3AF
Association Aéronautique
Astronautique de France

la Lettre

N° 6
JUIN 2007

Editorial

La propulsion électrique dans l'espace[1]

Proposée pour la première fois en 1905, la propulsion électrique est aujourd'hui une technologie en grande partie maîtrisée. Le récent succès de la mission Smart-1 montre que, parmi les concepts proposés, l'utilisation de la propulsion par source à effet Hall est devenue une réalité pour les missions interplanétaires.

La mission européenne Smart-1

Petite sonde de 370 kg, équipée d'un ensemble de moyens de diagnostics pour étudier la géographie et la géochimie lunaires, Smart-1, lancée dans la nuit du 27 septembre 2003, a permis de tester de nouvelles technologies pour les futures missions européennes : nouvelles batterie Li-C, transmission de données vers la Terre à très haute fréquence (32 GHz), nouveaux panneaux solaires, système d'autonomie élevée et propulsion électrique. La sonde a parfaitement rempli sa mission en transmettant dès le 26 janvier 2005 des premières images du sol lunaire, avant de percuter le Lac de l'Excellence, le 3 septembre 2006.
Le propulseur à effet Hall (PPS®1350G de la Snecma, 70,1 mN de poussée) équipant Smart-1 a fonctionné pendant 4958 heures - record mondial – en ne consommant que 78,4 kg de xénon, ce qui a permis de prolonger la mission d'une année.
Faisant suite à deux explorations spatiales réalisées avec des propulseurs électriques à grilles, le succès remarquable de la mission Smart-1 constitue un encouragement fort pour les scientifiques et les industriels engagés dans la R&D en propulsion par plasma.

L'évolution en propulsion par plasma

Si les propulseurs à effet Hall de la classe 1-2 kW sont utilisés actuellement pour le maintien à poste des satellites géostationnaires et pour le contrôle d'attitude, la nouvelle génération, de la classe 5-10 kW, permettra d'autres missions (correction d'orbite de plateformes de masse élevée, aide à la mise en orbite géostationnaire, désorbitation…) qui requièrent des propulseurs délivrant une forte poussée, jusqu'à 500 mN et une impulsion spécifique de l'ordre de 2000 s. Développements et qualifications sont déjà entrepris pour cette gamme de propulseurs.
Les études en cours portent déjà sur des propulseurs à effet Hall plus puissants de poussée pouvant atteindre 50 N et 8000 s d'impulsion spécifique, pour l'exploration de planètes lointaines ou de comètes.

La recherche en France

Les phénomènes physiques qui apparaissent dans les propulseurs à effet Hall sont complexes. Leur approfondissement est indispensable pour la conception de nouvelles générations de propulseurs.
Avec cet objectif, un GdR (Groupement de Recherche) CNRS/Cnes/Snecma/universités « Propulsion spatiale à plasma » a été créé en 1996. Treize équipes de recherche y développent des modélisations en s'appuyant sur les expériences menées dans le moyen national d'essai Pivoine (laboratoire ICARE, CNRS d'Orléans).

Conclusion

La propulsion spatiale à plasma est une technologie performante et fiable : plus de 200 propulseurs russes de type SPT ont été utilisés en vol. Le PPS1350 embarqué sur Smart-1 a montré que la propulsion par plasma à effet Hall permettait des missions interplanétaires sur plus de 100 millions de km.
Dans ce domaine de propulsion, l'activité scientifique du GdR, le développement par Snecma de nouvelles générations de propulseurs, en particulier dans la gamme des fortes puissances (5-6 kW) et le soutien du Cnes permettent une présence française au plus haut niveau mondial.

Michel DUDECK
Professeur à l'Université PARIS 6, Directeur du GdR « Propulsion Spatiale à plasma », ICARE, CNRS Orléans

1. Voir l'article de Michel DUDECK dans ce numéro

Dans ce N°

La vie de l'Association p2
La vie des Groupes Régionaux p3-9
Dossier de Science p11-16

Disparitions

Gérard PERINELLE

Gérard PERINELLE

Le 18 mars dernier, Gérard PERINELLE est décédé subitement à Saint-Aubin de Médoc à l'âge de 79 ans.

