

# La non linéarité dans le domaine des satellites : problématiques industrielles, perspectives d'amélioration et compétitivité

08 Juin 2011

Template reference : 100182079N-EN

Telecommunications Business Unit

THALES

All rights reserved, 2007, Thales Alenia Space

## **Sommaire :**

- n **Introduction sur la non linéarité**
- n **Présentation sur les satellites**
- n **Validation des comportements fonctionnels et plans de développement**
- n **La présence de la non linéarité**
- n **Paramètres à considérer**
- n **Conclusion**

**Conceptions de structures confrontées fortuitement ou délibérément à des aspects de non linéarité**

**Prises en compte de la non linéarité dans les axes de compétitivité sur le plan industriel soit avec le souci de l'anticipation soit en la maîtrisant**

**Nombreuses sources de non linéarité dans les comportements structuraux (matériaux, liaisons, contacts, ...)**

**Jusqu'à présent, préférence marquée pour les approches linéaires tant pour les justifications par approche analytique que pour les validations par essais**

**Amélioration possible sur les conceptions de satellites avec l'utilisation de la non linéarité dans un but d'optimisation des performances tout en garantissant la fiabilité**

**Nécessité d'une analyse globale du processus avec le développement d'outils et de méthodes mais avec une remise en question des stratégies de validation sur les approches déterministes ou probabilistes**

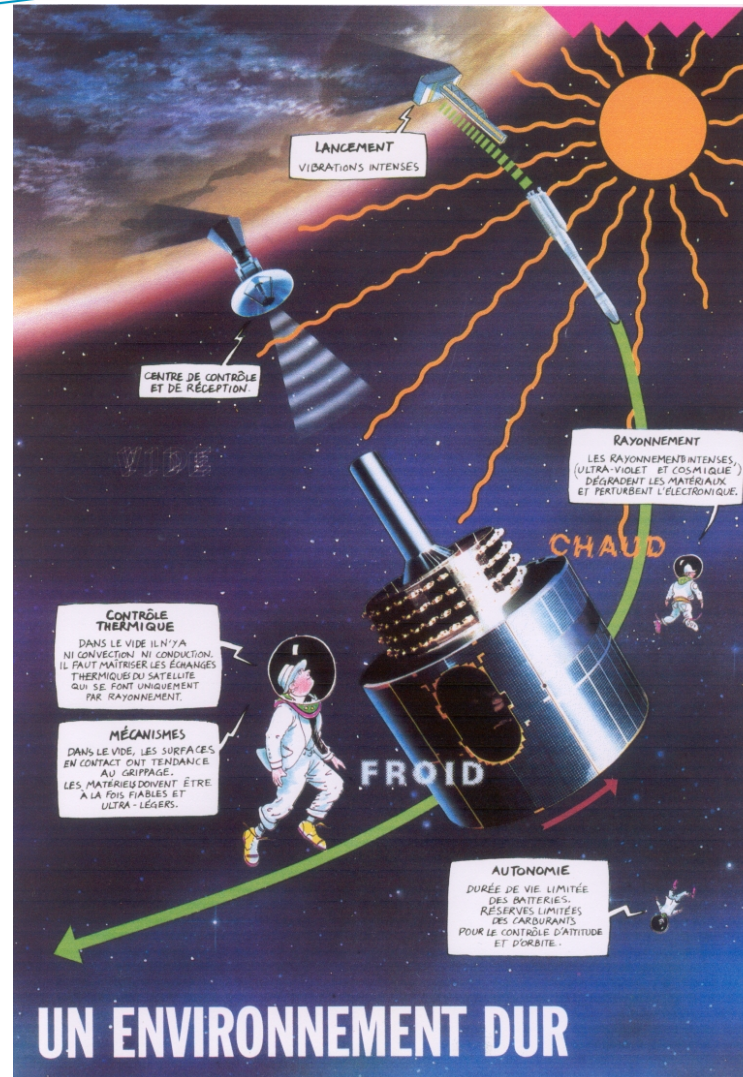
## Démonstration du caractère fonctionnel des structures de satellites avec prise en compte des sollicitations statiques, dynamiques

**Objectif recherché : optimisation technico financière où s'associent coût industriel, fiabilité et coût de la défaillance**

### Particularités du domaine spatial :

- **Importance de la fiabilité au travers du coût de la défaillance (fonctionnalité du satellite en configuration orbitale)**
- **Peu de notion de série, excepté sur des constellations**
- **Coût industriel de plus en plus important en comparaison avec le coût de la phase lancement**
- **Grosses difficultés de recréer par essai au sol les environnements de la phase lancement (représentativité du lanceur) et des phases orbitales (agressions complexes)**





