



Journée Math-Industrie

Optimisation et autres aspects mathématiques liés à la conception de systèmes spatiaux

Aéronautique et Espace

9 juin 2006

Institut Mathématiques de Toulouse

Université Paul Sabatier

EADS SPACE : filiale à 100% d'EADS



EADS

Airbus



**Military
Transport
Aircraft**



Eurocopter



**EADS
SPACE**



**Defence
& Security
Systems**



EADS Astrium : une des trois sociétés principales d'EADS SPACE

EADS SPACE

EADS SPACE Transportation

Spécialiste européen du transport spatial et des systèmes orbitaux



EADS Astrium

Un des leaders mondiaux de la conception et de la fabrication de systèmes de satellites



EADS SPACE Services

Services par satellites dans le domaine des communications sécurisées et de la navigation



Les sites d'EADS SPACE*



* Sites d'EADS Astrium en jaune

EADS Astrium

L'un des leaders mondiaux dans la conception et la fabrication de systèmes de satellites

Observation de la Terre, Navigation et Science



Systèmes de Communications Militaires



Satellites de télécommunications



Sous-systèmes, Équipements et Opérations

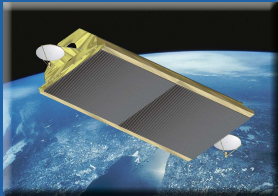


Effectifs : 6.770
Chiffre d'affaires 2005 : 1,77 Md €
Président & CEO : Antoine Bouvier

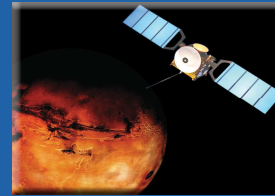


Solutions spatiales pour la vie sur Terre

Dans une industrie spatiale en cours d'évolution, EADS Astrium s'engage à anticiper les attentes de ses clients et à construire des solutions appropriées.



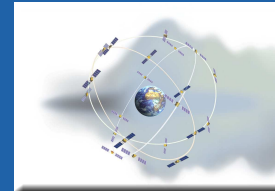
Observation de la Terre



Sciences spatiales



Télécommunications



Navigation



Systèmes militaires



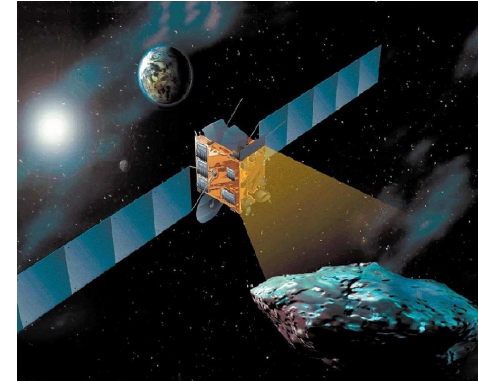
Équipements et sous-systèmes

L'espace est au cœur de la vie quotidienne

Les grandes problématiques au niveau satellite

- **Conception et optimisation du système, de ses opérations, de ses chaînes fonctionnelles:**
 - Optimisation des performances système (analyse mission, orbite, précision de pointage, qualité image, etc)
 - Mise en orbite et opérations (maintien d'orbite, plan de mission, etc)
 - Optimisation de la structure (masse = ennemi n°1)
 - Optimisation des aspects thermiques (pas de conduction, environnement très chaud ou très froid)
 - Optimisation des algorithmes embarqués (temps de calcul, robustesse)