Membre de la 3AF depuis 1985, il a été durant de nombreuses années la cheville ouvrière du Groupe Bordeaux Sud-ouest qu'il a servi avec compétence et dévouement. Le 26 mai 2005, le Président SCHELLER lui avait remis les Palmes AAAF 2004 en remerciement de ses apports à l'animation de la vie du groupe régional et de sa contribution régulière à la Lettre 3AF.

Apres dix-sept années au service de l'armée de l'air, Gérard PERINELLE, diplômé du CNAM, avait intégré la SEREB en 1961, pour débuter une carrière de vingt- sept ans consacrée à l'industrie balistique et spatiale. En particulier, il avait participé à Hammaguir à la réussite du lancement de Diamant n°1, le 26 novembre 1965, en tant que responsable des installations de mise en œuvre et de tir de ce lanceur.

Au cours des six dernières années de sa carrière, il avait été sur le plateau d'Albion, le chef de département Aerospatiale, en charge de l'assistance technique industrielle, auprès du 1er GMS de l'armée de l'air.

Pendant sa retraite, outre son engagement à la 3AF, Gérard PERINELLE avait participé à l'écriture de l'Histoire de l'espace. Il était titulaire de la Médaille Militaire et de la Croix de Guerre T.O.E.

Le président SCHELLER présente, au nom de tout le bureau de l'association, ses plus sincères condoléances à son épouse et ses enfants.

Hubert GOSSOT

Jean-François DARTEYRE et Jacques DELARUE

Deux personnalités nous ont récemment quittés, curieusement toutes les deux connectées à Max HOLSTE.

Jean-François DARTEYRE est décédé le 2 août 2006 à Arpajon (91).
Né le 10 mars 1914 à St Médard en Jalles, X et Sup'Aéro 41, il débute sa carrière au ministère de l'air, puis entre chez Nord Aviation comme directeur commercial en 1955, et devient rapidement directeur général.

Il est un des pionniers de l'Europe aérospatiale, dès le Noratlas, fabriqué en Allemagne en 1956. Sa décision de lancer en anticipation la fabrication de 10.000 Ars 5202/SS 10 fait de ce programme un succès remarquable, celui du premier engin filoguidé au monde.

Il joue ensuite un rôle essentiel dans l'exportation du Nord 262 chez Lake Central aux USA, ouvrant la voie à son exportation dans le monde entier, puis aux succès de l'ATR.
C'est aussi l'époque où le Griffon, le seul avion à statoréacteur supersonique de l'histoire, bat le record du monde de vitesse et pousse une pointe à 2.300 km/h, en montée, pour ne pas faire fondre son nez… L'un de ses pilotes, André Turcat, lui demande de rejoindre Sud Aviation pour prendre la direction des essais en vol. A la création d'Aerospatiale en 1970, il en devient le DG adjoint. Lorsque la SNPE (Société Nationale des Poudres & Explosifs) est créée l'année suivante, il devint membre de son Directoire, jusqu'à sa retraite en 1979, lui dont le père avait été ouvrier à la Poudrerie Nationale de St Médard…

Jacques DELARUE est décédé le 30 décembre 2006 à Aix-les-Bains.
Diplômé de l'Ecole de Rochefort de la Marine, et ayant connu Max HOLSTE en 1941, il en devient le proche collaborateur en 1943, afin d'échapper au travail obligatoire en Allemagne, et par intérêt pour le racer MH-20 Coupe Deutsch.
Lorsque HOLSTE est démissionné de sa société en 1961, il en devient le directeur général. Suite à la reprise du MH 250 Super Broussard par Nord Aviation, modifié en Nord 262 pressurisé, il passe chez Sud Aviation (après un intermède chez SIPA), où il est responsable des investissements. Ayant pris sa retraite à Suresnes, il publie un remarquable historique détaillé des avions Holste au Trait d'Union. La Commission Histoire a eu le privilège de rencontrer un des siens en 1999, en compagnie de son ami Jacques NOETINGER, puis de rester en relations fructueuses d'historiens par la suite.