**La validation passe par des justifications analytiques et/ou par des justifications par essais.**

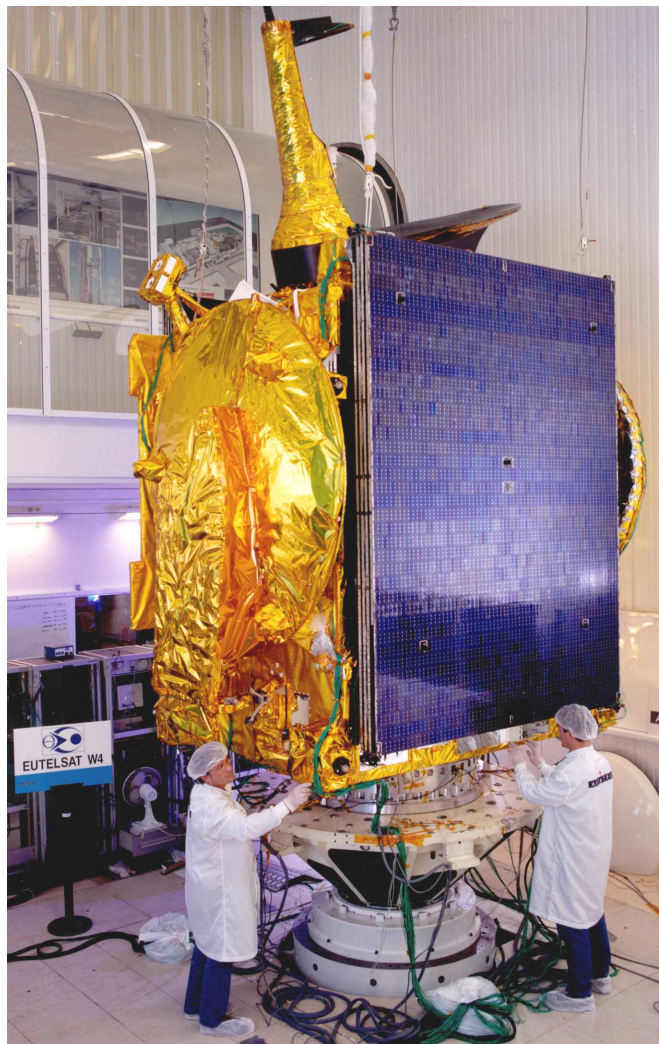
**Choix du plan de développement en prenant en compte :**

- **des considérations techniques incontournables**
- **des critères d'optimisation économique**
- **des décisions programmatiques de minimisation de risques**

**Mise en place de la notion de matrice de validation faisant apparaître pour chaque élément potentiellement sensible du satellite sa justification de validation du comportement fonctionnel**

