

# Matériaux spatiaux sous sollicitations mécaniques rapides

Ch. DURIN, Centre National d'Etudes Spatiales, CNES, 18 av E. BELIN 31401  
Toulouse cedex 9

## Abstract

L'objet de cette présentation est de décrire les sollicitations mécaniques auxquelles sont soumis les matériaux utilisés dans les structures spatiales, et les solutions que nous avons apportées pour résoudre/limiter cette problématique.

Les matériaux utilisés pour les lanceurs, les satellites et les stations spatiales sont soumis à de nombreuses contraintes, notamment mécaniques. Durant le vol orbital, ils peuvent être heurtés par des objets provenant de l'espace (micrométéorites) ou des débris provenant d'engins déjà en orbite. Les vitesses atteintes par ces impacteurs varient de quelques Km/s à des dizaines de Km/s. Les conséquences de ces impacts peuvent être limitées à des pertes/évolutions de fonctions, des dommages avec une possible interaction avec d'autres paramètres de l'environnement et jusqu'à des scénarios-catastrophes (perte de satellites et danger pour les cosmonautes). Un effet «boule de neige» par génération exponentielle de débris suite à des explosions est possible, car la durée de vie de ces objets est extrêmement longue. Pour les objets en orbite basse, des situations de rentrée atmosphérique se sont produites. Dans ces cas-là, le comportement des matériaux survivant à une rentrée a été regardé en termes de dommages à l'impact et de risques pour les populations et l'environnement.

Les solutions apportées à cette problématique sont diverses et la présentation décrira les solutions de type : choix des matériaux et procédés, qualification par essais sol et modèles, évolutions des modèles d'environnement, retour d'expérience en vol et solutions systèmes. L'apparition de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies sera décrite au travers de résultats d'études de recherche faites en amont et de doctorats menés en collaboration avec nos partenaires industriels. Aujourd'hui cette problématique devient plus aigüe car la population de débris augmente du fait de l'utilisation continue de l'espace, du non-retrait des structures en fin de vie, de l'évolution des réglementations et de l'augmentation des durées de vie des engins spatiaux.

L'objectif final est d'obtenir le meilleur compromis pour nos matériaux qui respecte ces contraintes mécaniques et toutes celles vues par nos structures au sol et en vol, en limitant les risques associés.

## Introduction

Les structures spatiales sont susceptibles d'être exposées à de nombreuses contraintes durant leurs vies sol et vol. Si le maximum de contraintes mécaniques sera atteint durant la phase de lancement, d'autres environnements mécaniques doivent être pris en compte. Si les systèmes sont dimensionnés pour résister aux contraintes sol et vol, les structures en vol peuvent être soumises à des chocs non prévus, avec des énergies cinétiques importantes et qui génèrent un fort risque de dommage voire de destruction. Il est extrêmement difficile d'éliminer ce risque mais des actions sont prises pour le minimiser et trouver le meilleur compromis entre plusieurs types de solutions. Pour cela, des essais et des simulations sont menés afin de conforter les dimensionnements tout en optimisant les masses embarquées.

## L'environnement particulière

### Les météorites

Tous les étés, la trajectoire de la Terre l'amène dans le sillage de comètes et nous pouvons observer de nombreuses étoiles filantes qui sont le signe de la destruction de météorites dans l'atmosphère terrestre. Les spécialistes estiment que près de 100 tonnes de matières météoritiques s'abattent sur Terre chaque jour, mais la plupart sont déjà réduites à l'état de poussière lorsqu'elles touchent le sol. De plus, dans 85% des cas, elles finissent leur course dans les océans qui couvrent la majeure partie de la surface terrestre. Elles sont composées essentiellement de silicates, de pyroxènes de fer et de nickel.

Ces particules atteignent des vitesses très élevées de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde et leurs énergies cinétiques les rendent très dangereuses pour toutes les structures en orbite autour de la Terre. Les dommages rencontrés peuvent aller de la perforation à la destruction complète de la structure. Pour celles de grande taille (masse) qui peuvent survivre à une rentrée atmosphérique, les conséquences pourraient aller de catastrophes naturelles très importantes (tremblement de terre, tsunami..) à un changement de climat global par interruption longue du cycle solaire au sol, dû à une épaisse couche de poussières dans l'atmosphère. Le passé et certains faits récents montrent que de tels événements peuvent survenir mais avec des fréquences très faibles.

