



**Centres de Compétence Technique
Automatique et Pilotage
et
Mécanique des Fluides**



Modélisation et commande des fluides ballottants

Vendredi 4 avril 9 H - 16 H 30

CNES, Centre Spatial de Toulouse, Bâtiment Léonard de Vinci

Programme

9H 30 10 H Le programme de recherche et technologie COMPERE

BRUNO VIEILLE CNES DLA

10H – 10H 30 Modélisation des ballottements d'ergols pour le contrôle de vol ARIANE5

BENOIT CLEMENT CNES DLA

10H 30 11H Pause

11H - 11H 30 Propellant handling for upper stages, satellites and transfer vehicles

K. P. BEHRUZI ASTRIUM GMBH POSTFACH 28361 BREMEN

11H 30 12H Contrôle d'attitude de satellite en présence de ballottements

PHILIPPE LAURENS ASTRIUM

**12 H 12 H 30 BALLOTTEMENT DES ERGOLS DANS LES RESERVOIRS ET CONDITIONS
DE BRISURE D'INTERFACES**

E.J. HOPFINGER LEGI, B.P. 53, 38041 GRENOBLE CEDEX

14H - 14H 30 Ballottements d'ergols pendant la phase balistique A5ECA

SILVIA CASALINO CNES DLA

14H 30 15H Les problématiques thermodynamiques dans les réservoirs cryogéniques

JEROME LACAPERE AIR LIQUIDE - DIVISION DES TECHNIQUES AVANCEES

15 H 15H 30 Simulations de "ballottements" Ariane5 avec charge utile et sur l'ATV.

DANIEL FIOT EADS-LV

15H 30 16H Modélisation des ballottements de fluide dans les réservoirs satellites.

LAURENT OUNOUGHASTRIUM

16H 16H 30 Table ronde et conclusions

Contacts: Jean MIGNOT. ☎ : 05 61 28 18 77 , email : jean.mignot@cnes.fr

Bernard ZAPPOLI. ☎ : 05 61 27 44 68 , email : bernard.zappoli@cnes.fr



**Centres de Compétence Technique
Automatique et Pilotage
et
Mécanique des Fluides**



Résumés des présentations :

9H 30 10 H Le programme de recherche et technologie COMPERE

BRUNO VIEILLE CNES DLA

Le programme de recherche et technologie COMPERE a pour objet d'améliorer la connaissance du comportement des ergols dans les réservoirs. Il a été initié par le CNES en 1999. Il regroupe différents partenaires européens industriels (AIR LIQUIDE, ASTRIUM, CRYOSPACE, EADS-LV) et institutionnels (CNRS, DLR, ONERA, ZARM). Son objectif est de comprendre et de modéliser les phénomènes physiques intervenant dans un réservoir tout au long de la mission d'un lanceur afin de déterminer :

- la position des ergols dans les réservoirs
- la pression et la température des fluides dans les réservoirs
- les efforts générés par le mouvement d'ergols sur les structures
- les masses d'ergols inconsommables.

Ainsi, nous devons être capables de traiter notamment les aspects de rallumage du moteur suite à une phase balistique, fondement de la versatilité indispensable aujourd'hui à Ariane 5.

Nous donnerons les grandes lignes du programme et des activités scientifiques réalisées au sein de COMPERE pour comprendre les phénomènes physiques mis en jeu.