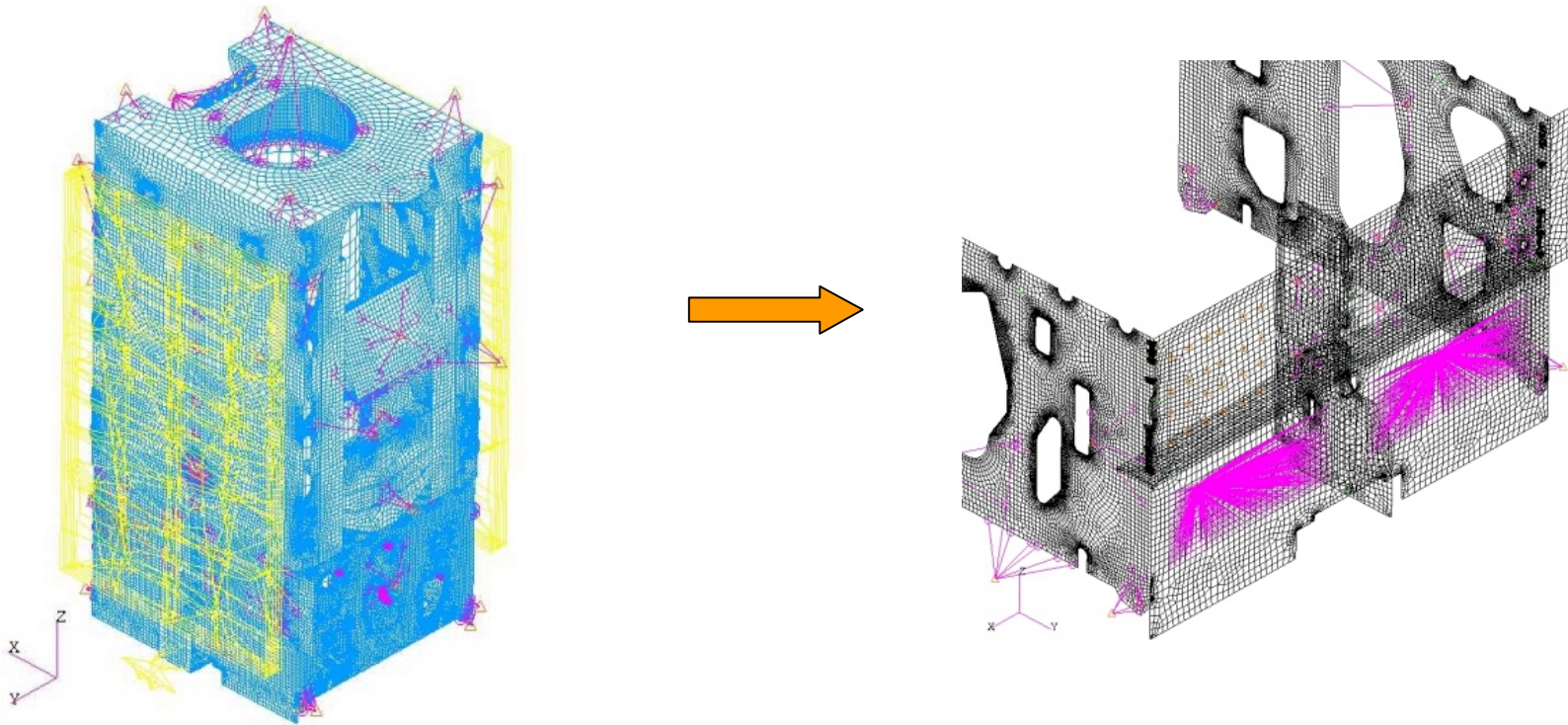
**Cette matrice permet d'optimiser le plan de développement par un choix judicieux de types d'essais, de configurations d'essais, de validations élémentaires ou systèmes, de retour d'expérience et d'analyses**

## Validation par essai :





## Validation par analyses :



**La validation du comportement repose souvent sur la notion d'EQM (Engineering Qualification Model).**

**Utilisation d'un spécimen sur lequel la totalité des agressions susceptibles d'être vues par un FM (Flight Model) est appliquée avant la vérification de sa fonctionnalité**

**Agressions complexes par leur nature (accélérations statiques, vibrations basse fréquence de type sinus, vibrations moyenne et haute fréquences de type aléatoire, chocs, environnement acoustique, thermoélastique, ...)**

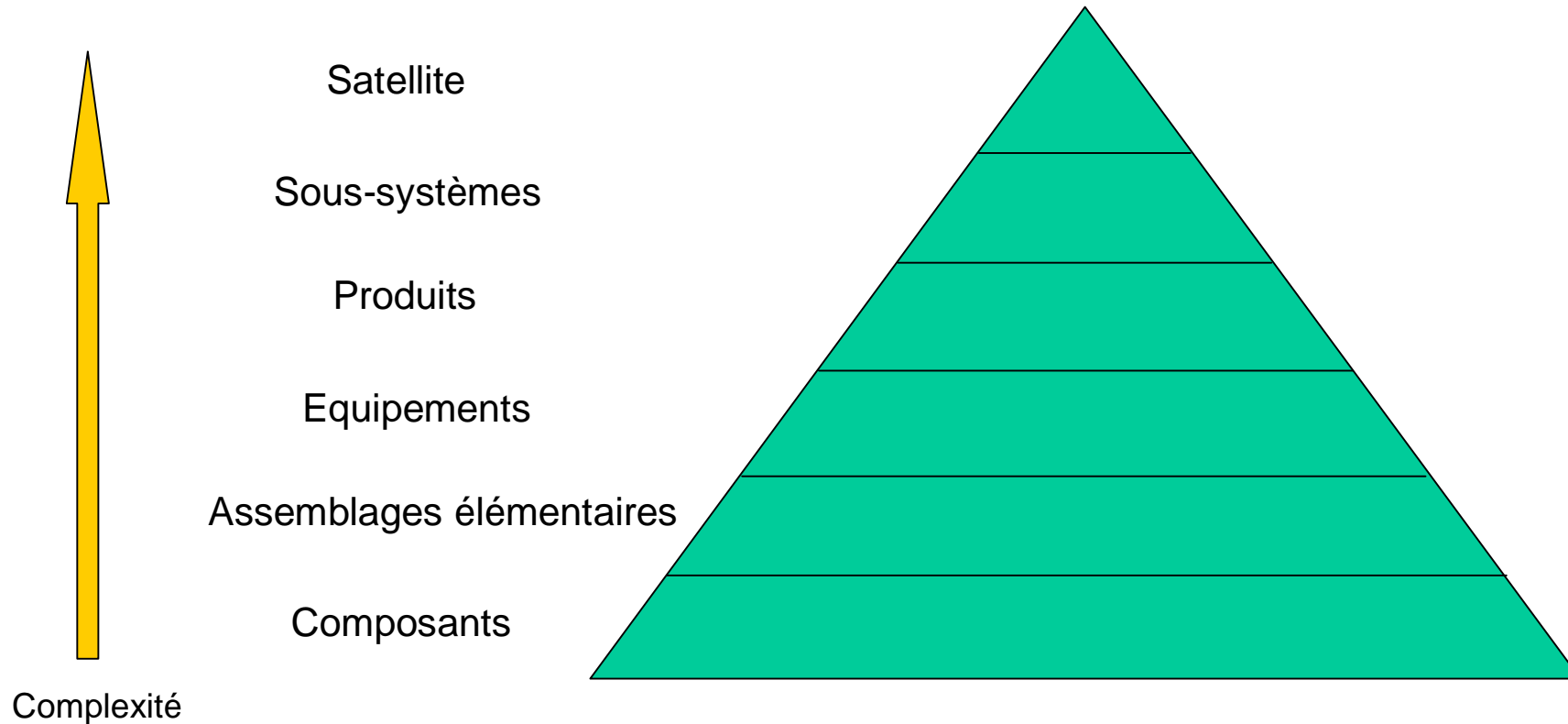
**Agressions complexes par leurs combinaisons au sens temporel (exemple d'une accélération statique combinée à des accélérations dynamiques) et au sens spatial (exemple d'une poussée longitudinale d'un lanceur combinée à des sollicitations latérales de type rafale)**