La probabilité qu'une petite météorite tombe sur une zone habitée est très faible, et encore plus qu'elle blesse ou tue lors de l'impact. En revanche, la probabilité qu'une structure spatiale soit frappée par une météorite est réelle, surtout pour les particules de petite taille. Concernant les missions hors de

l'orbite terrestre avec des durées de voyage très longues la probabilité reste faible mais doit être prise en compte.

## Les débris

L'origine de ces objets est diverse : il peut s'agir tout d'abord de satellites arrivés en fin de vie et qui restent en orbite autour de la terre. Cela peut ensuite être des objets mis en orbite en même temps que le satellite, comme le dernier étage du lanceur, les dispositifs de séparation, ou les capots de protection. Mais la très grosse majorité des débris est le résultat d'explosions volontaires ou accidentelles ayant eu lieu dans l'espace, ou bien de collisions entre objets. Enfin, le vieillissement des matériaux dans l'espace entraîne aussi la production de très nombreux débris (décollement des cellules photoélectriques, effritement des couvertures de protection thermique).

Ces débris se retrouvent surtout sur des orbites "utiles", où l'activité spatiale est la plus importante : orbite géostationnaire à 36000 Km, sur laquelle sont placés la plupart des satellites de télécommunication, orbites basses entre 200 et 1500 km qui sont utilisées par de nombreuses missions d'observation civile et militaire de la Terre, ainsi que pour les missions habitées. Ces objets sont animés d'une vitesse moyenne estimée à 10 km/s, mais qui dépend de l'événement qui l'a créée. A ces vitesses, l'énergie cinétique d'une particule même de faible taille est considérable. Actuellement, aucun blindage ne résiste à des objets ayant une taille supérieure à 1 ou 2 cm. Heureusement, la probabilité de collision reste faible, mais sur certaines orbites elle est loin d'être négligeable : ainsi, pour le télescope Hubble par exemple, on estime à 4 %, la probabilité d'un impact par un objet supérieur à 1 cm pendant sa durée de vie. Pour les vols habités, il est impératif de prévoir des systèmes de protection, mais il est impossible d'atteindre un risque zéro.

A l'altitude de Spot (800 km) la durée de vie de ces débris est de l'ordre de un à deux siècles. Sur les orbites plus élevées, les durées de vie se comptent en millénaires ou dizaines de millénaires. Enfin, en orbite géostationnaire, il n'y a plus de trace d'atmosphère et cette durée est quasiment infinie.

Depuis le début de la conquête spatiale en 1957 et près de 5000 lancements, l'activité humaine a entraîné la production dans l'espace d'un très grand nombre d'objets. La population d'objets créés par l'homme est maintenant devenue supérieure à la population naturelle estimée de météorites. Ces objets artificiels en orbite autour de la terre se répartissent en :

- 12 000 objets d'une taille supérieure à 10 cm (catalogués par le réseau américain de surveillance de l'espace, mais sans les satellites américains classifiés)

- Masse totale des objets de plus de 10 cm : 5100 tonnes
  - 600 satellites actifs (opérationnels)
  - 2200 satellites abandonnés
  - 1700 étages de lanceurs
  - 1300 débris opérationnels (objets volontairement libérés au cours des missions)
  - 6200 fragments (dans le catalogue des Etats-Unis, 346 objets sont attribués à la France)
  - 194 fragmentations qui ont eu lieu dans l'espace : explosions et collisions (accidentelles et volontaires)
- 200 000 objets (estimation) compris entre 1 et 10 cm
  - 35 millions d'objets (estimation) compris entre 1 mm et 1 cm

## Les matériaux

Pour les particules avec de faibles vitesses/masses les matériaux concernés seront essentiellement les matériaux de surface. A ce niveau, nous utilisons pour les structures des matériaux métalliques, des matériaux composites, des films polymères pour les protections thermiques, des verres/céramiques pour des optiques et cellules solaires. Tous les revêtements sont aussi concernés (peintures, traitements de surfaces). Pour les particules avec de plus grandes vitesses tous les matériaux utilisés sur les satellites sont concernés, car l'énergie incidente va permettre de traverser tout ou une partie du satellite. Dans ce cas-là, sont concernés en plus des matériaux précédents ceux utilisés pour l'électronique, les batteries, les réservoirs...La mécanique du choc hyper vitesse va donc être applicable à des matériaux au comportement fragile, ductile et élastique non linéaire.