**10H – 10H 30 Modélisation des ballottements d'ergols pour le contrôle de vol
ARIANE5**

BENOIT CLEMENT

CNES DLA

Dans les réservoirs d'un lanceur et de ses charges utiles, les ergols liquides peuvent représenter des fractions très importantes de la masse totale ; ainsi la connaissance de leur comportement en vol et de la manière dont ils réagiront aux sollicitations transmises par les parois des réservoirs est nécessaire afin de ne pas déstabiliser le contrôle de vol et de garantir le bon dimensionnement des étages. De manière classique, les études système des lanceurs ARIANE dans les phases soumises à des accélérations importantes, modélisent ces phénomènes par une analogie mécanique à un pendule. Cette modélisation simple permet de réaliser des simulations prenant en compte les interactions entre le contrôle de vol et les ballottements pour la validation du comportement des algorithmes GNC du lanceur. Certaines configurations de lanceurs liées à des charges utiles particulières ont conduit aux limites de validité des modèles pendulaires et par conséquent à des simulations non représentatives. Ces cas nous ont amené à nous poser les questions de modélisation et à étudier le conservatisme induit ou pas par les simplifications utilisées. Certaines des configurations étudiées entraînent des divergences au niveau des angles des pendules. Ceci est dû à des couplages entre les différents pendules et les instabilités induites apparaissent en boucle ouverte.

Contacts: Jean MIGNOT. ☎ : 05 61 28 18 77 , email : jean.mignot@cnes.fr

Bernard ZAPPOLI. ☎ : 05 61 27 44 68 , email : bernard.zappoli@cnes.fr



**Centres de Compétence Technique
Automatique et Pilotage
et
Mécanique des Fluides**



Afin de montrer que ces instabilités n'étaient pas physiques mais intrinsèquement liées à la modélisation, des études de mécanique des fluides utilisant le code de calcul FLOW3D ont été menées sur les configurations dites « instables ». Ainsi, ces études ont permis de montrer que les modèles pendulaires sont conservatifs quant aux efforts appliqués sur les parois des réservoirs par les liquides et ont permis de dédouaner les effets des ballottements pour la qualification du contrôle de vol A5 pour ces configurations de charges utiles particulières.

10H 30 11H Pause

11H - 11H 30 Propellant handling for upper stages, satellites and transfer vehicles

K. P. BEHRUZI ASTRIUM GMBH POSTFACH 28361 BREMEN

The scope of the presentation is to give an overview of the ASTRIUM activities in the frame of propellant handling.

At first past activities concerning missions such as EPS-V, ESC-A, ESC-B, ATV and the developments of Propellant Management Devices (PMDs) for satellite propellant tanks will be briefly mentioned. A classification of the different designs will be given.

The second part of the presentation shows exemplarily selected results of analysis which have been carried out with respect to the above missions (e.g. sloshing analysis, re-orientation analysis, analysis of the μg behavior of the tanks). The tools used to carry out the analysis will be described.

The third part of the presentation is dedicated to the future developments with respect to propellant handling. One major goal is the development of PMDs for cryogenic propellants usable for future upper stages such as ESC-B or upper stages of re-usable launchers (e.g. for the ASTRA project). First results of recent analysis will be presented.

11H 30 12H Contrôle d'attitude de satellite en présence de ballottements

PHILIPPE LAURENS ASTRIUM

Cet exposé adresse de façon générale les problèmes de ballottement traités par le système de contrôle d'attitude satellite pour diverses missions. Plus particulièrement, les phases critiques ainsi que la formalisation du problème et les solutions mises en œuvre seront illustrées.

12 H 12 H 30 BALLOTTEMENT DES ERGOLS DANS LES RESERVOIRS ET CONDITIONS DE BRISURE D'INTERFACES

E.J. HOPFINGER LEGI, B.P. 53, 38041 GRENOBLE CEDEX

Le ballottement des ergols dans les réservoirs est un problème qui a reçu beaucoup d'attention lors du développement des vols spatiaux (Abramson, 1966). Au voisinage des fréquences de résonance (ou en microgravité) le ballottement peut rapidement atteindre des grandes amplitudes et la surface liquide se brise en gouttes.

Contacts: Jean MIGNOT. ☎ : 05 61 28 18 77 , email : jean.mignot@cnes.fr

Bernard ZAPPOLI. ☎ : 05 61 27 44 68 , email : bernard.zappoli@cnes.fr



**Centres de Compétence Technique
Automatique et Pilotage
et
Mécanique des Fluides**



Les différents modes du mouvement et de déstabilisation de l'interface liquide/gaz seront illustrés par des expériences faites dans un récipient cylindrique monté sur une table oscillante. On observe que dans le cas du mode de ballonnement asymétrique¹ la déstabilisation de la surface libre passe par la formation d'un film liquide sur la paroi et ce film donne ensuite naissance à des ligaments, par instabilité Rayleigh-Taylor, puis à des gouttes par instabilité Rayleigh. Un forçage à la fréquence de résonance du mode 2, peut conduire à la formation d'un geyser avec des ligaments à son extrémité. Au voisinage de la fréquence de résonance du mode 1 un mouvement de ballonnement rotatif apparaît pour certaines valeurs de la fréquence ou, pour une fréquence donnée, au-delà d'une certaine amplitude. L'amortissement de ces mouvements sera également discuté.