**La notion d'EQM (Engineering Qualification Model) doit prendre en compte la robustesse du concept ainsi que la répétabilité de ses caractéristiques dans une production de série industrielle**

**La notion de qualification est sensée couvrir les écarts de représentativité entre le modèle EQM sur lequel la validation est faite et les modèles de vol FM.**

**Le retour d'expérience et l'héritage industriel ont permis de bâtir des règles de l'art en la matière (coefficients sur les charges, niveaux supplémentaires, ...)**

**Mise en place d'une pyramide de validation par essais en associant à chaque niveau de complexité du produit une nécessité de fiabilité sur les performances**



**Principe d'une pyramide de validation par essais avec application sur EQM**



**La non linéarité existe de partout**

**Le principe actuellement retenu est dans la grande majorité des cas de représenter les comportements rencontrés en utilisant des approches linéaires**

**Répercussion sur le choix des conceptions, au niveau des matériaux utilisés, au niveau des systèmes de liaisons, au niveau des principes d'interfaces**

**L'idée était de s'imposer des solutions "simples" mais modélisables et testables au détriment de temps en temps de solutions plus performantes mais réputées "complexes" et non maîtrisées**

**Pourquoi une tendance à éviter la non linéarité ?**

- **difficulté d'aborder les problèmes sur le plan analytique (modélisations, outils, ...)**
- **méconnaissance et coût des caractéristiques élémentaires dans les analyses**
- **instrumentation et coût des essais de validation**
- **dans certains cas, forte dépendance des bilans de performances aux niveaux des agressions (profils des agressions dynamiques, températures, ...)**
- **réticence de la part des clients par rapport aux règles de l'art actuellement en vigueur**

## Impacts de la non linéarité “limitée”

**Dans la grande majorité des cas, recherche d’un comportement linéaire équivalent modélisable et “acceptable”**

### Exemples :

- **En règle générale, module de rigidité moyen entre traction et compression dans les analyses modales et critères de découplage fréquentiel**
- **Encastremets au droit de liaisons type cornières sous l’hypothèse de pressions de serrage suffisantes par rapport aux agressions de décollements**
- **Critères de non glissement différents au droit de liaisons vissées en fonction des objectifs à atteindre (glissement macroscopique en dynamique, glissement en thermo élastique, stabilité dimensionnelle avec objectifs de qualité optique)**
- **Acceptations du domaine plastique dans les problèmes de tenue mécanique en fonction des sollicitations et des zones incriminées**

## Impacts de la non linéarité “marquée”

**Difficultés d’accepter de tels comportements par rapport aux critères de performances et aux questions de durée de vie**