La Commission Histoire salue deux grands pionniers qui ont contribué à la grandeur des Ailes Françaises.

Philippe JUNG

PEGASE,

UN PÔLE DE COMPÉTIVITÉ EN RÉGION PACA À LA CONQUÊTE DE NOUVELLES APPLICATIONS POUR L'AÉRONAUTIQUE ET LE SPATIAL

Une conférence de Jean-Yves LONGERE, Eurocopter

Le 19 janvier 2007, le groupe régional Marseille-Provence a été convié à Eurocopter Marignane pour une conférence sur les pôles de compétitivité régionaux présentée par Jean-Yves LONGERE représentant d'Eurocopter à l'association PEGASE, spécifiquement mise en place pour promouvoir le développement de ces pôles dans la région Sud-Est de la France.
Cette association a pour objectifs de créer des liens plus étroits entre les grands acteurs industriels, les petites et moyennes entreprises, les centres de recherche, les laboratoires et les organismes de formation, en vue de développer de nouvelles activités autorisant l'élargissement ou la création de nouveaux secteurs d'emplois. L'examen des développements industriels dans les années récentes conduit le conférencier à souligner l'importance fondamentale de deux facteurs dans la recherche de ces objectifs :

- assurer un large accès aux marchés européens et internationaux, suivant la prérogative des grandes entreprises ;
- avoir un contact étroit avec un large volume de petites et moyennes entreprises qui ont fréquemment le goût et la passion de l'innovation.

Dans la région PACA, l'aéronautique et l'informatique assurent 35000 emplois. La région bénéficie de la présence :

- de plusieurs grandes entreprises : Eurocopter, Thales Alenia Spacel, Dassault Aviation, Technicatome,… ;
- de nombreux centres de recherche : ONERA, INRIA, CNRS, et d'autres centres à Sophia Antipolis,… ;
- de nombreux centres de formation supérieure et de laboratoires.

L'aéronautique est une filière essentielle pour la région PACA, avec un chiffre d'affaires de 5 MEuros, des atouts majeurs dans l'accès au marché mondial, la densité et la diversité de son tissu de PME, des moyens d'essais et de simulation de réputation mondiale.
Dans le cadre de PEGASE, de grands projets ont été examinés et confortés dans l'attente de leur labellisation :

- l'aréoptère (projet Focus 21 d'Eric MAGRE), appareil s'appuyant sur les phénomènes d'effet de sol pour réduire les consommations énergétiques et augmenter les distances franchissables ;
- l'avion ensemenceur de nuages, avion sécurisé, équipé de moyens adéquats de lutte contre la pollution industrielle et permettant le déclenchement de la pluie dans les zones nuageuses ;
- le mono-planeur DRONE-X1 permettant l'observation de scènes ou la surveillance de territoires au profit des postes de commandement ;
- les dirigeables gros porteurs de lourdes charges et ascenseurs permettant le transport écologique, la surveillance à durée prolongée ou l'intervention lourde sur événements particuliers.

Une ambition caractérise ces nouvelles applications aéronautiques, celle de développer de nouveaux aéronefs, d'élargir les domaines technologiques et de mettre en œuvre de nouvelles applications : ingénierie, technologie des porteurs, technologie des missions, moyens d'essais et de certification, soutien technique et de mise en œuvre. Ces nouveaux développements seraient susceptibles d'apporter dans les 5 années à venir une amélioration de CA de 800 MEuros et de permettre dans environ 7 années plus de 10 000 emplois supplémentaires dans la filière.

Ces développements sont en effet susceptibles d'augmenter fortement les activités exportatrices des PME de taille moyenne, de maintenir un vivier d'innovation pour les grandes entreprises, de mettre en place de nouveaux secteurs d'activité, et d'élargir dans un écosystème complet, le domaine de l'emploi (+ 10 000 selon l'APEC) dans notre région du Sud-Est.