## Les modes de défaillance

Pour les matériaux métalliques, et ce en fonction de l'énergie de la particule, nous retrouvons des dommages face avant et/ou des deux côtés jusqu'à la perforation du matériau. Les traitements de surface et/ou les peintures sont localement détruits. En fonction de l'incidence, les particules peuvent aussi générer des éclats qui deviendront eux-mêmes des petits débris. En cas de

perforation, des débris de la particule et de la surface impactée sont projetés vers l'intérieur de la structure, sur des zones non conçues pour résister à ces contraintes. Lors de l'analyse de pièces vol, il est souvent très difficile de retrouver des traces de la particule incidente car les contraintes thermomécaniques amènent souvent à la vaporisation de cette particule. Le cratère formé est typique et par certains côté ressemble à des cratères que l'on peut trouver sur la lune et aussi sur la Terre (Météor Crater).

Pour les matériaux polymères, les films sont le plus souvent perforés par les particules incidentes. Il existe une fusion locale autour de la zone d'impact mais la particule est moins déformée lors de l'impact et dans certains cas a pu être retrouvée pour analyse. Cela nous a permis de comprendre que ces multicouches peuvent être une protection efficace pour les plus petites particules.

Les matériaux composites quant à eux sont soumis à des perforations, rupture de fibres, dommages aux interfaces et défauts de surface.

Pour les verres et céramiques, les impacts génèrent beaucoup de particules face avant et face arrière avec des zones d'endommagement très supérieures à la zone d'impact (fissures, éclats...).

## Les effets synergétiques

Bien que très pénalisant, l'effet mécano thermique d'un impact hyper vitesse sur des structures spatiales doit être aussi regardé, au travers de la possibilité donnée aux autres paramètres de l'environnement spatial d'interagir sur les matériaux. En effet, profitant du dommage créé (perforations, dommage de surface), des matériaux mis à nu peuvent se retrouver exposés aux radiations ultra-violettes, ou à des résidus d'oxygène pour l'orbite basse (sous forme d'oxygène monoatomique (AO)) et vont être dégradés par érosion, vieillissement prématuré, ou lumière parasite.

Dans le cas de destruction partielle et/ou d'explosion suite à un impact sur une structure satellite, de nombreux débris de toutes tailles peuvent être créés et devenir eux-mêmes des futurs objets à risque pour les satellites en activité.

Les éjections face avant d'un nuage de particules sont un risque supplémentaire à prendre en compte car cet effet rebond va permettre à des zones initialement protégées de se retrouver exposées à un risque d'impact.

Au niveau système, l'accumulation de chocs même à faible vitesse est un facteur générant des perturbations de l'attitude des satellites, et nécessite des moyens de contrôle et de correction.

## Les solutions

Comme discuté en introduction, il n'existe pas de solution parfaite à ce problème. Il faut avoir une approche multi solutions qui va permettre de trouver le meilleur compromis, qui respecte nos contraintes tout en ne pénalisant pas la mission elle-même (par exemple par l'ajout de masse au détriment de la charge utile).

### ***Première étape : La connaissance et l'évolution des paramètres environnementaux***

Des astronomes cherchent et suivent tous les météorites qui circulent dans notre système solaire afin de connaître précisément leurs trajectoires et les risques de collisions avec nos satellites et/ou la Terre. La vitesse/énergie de ces objets est telle qu'il n'existe pas de système de protection suffisant, et seule la très faible occurrence de ces événements nous permet d'avoir un niveau de risque très faible. Pour les plus petites particules, un modèle Européen de distribution des particules en fonction de leur taille existe et permet à nos projets, en fonction de leurs dates de lancement, d'établir un niveau de risque.