### Travaux effectués et travaux en cours :

- **Critères sur la détection de la non linéarité sur des comportements au niveau système (essais satellite)**
- **Localisation des sources de non linéarité (instrumentation)**
- **Compréhension du phénomène au niveau des paramètres influents par des analogies à des situations étudiées en amont (présences de contacts, lois de comportement non linéaires, ...)**
- **Recherche d’une équivalence en linéaire (méthodologies)**
- **Critères d’acceptation de la non linéarité en fonction des agressions et des durées de vie**

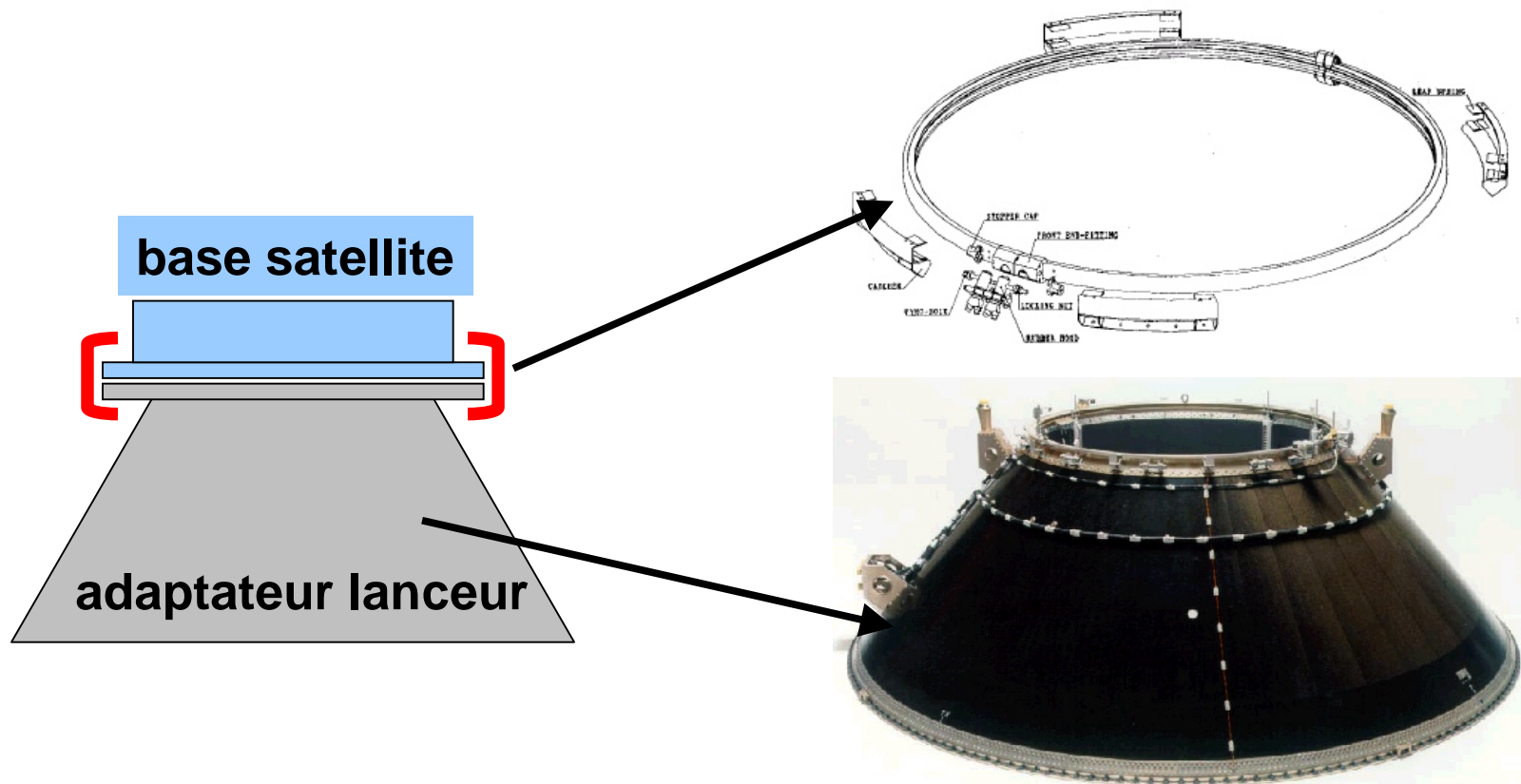
## Exemples de situations complexes :

### Exemple 1 :

**Liaison d'interface entre satellite et lanceur adoptant un principe de comportement différent en traction et en compression**

- **Difficultés de mise en place de spécifications de conditions aux limites par l'autorité lanceur vers le maître d'oeuvre satellite**
- **Difficultés de représentativité des systèmes de fixation lors de la réalisation d'essais statiques et d'essais dynamiques**
- **Impacts sur les performances de fréquences**
- **Impacts sur le mode de travail des éléments structuraux proches de l'interface (flexion locale)**