Bien sûr, cette conférence, ouvrant un avenir particulièrement attirant sur les plans de l'économie et de l'emploi, tout en prenant en compte les progrès à réaliser en matière d'écologie, a suscité de nombreuses questions de l'audience. Ainsi, les besoins financiers indispensables au lancement des opérations, les durées prolongées des retours sur investissement, les risques techniques, commerciaux et opérationnels, font partie des sujets qui ont été notamment amplement abordés.
Le soutien gouvernemental et celui des régions seraient à même de pallier les difficultés de la tâche, tout en renforçant les capacités d'entreprise de la région pour un meilleur avenir.

Fernand d'AMBRA, Jean-Yves LONGERE

Un workshop consacré aux dirigeables

Le pôle de compétences « PEGASE Provence Alpes Côte d'Azur » rassemble des acteurs industriels, de la recherche et de l'enseignement, des secteurs aéronautique et spatial, œuvrant pour définir des solutions innovantes pour la protection des personnes et le développement de territoires. Il a pour ambition de créer des systèmes aéronautiques et spatiaux répondant à l'émergence d'usages nouveaux.
PEGASE PACA et l'ONERA, ont organisé du 22 au 24 mai 2007 à Salon de Provence un workshop consacré aux dirigeables.
Après une présentation de projets, des groupes de spécialistes se pencheront sur les solutions proposées et sur les marchés potentiels pour relancer cette filière aéronautique.

Les résultats obtenus seront regroupés au sein d'un Livre Blanc qui ambitionne de devenir un ouvrage de référence mondiale pour la filière dirigeable mais surtout, qui devra servir d'outil de base pour les décideurs financeurs et les utilisateurs en complément des « roadmaps » sur le dirigeable, réalisées par PEGASE, dont l'ambition est de souligner les ruptures technologiques nécessaires pour avancer dans de véritables réalisations.
Les enjeux du workshop vont au-delà de la rédaction du Livre Blanc. Grâce à ses nouvelles applications (surveillance, transport de charges lourdes, relais de télécommunications...), le dirigeable, que l'on redécouvre grâce aux technologies nouvelles, a un avenir véritable et pertinent devant lui.

Pour des informations complémentaires, contacter
Khady Coundoul : khadyco@hotmail.fr
Philippe Guicheteau (ONERA-3AF) : philippe.guicheteau@onera.fr

Du spatial aux travaux publics : les maquettes virtuelles

Une conférence d'Eric Lebègue, CSTB

Eric LEBEGUE

La simulation de processus complexes, développée depuis des décennies dans le domaine de l'aéronautique a permis des économies gigantesques, notamment dans la formation des pilotes avec l'apparition des simulateurs de vol. On l'a vu appliquée à la conduite automobile, la conduite des trains et des centrales nucléaires, etc.
Plus récemment, elle a été étendue à la conception de systèmes, permettant de relier la conception architecturale assistée par ordinateur (CAO), aux autres calculs effectués en parallèle, tels que la thermique, les études de déformation élastique et de résistance des matériaux, etc.

Dans les années 80, c'est au Centre de Cannes d'Alcatel-Alenia Space (à l'époque Aerospatiale), qu'est née cette idée d'intégration pour la réalisation des satellites. D'où les programmes connus sous le nom de Baghera et la création d'une entreprise - Espri-Concept - dont ce fut le cœur de métier.
Plus récemment, le secteur des travaux publics y est venu, comprenant l'intérêt d'une telle intégration, qui permet de réduire le coût des grands projets. A Sophia-Antipolis, c'est le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), qui développe ces outils.

La conférence d'Eric LEBEGUE, donnée le 12 décembre 2006 dans l'auditorium Spacecamp d'Alcatel Alenia Space à Cannes sous l'égide du groupe régional 3AF Cannes-Côte d'Azur, traitait des « points communs entre les secteurs du spatial et des travaux publics dans le domaine de la réalité virtuelle ».