Lorsque le récipient est soumis à un forçage à plus haute fréquence (vibrations de pulsation $> 25 \text{ rad s}^{-1}$ pour l'eau) les crêtes des ondes capillaires produisent des ligaments qui se brisent en gouttes. Ces ligaments sont manifestes lorsque l'accélération du récipient dépasse une valeur critique.

14H - 14H 30 Ballottements d'ergols pendant la phase balistique A5ECA

SILVIA CASALINO

CNES DLA

Les exploitations des vols Ariane 4 pendant les phases balistiques ont clairement mis en évidence l'existence de mouvements d'ergols générant des perturbations sur le lanceur. Celles-ci n'avaient pas été caractérisées pendant les études de développement, seul un couple perturbateur fixe avait été pris en compte. De plus, à ces efforts s'ajoute le risque d'ingestion d'ergol liquide dans les lignes de pressurisation LOX et LH2, en raison des culots d'ergols dans les réservoirs (inconsommables + réserve de performance). Pour Ariane 5 Plus, étant données la nouvelle géométrie des réservoirs (LH2 essentiellement) et la diminution d'efficacité du système propulsif, il a été décidé de caractériser plus finement les perturbations induites par ces ballottements avant le vol. Ainsi, deux analyses utilisant des codes de calcul d'hydrodynamique (Fluent et Flow3D) ont été menées en parallèle chez SENER Ingenieria y Sistemas et ASTRIUM Brème. Ces études ont permis de visualiser la position des ergols pendant la phase balistique et de déterminer les forces s'appliquant au centre de gravité du liquide en mouvement. De ces données nous avons déduit les perturbations prévisibles sur le pilotage. Afin de valider le scénario de la phase balistique, il est nécessaire de procéder par étapes successives : - étudier une séquence de manœuvres SCA pour la mise à poste des satellites ; - en déduire les accélérations induites sur le lanceur par le système de contrôle d'attitude ; - injecter ces accélérations dans un simulateur spécifique, tel que Fluent ou Flow3D, pour caractériser les efforts dus aux ballottements ; - ajouter ces efforts à la dynamique du lanceur ; - optimiser la séquence SCA du point de vue des précisions aux largages, des consommations, etc. Cette présentation fait le point sur les études menées. Nous décrivons les grandes lignes des prochains travaux qui vont permettre de créer un protocole d'interface plus rapide, mais toujours en boucle ouverte, entre le simulateur des phases balistiques (Simusca) et le logiciel Fluent. En conclusion,

Contacts: Jean MIGNOT. ☎ : 05 61 28 18 77 , email : jean.mignot@cnes.fr

Bernard ZAPPOLI. ☎ : 05 61 27 44 68 , email : bernard.zappoli@cnes.fr



**Centres de Compétence Technique
Automatique et Pilotage
et
Mécanique des Fluides**



après avoir mis en évidence les difficultés liées au couplage des deux simulateurs (dynamique lanceur et ballottements), nous nous poserons la question de l'intérêt et de la faisabilité d'une modélisation simplifiée des ballottements d'ergols en phase balistique.

14H 30 15H Les problématiques thermodynamiques dans les réservoirs cryogéniques

JEROME LACAPERE

AIR LIQUIDE - DIVISION DES TECHNIQUES AVANCEES

Même avec des isolations externes très efficaces, les entrées thermiques dans les réservoirs cryogéniques sont loin d'être négligeables et réchauffent le liquide. De même, on peut assister lors de la pressurisation du réservoir à un réchauffement du liquide près de la surface libre à cause de la condensation d'une partie du dôme gazeux.