→ **l'optimisation est au coeur de nos métiers**



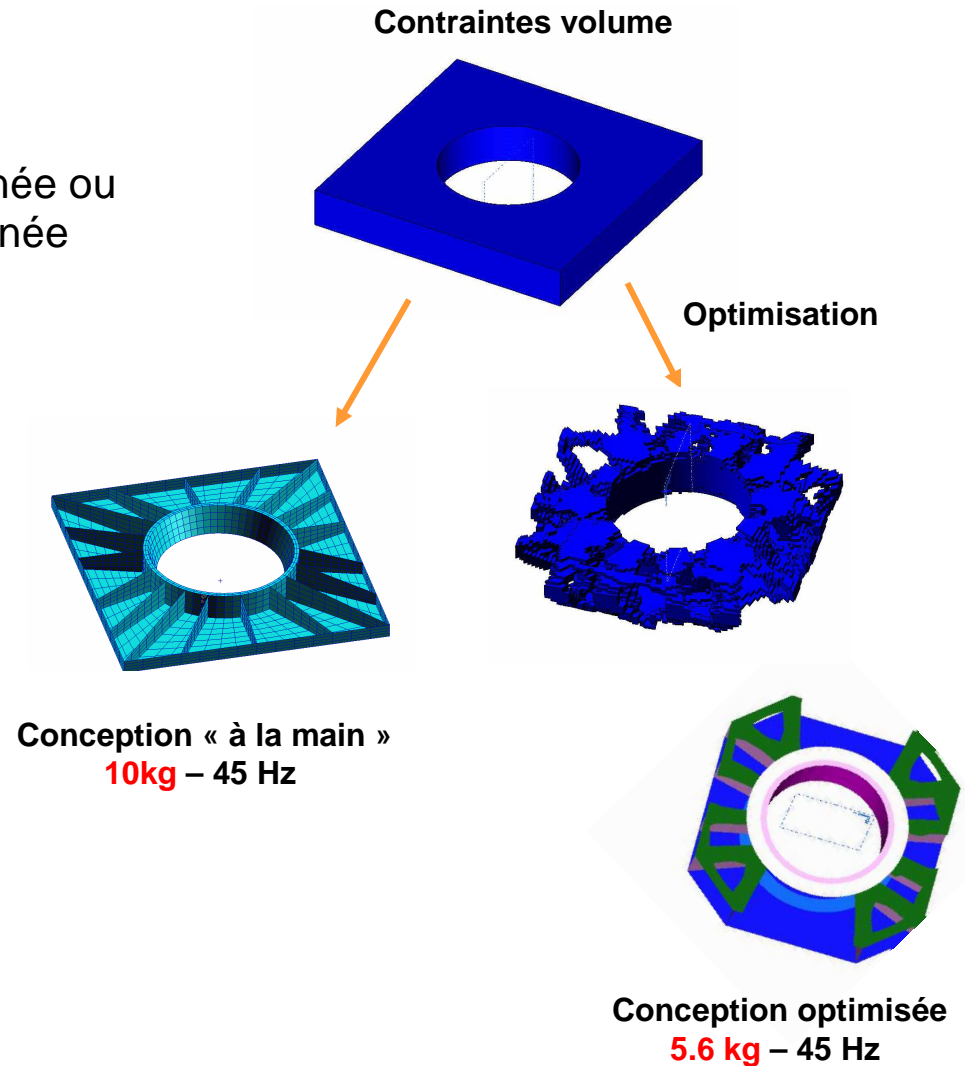
L'optimisation en phase de conception



- **Des problématiques d'optimisation très variées:**
 - Systèmes déterministes / stochastiques
 - Paramètres statiques / dynamiques
 - Contraintes analytiques / non analytiques
- **Les enjeux:**
 - Bien formuler le problème d'optimisation par rapport à la technique d'optimisation utilisée
 - Utiliser des moteurs d'optimisation adaptés et efficaces
 - Trouver le bon point de départ, éviter les minima locaux
 - Aboutir à une solution acceptable en des temps raisonnables
- **Quelques exemples d'optimisation:**
 - Éléments structuraux (masse versus rigidité)
 - Orbites (minimisation de la consommation d'ergols)
 - Hybridation de mesures, filtrage optimal
 - Contrôle et guidage optimal
 - Algorithmes de traitement d'images

Conception d'éléments structuraux

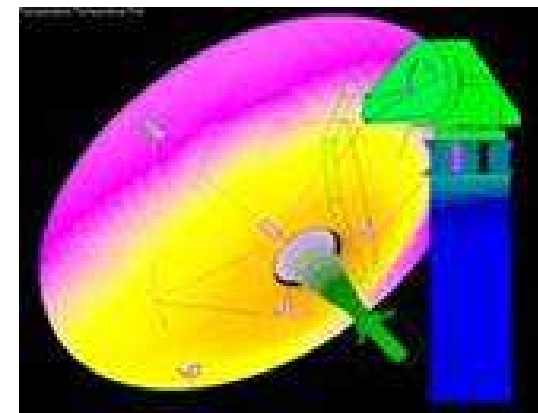
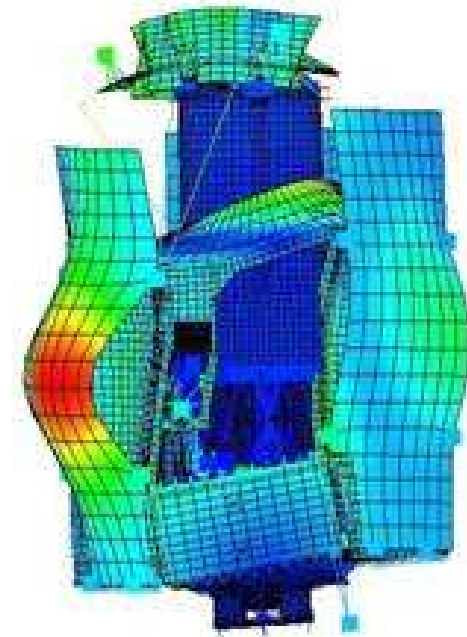
- **Les enjeux:**
 - Minimiser la masse à rigidité donnée ou maximiser la rigidité à masse donnée
- **Critère à optimiser:**
 - Masse ou rigidité (première fréquence propre)
- **Contraintes:**
 - Rigidité ou masse
 - Géométrie, volume
 - Contraintes de fabricabilité
 - Zones d'interface