## Système de sanglage à l'interface lanceur/satellite :



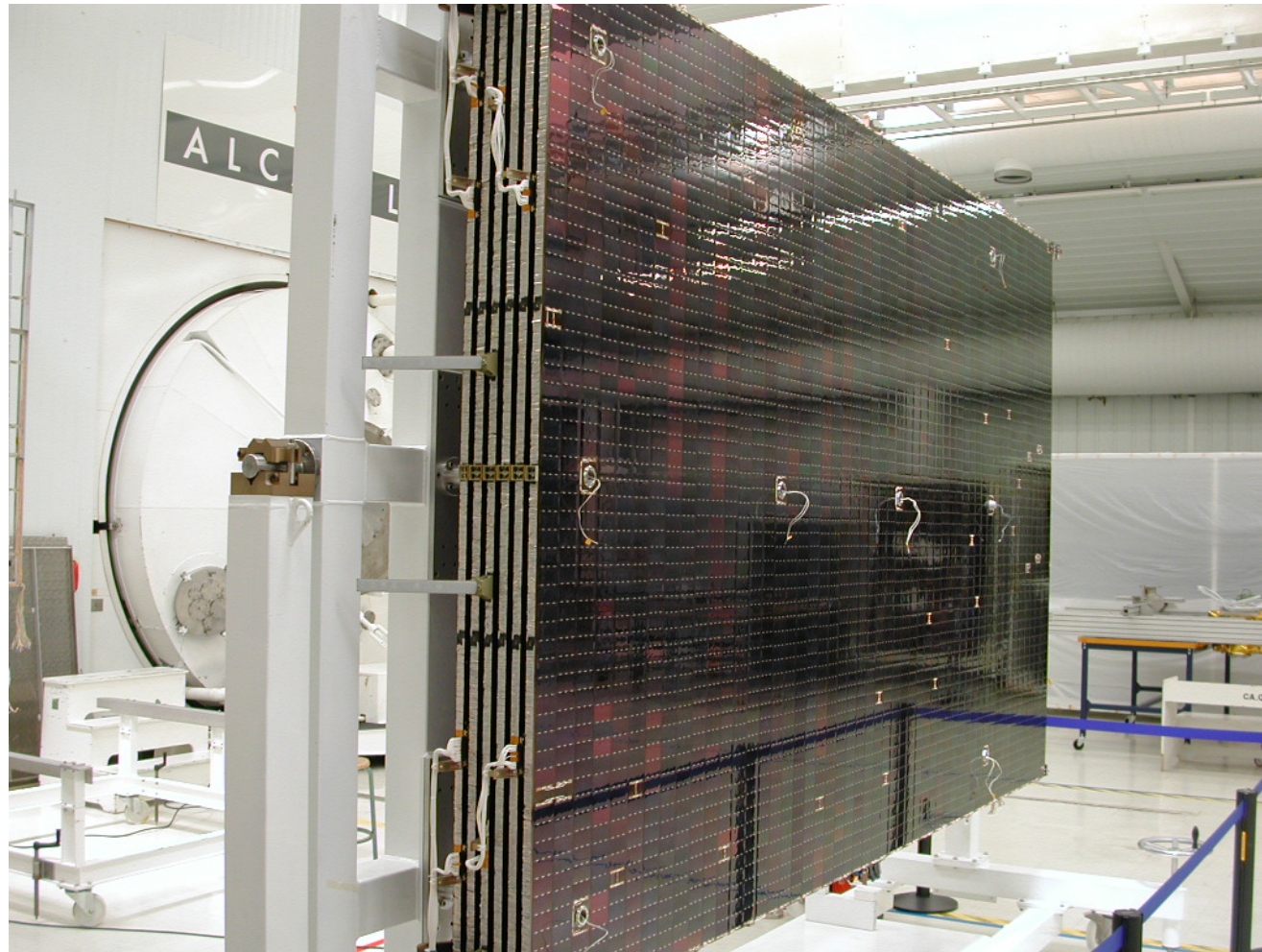
## Exemples de situations complexes :