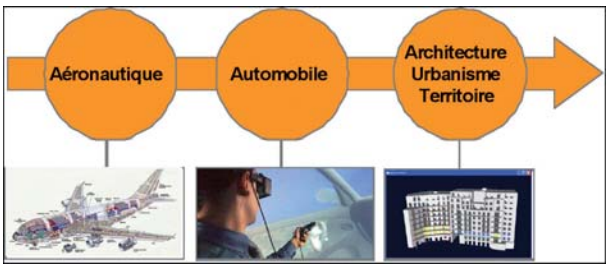

Fig. 1 - L'utilisation de maquettes virtuelles a envahi progressivement le secteur spatial, puis le secteur de l'aéronautique[1] et maintenant celui du bâtiment

1. - Harmonisation des données – Bases de données – Normes

C'est par un exemple tout personnel que le conférencier débute son exposé. Lors de la construction de sa villa, dans un lotissement, le plan de l'architecte prévoit un vide sanitaire de 80 cm de hauteur, ce qui représente une « norme » minimale. Prenant possession de sa maison, quelques mois plus tard, et devant se rendre dans le vide sanitaire, il est obligé de ramper pour le parcourir et le trouve vraiment très bas de plafond ; il le mesure : il ne fait que 60 cm. Il convoque le promoteur, qui vient avec 3 plans : l'original de l'architecte, dont on vient de parler, la version retournée par la mairie avec le permis de construire, où la hauteur de ce VO a été portée à 1,50 m – probablement parce que la ville pense que 80 cm est trop peu, et le plan définitif du constructeur qui lui indique bien 60 cm.
Ce genre de problème est courant dans le bâtiment : pas de plan unique archivé sur un ordinateur, auquel tous les intervenants ont accès, surtout lorsque des modifications y sont introduites ; pas de bases de données de tous les produits utilisables pour une construction ; et pas de norme d'échange des données entre tous les acteurs du métier. Conséquence : près de 30% de surcoûts dans la construction pour les diverses malfaçons rencontrées.

2. - Les maquettes virtuelles dans le domaine du Spatial : la norme STEP et Baghera View

La construction spatiale, avec le très haut niveau de qualité requis, a cherché à s'affranchir de ces problèmes, surtout quand le coût d'un satellite avoisine souvent les 200 millions

1 La dernière Lettre 3AF N°1-2007 de janvier, fait justement référence au projet du Falcon 7X de Dassault Aviation dont la maquette virtuelle a permis un gain de l'ordre de 25% du coût pour la conception de l'avion.

ERIC LEBEGUE

Eric Lebègue est Ingénieur de l'Institut Supérieur de l'Informatique (ISI) à Sophia-Antipolis, maintenant Ecole Supérieure des Sciences Informatiques (ESSI).

Lors de son service militaire en 1988, il participe, en tant que scientifique du contingent dans la Division Satellites d'Aerospatiale/Cannes, aux études et développements des logiciels permettant la liaison des logiciels de CAO avec ceux de calculs thermiques et de calculs des déformations élastiques, en collaboration avec le Cnes.

Le projet final prend le nom de Baghera. A la fin de son service, il crée en 1989, avec d'autres collègues, une « start-up » à Sophia-Antipolis, nommée Espri Concept, pour la diffusion et la commercialisation de Baghera, en collaboration avec Aerospatiale, le Cnes et l'ESA. La société est rachetée en 2000 par Simulog.

En 2001, il quitte le secteur spatial pour entrer chez Graitec, demandeur de ce genre d'applications pour le bâtiment. Il est ingénieur au CSTB depuis 2005 (eric.lebegue@cstb.fr).

d'euros, lancement compris. Les axes d'études, qui se sont concrétisés par les logiciels tels que Baghera (développé en 1990) ont porté sur :

- l'harmonisation des données et l'adoption d'une norme unique pour tous les prescripteurs d'ordre (les agences spatiales et les industriels) : STEP (STandard for the Exchange of Product models), une norme ISO pour les échanges de données entre outils de CAO ;

- la description des objets utilisés pour la construction des satellites et la constitution de gigantesques bases de données, grâce à l'abaissement des coûts des mémoires, y compris sur les ordinateurs personnels où tout un chacun peut même gérer ses propres maquettes virtuelles, à commencer par celle de son habitation !