En ce qui concerne les débris plus grands que 10 cm, ils sont suivis par voie radar et/ou optique. Un catalogue US de ces objets existe, ainsi que des logiciels d'évolution de trajectoire, qui nous permettent de sécuriser les lancements et de déclencher une alerte en cas de collision prévisible avec un satellite. Pour tous les petits débris, des estimations ont été faites sur la base de retour d'expérience en vol grâce à des détecteurs embarqués, afin d'estimer le risque et de modifier si possible la conception pour garantir a minima la durée de mission. Ces données ont été intégrées dans le logiciel Européen, qui calcule le risque de chocs avec ces particules dont la masse et la vitesse couvrent un spectre très large.

### ***Deuxième étape : le choix du design***

Il est clair que nous ne dimensionnons pas nos structures pour résister à des chocs engendrant une telle énergie. En revanche, nous travaillons de plus en plus en considérant la position des éléments sensibles vis-à-vis de ce risque d'impact. Par exemple, si cela est possible, un réservoir sera plutôt placé derrière un mur qu'en extérieur. Dans sa technologie, son mode de défaillance sera plutôt «fuiteux» que «explosif». Dans certains cas il n'est pas possible de protéger les matériaux ; c'est le cas des cellules solaires, qui du fait de leur fonction doivent être en regard de l'environnement. Elles représentent de très grandes surfaces (dizaine de m<sup>2</sup>) et sont donc très fragile vis-à-vis des impacts. Dans ce cas, l'augmentation des surfaces utiles fin de vie est une partie de la solution, mais certaines technologies de type générateur souple, très sensibles à des impacts face arrière, ne sont pas recommandées.

### *Troisième étape : le choix des matériaux*

Sur les satellites et lanceurs, de nombreux matériaux sont utilisés. Dans ce cas aussi, un compromis est atteint pour prendre en compte toutes les contraintes vues par nos matériaux mais dans certains cas, notre choix se porte sur des matériaux spécifiques pour répondre à la problématique des impacts. Typiquement pour les réservoirs, des bobinages à base de Kevlar sont réalisés pour les protéger d'une partie de la population des débris.

Pour les zones sensibles et les zones habitées (station orbitale), une solution de multimurs a été retenue. Son principe est de fractionner l'énergie d'une particule au passage d'une interface. Chaque mur est séparé du précédent par une zone de vide. Souvent le premier mur est perforé par la particule mais la particule elle-même est fractionnée, ce qui permet durant le temps de vol entre les murs de répartir l'énergie restante sur une plus grande surface. Ainsi, à l'arrivée sur le second mur, les dommages seront moindres et même si ce second mur est perforé, le principe de fractionnement de l'énergie va se reproduire et le troisième mur pourra arrêter le reste de l'énergie de la particule sans dommage important. Les essais réalisés montrent que cette configuration est bien adaptée pour protéger les structures notamment habitées d'une grande partie des impacts non détectables.

Des systèmes utilisant une grille de protection pour arriver à cet effet de fractionnement ont aussi été testés en laboratoire.

Ce principe de multi interfaces est applicable aux matériaux de protection thermique qui sont un assemblage de plusieurs couches d'un film plastique avec des intercalaires organiques. Ils permettent d'arrêter une population de particules de faible vitesse/masse. Ces matériaux ont été utilisés dans des pièges à particules afin de pouvoir procéder à leur analyse lors du retour au sol d'expériences embarquées.

Du côté des nouveaux matériaux, nous avons testé des nanomatériaux pour leurs propriétés mécanique et thermique, comme les aérogels de silice, qui sont constitués de milliards de nano cellules. Ces milliards d'interfaces sont autant de barrières pour arrêter un flux thermique et/ou une particule ayant une vitesse élevée. Concernant l'aspect mécanique, nous avons pu arrêter des particules avec une vitesse de 6 Km /s dans quelques millimètres de hauteur d'aérogel.

