle-un-bouclier-contre-la-chaleur-25.php>