### Exemple 2 :

**Cales d'interface entre volets de générateurs solaires soumis à des agressions dynamiques**

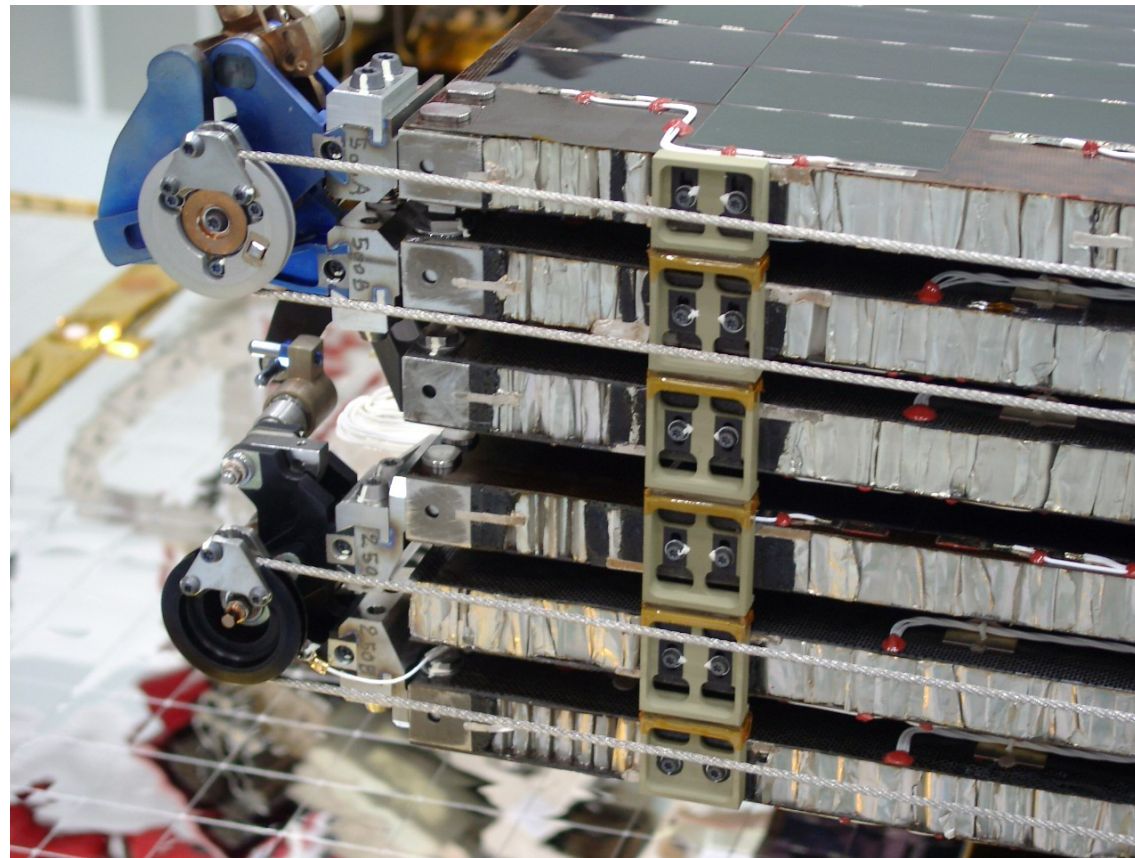
- **Comportements dynamiques très perturbés lors d'essais vibratoires (sinus et acoustiques) avec apparition de signaux "bruités"**
- **Rupture d'un élément de liaison (insert dans panneau nida) au droit d'une cale**
- **Difficultés de détermination des efforts induits par les agressions et difficultés de validation d'une approche fiable sur la tenue mécanique des éléments structuraux des générateurs solaires "flight model" des satellites à venir**