Modélisation méca-thermique



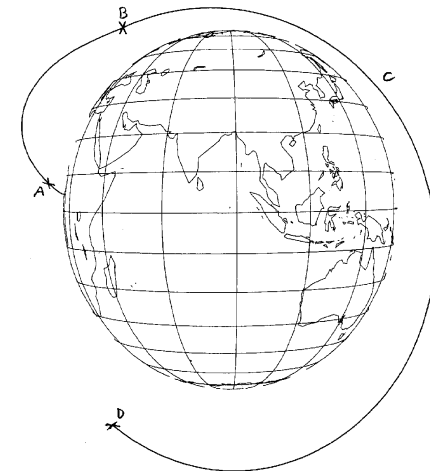
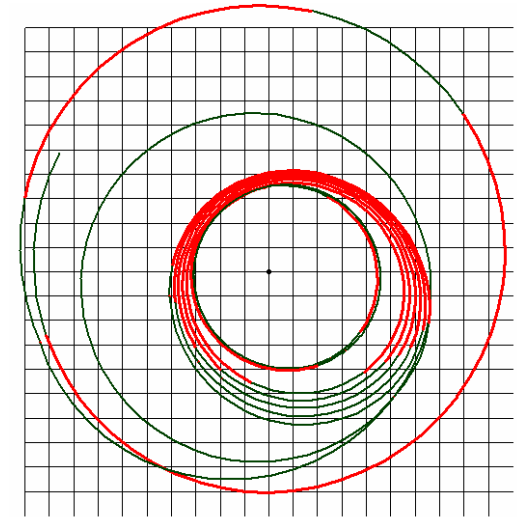
- **Les enjeux:**
 - Prédire le comportement en orbite dans tous les cas de fonctionnement
 - S'engager sur des performances système
 - Minimiser la durée des essais au sol
- **Les problématiques d'optimisation:**
 - Recalage de modèles mécaniques ou thermiques complexes (quelques centaines à quelques milliers de paramètres)
 - Réduction ou concaténation de modèles
 - Analyse de robustesse de la conception (par rapport à des critères qui peuvent être complexes: déformations thermo-élastiques, qualité optique ou RF)
- **Problématiques:**
 - De nombreux minima locaux → optimisation stochastique (génétique, etc)
 - Robustesse / sensibilité du modèle
 - Localisation des erreurs de modèles



Optimisation de trajectoires



- **Les enjeux:**
 - Minimiser la masse de carburant à embarquer (1 kilo en orbite terrestre = 15 000 \$)
 - Minimiser la durée de transfert sur l'orbite de travail
- **Exemple de sujets complexes:**
 - Trajectoires de missions interplanétaire
 - Trajectoires atmosphériques (lancement, ré-entrée) et atterrissage
- **Le problème d'optimisation:**
 - Critère: la consommation totale de carburant
 - Contraintes initiales (ex: orbite d'injection par le lanceur), le long de la trajectoire (pression dynamique, flux thermique, variation max des paramètres de contrôle; etc), finales (orbite d'arrivée, site d'atterrissage, ...)
 - Paramètres de contrôle: direction et modulation de la poussée, manoeuvres de "gravity assist", angles d'inclinaison du bouclier de ré-entrée
- **Quelques difficultés:**
 - "Initial guess" (segmentation spatiale et temporelle de la trajectoire)
 - Combinatoire des possibilités (exemple: phases ballistiques, faible poussée, gravity assist pour une mission interplanétaire)
 - Conditionnement numérique, qualité de la convergence, etc