La connaissance précise de la stratification thermique du liquide dans le réservoir pendant les phases sols (remplissage/complément de plein/pressurisation) et durant les vols propulsés et non-propulsés est primordiale pour estimer les résiduels thermiques (liquide trop chaud pour être absorbé dans la turbopompe sans risque de cavitation). Cette connaissance des résiduels thermiques permet de connaître la masse de liquide inconsommable (masse de liquide qui ne sera jamais utilisée).

Aujourd'hui, pour une meilleure connaissance de ces résiduels thermiques et en vue de nouvelles applications spatiales avec réallumage en micro-gravité, on s'oriente de plus en plus vers la modélisation numérique des phénomènes thermodynamiques prenant naissance dans les réservoirs cryogéniques.

On présentera ici quelques applications pour lesquelles on souhaite développer des capacités en calcul numérique.

15 H 15H 30 Simulations de "ballottements" Ariane5 avec charge utile et sur l'ATV.

DANIEL FIOT

EADS-LV

EADS-LV a acquis un savoir faire dans la simulation de mécanique des fluides à l'aide du logiciel Flow3D depuis une bonne dizaine d'années.

Les bonnes relations avec le concepteur (Flowscience) ont permis, du côté EADS-LV, d'acquérir une bonne maîtrise du code et, du côté développeur, d'aboutir à des évolutions du code adaptées au domaine spatial.

Ces évolutions sont:

- ❖ le couplage mécanique avec le reste du véhicule (cinématique globale),
- ❖ la prise en compte des efforts dus au pilotage du véhicule avec notamment la possibilité d'intégrer un module pilotage dans la simulation.

Les simulations réalisées permettent d'appréhender les mouvements des ergols notamment sous les aspects :

- ❖ torseur d'efforts et déplacement du centre de gravité : impact sur le contrôle de Vol du véhicule sous l'aspect pilotage (définition de modèle synthétiques; définition d'un besoin éventuel d'anti-ballottants;...), mais aussi structural.

Contacts: Jean MIGNOT. ☎ : 05 61 28 18 77 , email : jean.mignot@cnes.fr

Bernard ZAPPOLI. ☎ : 05 61 27 44 68 , email : bernard.zappoli@cnes.fr



**Centres de Compétence Technique
Automatique et Pilotage
et
Mécanique des Fluides**



- ❖ obstructions possibles des conduits de dégazage,
- ❖ risque d'ingestion de gaz dans les tuyauteries d'alimentation moteurs,
- ❖ aspects thermiques.

Les cas d'application ont principalement porté sur les ballottements d'ergols dans les réservoirs des véhicules Ariane 5 et ATV. L'exemple de simulation d'un cas de couplage EPS-V + charge utile sera présenté plus en détail.

15H 30 16H Modélisation des ballottements de fluide dans les réservoirs satellites.

LAURENT OUNOUGHHA ASTRIMUM

Cette présentation s'intéresse à la problématique sloshing et à ses caractéristiques différentes au sol et en vol. Nous détaillerons l'analyse des régimes de l'écoulement et ses différents modes (gravitaire, capillaire, ...).

Nous aborderons ensuite le problème du couplage entre le fluide, la structure et l'ADCS.

Au sujet de la modélisation des ballottements nous nous livrerons à une analyse critique de la modélisation analytique par analogie pendulaire.

Enfin un aperçu sera donné sur les outils de simulation numérique utilisés.(surface evolver, Flow3D, Fabe & Nastran).

Les derniers résultats sur design réservoir EUR3000 LX. Serviront d'illustration à cet exposé.

16H 16H 30 Table ronde et conclusions

L'inter validation des outils de modélisation et de synthèse des lois de commande.

L'expérimentation au sol et en vol est-elle indispensable ?

Quels sont les axes de travail pertinents dans le domaine ?

Contacts: Jean MIGNOT. ☎ : 05 61 28 18 77 , email : jean.mignot@cnes.fr

Bernard ZAPPOLI. ☎ : 05 61 27 44 68 , email : bernard.zappoli@cnes.fr