## Systeme de cale entre panneaux de Générateur Solaire :



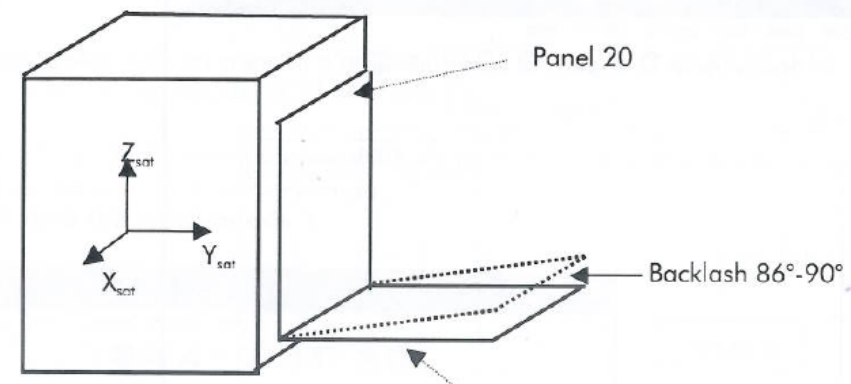
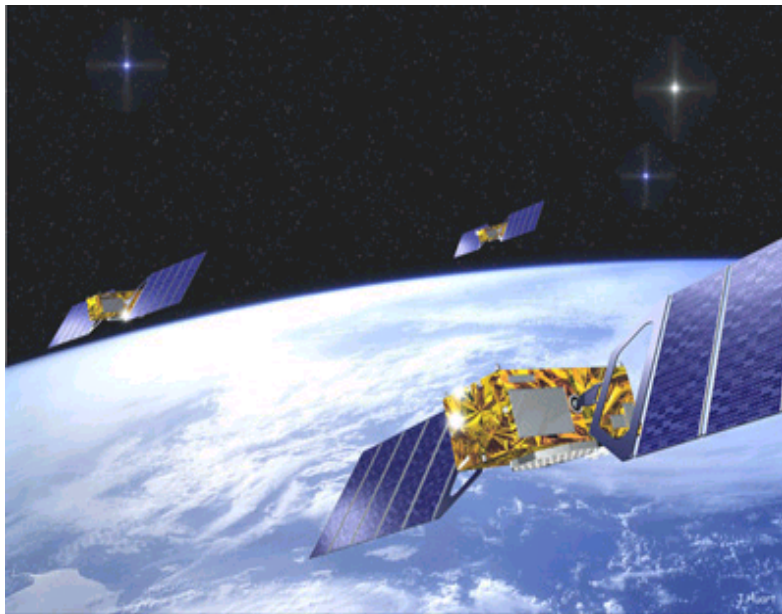
## Exemples de situations complexes :

### Exemple 3 :

#### Jeu fonctionnel au droit d'articulations de déploiement de volets de générateurs solaires

- Présence d'un jeu interne à une articulation avec une influence notable sur les caractéristiques fréquentielles d'une aile de GS en configuration de transfert
- Prise en compte de la différence au niveau des raideurs des articulations dans le jeu et en dehors du jeu
- Effet des caractéristiques modales sur le contrôle d'attitude du satellite et sur les performances de pilotage des manoeuvres orbitales (effet de backlash)
- Estimation des décalages de fréquence associés aux niveaux des agressions orbitales

## Générateur Solaire en configuration déployée :



**Impact sur les règles appliquées dans le processus de validation analytique, issues d'un héritage industriel dans lequel le comportement linéaire était présent**

**Exemple type : dimensionnement en tenue mécanique**

- **Hypothèses de modélisation avec des géométries aux dimensions nominales (épaisseurs, sections, inerties, ...)**
- **Hypothèses de caractéristiques matériaux avec des comportements moyens (module d'Young, coefficients de dilatation, ...)**
- **Valeurs admissibles de tenue en valeurs type A ou B (limites élastiques, limites rupture, ...)**
- **Hypothèses de conditions aux limites les plus représentatives de la réalité (encastremets, rotules, encastremets souples, ...)**
- **Coefficients de sécurité de dimensionnement déterministes (exemple : 1,25 pour matériaux métalliques)**

**Faut-il envisager une modification de ces règles en présence de comportements non linéaires ? Faut-il compléter les hypothèses de critères de validation ?**

**Impacts sur les règles appliquées dans le processus de validation par essai, issues d'un héritage industriel dans lequel le comportement linéaire était présent**

**Exemple type : qualification acquise sur 1 spécimen EQM sous accélérations sinus**

- **Hypothèses classiques de représentativité du spécimen choisi par rapport aux modèles de vol**
- **Agressions appliquées majorées par un coefficient de qualification 1,25 sous chargements vibratoires basse fréquence**

**Faut il envisager une modification de ces règles en présence de comportements non linéaires ? Faut il définir un critère de sélection sur le modèle EQM ou faut il envisager une démarche de validation sur plusieurs EQM ? Faut il imposer une majoration supplémentaire sur les agressions ?**

**Actuellement, confrontation à des comportements non linéaires plus ou moins faciles à aborder**

**Souci de simplification des approches sur le plan des validations qui se répercute sur une tendance à préférer un concept linéaire souvent désoptimisé au niveau des performances de premier abord**

**L'acceptation de la non linéarité passe par la nécessité d'un bilan technico économique complet avec prise en compte d'une analyse de risque associée faisant apparaître le coût de la solution proposée (gains associés par rapport aux solutions existantes), une notion de fiabilité (probabilité de défaillance) avec le coût induit**

**Solutions pertinentes sur certains concepts en cours d'étude, en utilisant des solutions délibérément innovantes, mais difficulté de bâtir une justification robuste vis à vis des plans de validation "classiques"**

**Structures de satellites très différentes sur le plan des validations par essais (notion de complexité et de validation par EQM). Envisageable sur structures secondaires, délicat sur structures primaires**