Optimisation de lois de contrôle d'attitude et d'orbite



- **Enjeux:**

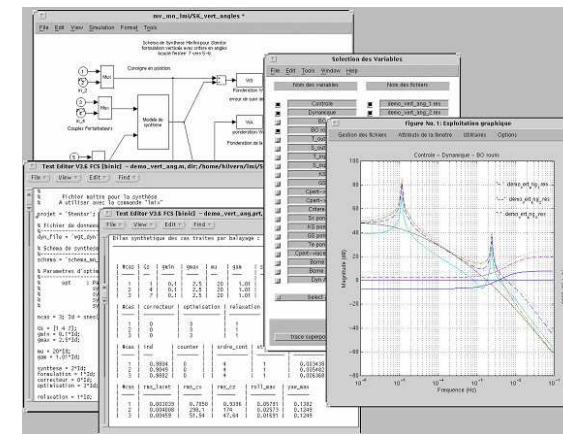
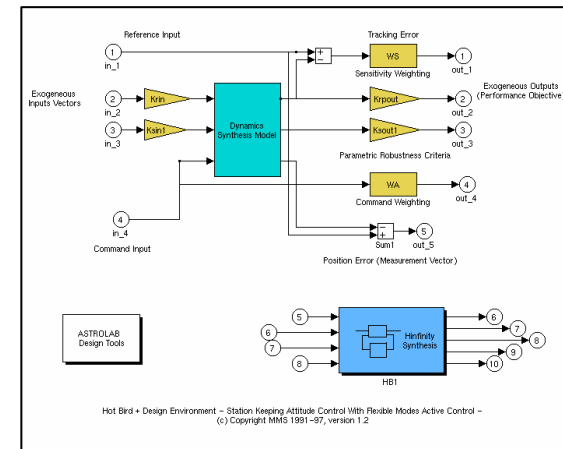
- Performances système (précision et stabilité de pointage, parfois une fraction d'arc seconde)
- Robustesse par rapport à un environnement incertain et des erreurs de modélisation

- **Problèmes d'optimisation en Automatique:**

- Plusieurs types de critères: fréquentiel H-infini (robustesse), fréquentiel H2 (transmission des bruits), temporel (transitoires) → approches multi-critères, techniques Hinf/H2, LMI
- Robustesse à des variations paramétriques (masse, inertie, centrage, modes souples, etc) → techniques LPV, Analyse Pire Cas
- Compromis robustesse versus performances

- **Besoin de moteurs d'optimisation et de boîtes à outil mathématiques:**

- Développement de la boîte à outils freeware Scilab



Quelques autres problèmes mathématiques



- **Configuration tuyères:**

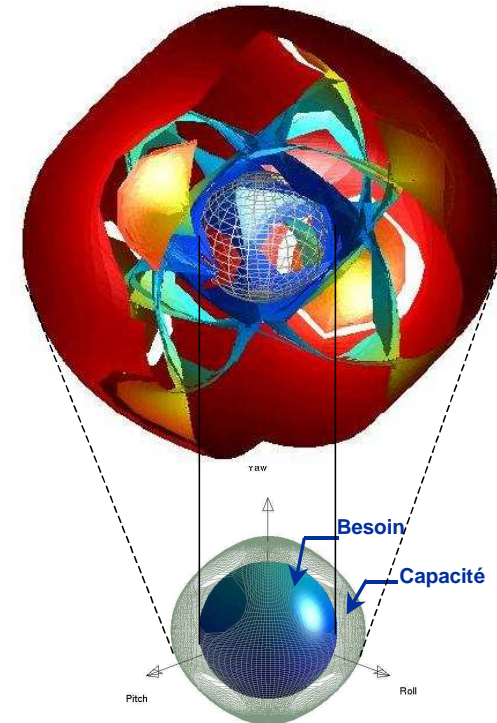
- Positionner au mieux N tuyères délivrant des forces constantes pour créer des forces et couples selon les trois axes du satellite (avec gestion des redondances en cas de pannes)
- Pour une demande en forces et couples de contrôle à imprimer au satellite, sélectionner les tuyères à ouvrir afin de minimiser la consommation (l'algorithme doit être embarquable)

- **Guidage de grappe d'actionneurs gyroscopiques:**

- Un actionneur gyroscopique (AG) est une toupie de moment cinétique H fixe montée sur un axe cardan perpendiculaire à H
- En tournant l'axe cardan, on crée un couple sur le satellite $\omega \times H$ où ω est la vitesse de rotation du cardan
- Etant une configuration à N AG (dont la géométrie est à optimiser en fonction des besoins mission), il s'agit de calculer pour tout mouvement de rotation à imprimer au satellite, le profil de vitesse cardan permettant de réaliser ce mouvement en évitant les singularités de la grappe d'AG (ce problème n'est pas résolu dans le cas général)

- **Traitement du signal:**

- Filtrage optimal, hybridation de mesures
- Traitements d'image (qualité image, extraction d'informations)
- Compression embarquée (ondelettes)
- Cryptage



Enveloppe des singularités

Conclusions



- **L'activité de conception industrielle est un mélange de savoir-faire et de méthodologies nécessitant une bonne maîtrise de différents domaines:**
 - Physique des phénomènes
 - Approche industrielle (bien cerner les contraintes et bien poser le problème en le simplifiant au maximum)
 - Mathématiques pour la formulation et la résolution des problèmes
- **Cette activité aboutit généralement à des problèmes d'optimisation variés et parfois très complexes**
- **L'industriel a besoin de guides méthodologiques et de bons outils d'optimisation pour être efficace**