De plus pour nos applications, ces matériaux ont une densité très faible (0.1 g/cm<sup>3</sup>) mais nécessitent des systèmes de confinement adaptés. Lors d'essais, les particules (pour les plus grosses) ont pu être récupérées pour analyses car elles ont été peu déformées par l'impact dans ce matériau fragile. Des capteurs de particules utilisant ces matériaux volent actuellement sur un satellite argentin voir Référence 1 et des études sur des systèmes de

protection utilisant leurs propriétés ont été étudiés dans la thèse en Reference 2.

### **Quatrième étape : les essais et simulations**

Pour qualifier/ valider nos matériaux et technologies, nous réalisons des essais, des simulations et des expériences en vol.

Concernant les essais, le principal problème est de trouver des lanceurs avec des vitesses élevées (jusqu'à 10 Km/s) et pouvant projeter sous vide des masses importantes. Les essais sont réalisés sur des structures complexes, par exemple un réservoir, pour déterminer leurs modes de ruine. Des essais élémentaires sur tous les matériaux servant dans nos structures sont aussi réalisés (matériaux composites, NIDA, verre, MLI ..). Des expertises techniques sont ensuite effectuées afin de déterminer l'étendue des zones de dommages, les quantités de matière détruites, et l'impact sur les performances des matériaux.

Tous ces essais sont complétés par des simulations numériques qui permettent après recalage d'étendre le domaine des résultats. Très rapidement, les simulations par éléments finis se sont retrouvées limitées pour décrire les phénomènes mis en jeu, et aujourd'hui nous utilisons des hydrocodes pour simuler les phénomènes de pression, température et changement d'état, rencontrés pendant un impact hyper vitesse. Les corrélations donnent de bons résultats et la référence 2 nous a permis d'obtenir beaucoup de données dans le domaine des matériaux fragiles.

### **Cinquième étape : les solutions système**

Au niveau système, des solutions sont aussi mises en place pour réduire les risques. Du côté des nouvelles générations de lanceurs, le troisième étage sera ré-allumable, à la base pour déposer les satellites sur deux orbites différentes, mais aussi pour les mettre sur une trajectoire de rentrée après la fin de mission avec l'objectif de limiter leur durée de vie en orbite.

Pour les satellites en orbite géostationnaire qui ne peuvent pas revenir au sol, des règles ont été établies afin qu'en fin de vie ils soient éloignés des orbites utiles, pour éviter des collisions.

En orbite basse, la règle impose une trajectoire pour une rentrée dans une période de moins de 25 ans. Ces dispositions sont toutefois assez complexes à mettre en œuvre car il faut garantir que la propulsion sera opérationnelle et efficace en fin de mission.

Pour les satellites « sensibles », leurs trajectoires sont croisées avec la position des objets catalogués et si un rapprochement est détecté, des manœuvres d'évitement peuvent être engagées. Il nous faut une très grande précision dans

la position des satellites et des débris et dans l'évolution des trajectoires, afin de limiter ce type d'alerte, pour ne pas consommer les réserves d'ergols et réduire la durée de vie des structures.

## Références

Ref 1 : « *Impacts à Haute Vitesse sur cibles fragiles ; Application au projet de Laser Megajoule et à la problématique des débris spatiaux* »

Thèse Université de Toulouse III - PAUL SABATIER U.F.R. P.C.A. présentée et soutenue par : Yann MICHEL Février 2007

Ref 2 « *Space debris sensors* »

L. Duffours (1), T. Woignier (2,3), Ch. Durin (4)

(1) PRIME Verre, PAT du Millénaire Bât 10,1350 Avenue A. Einstein, Montpellier France.

(2) UMR Ecçols- IRD-PRAM, Le Lamentin, France.

(3) CNRS-Université de Montpellier 2, Montpellier, France

(4) CNES, Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse, France

## Liens

CNES :

<http://debris-spatiaux.cnes.fr/>

EU :

[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/Ground\\_Systems\\_Engineering/ESA\\_Space\\_Debris\\_Office](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Ground_Systems_Engineering/ESA_Space_Debris_Office)

US :

<http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/>