Le CSTB a développé une compétence exceptionnelle dans le domaine des échanges de données entre outils d'ingénierie, basés sur cette norme STEP, également utilisée dans le secteur de la construction sous sa forme déclinée IFC (Industry Foundation Classes). Et le CSTB a remporté un appel d'offre de l'ESA pour assurer la maîtrise d'œuvre des échanges de données, dans le format STEP-TAS (Thermal Analysis for Space) entre les outils d'analyse thermique utilisés par les entreprises d'ingénierie spatiale. Ces logiciels sont THERMICA (de EADS Astrium), ESARAD (de ALSTOM Aerospace) et CORATHERM/CIGAL2 (de Alcatel Alenia Space). Associé à cette mission, le CSTB réalise pour le CNES, le logiciel Baghera View qui permet de visualiser, en 3D, les données STEP-TAS. *Baghera View* est maintenant adopté par l'ESA comme l'outil de visualisation de référence pour la validation des données d'analyses thermiques échangées entre les partenaires spatiaux européens.
La norme STEP-TAS est en cours de normalisation au sein de l'ISO avec la participation de la NASA.

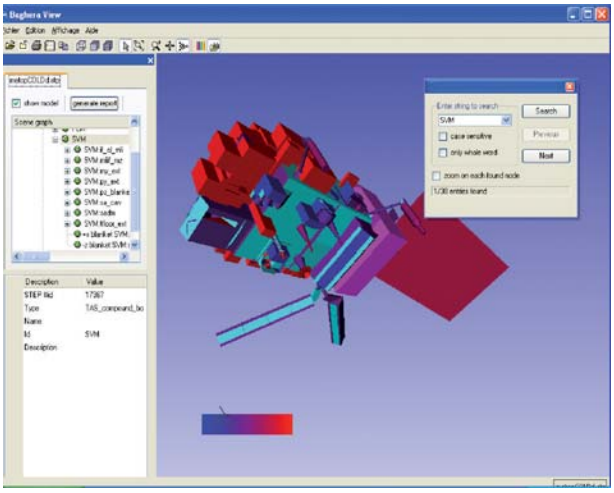

Fig. 2 - Baghera View : un outil de visualisation de référence pour les données d'ingénierie spatiales normalisées. Il permet la vérification, la synthèse des données, le repérage des évolutions et l'édition de rapports

3. - Du spatial à l'aéronautique, à la construction automobile, puis au bâtiment

Les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile ont déjà prouvé la capacité de la maquette numérique à concevoir complètement un produit, en intégrant les études techniques (structure, thermique, aérodynamique…) nécessaires, et ce avec un recours limité aux expérimentations physiques.
Cette pratique amène évidement des gains substantiels en matière de productivité et permet d'investiguer des solutions innovantes. Au CNES, *Baghera* est désormais le système de gestion des documents techniques utilisés sur quasiment l'ensemble des programmes.
Pour être transposable au secteur de la construction, cette pratique sous-entend l'utilisation d'une nouvelle génération de logiciels CAO 3D/Objets. Ils s'appellent, par exemple, *Architectural Desktop* ou *Revit* (Autodesk), *ArchiCAD* (Graphisoft). Dassault Systèmes est en train d'adapter au secteur son logiciel *CATIA*.

Le secteur de la construction, qui a identifié un certain nombre de points qui le rapproche du secteur spatial, doit puiser dans celui-ci la connaissance qui lui manque pour concevoir ces bâtiments qui nécessite de plus en plus d'études combinées pour répondre aux exigences, pour certaines liées au développement durable :

- **unicité des réalisations** : un engin spatial, comme un bâtiment, est un ouvrage unique ;
- **pluridisciplinarité des études, importance des économies d'énergies :** la conception d'un engin spatial nécessite de nombreuses études pluridisciplinaires (architecture, système, structure, thermique, vibration, électricité/électronique…) qui doivent être coordonnées. Les analyses thermiques sont un élément essentiel de cette conception, pour tenir compte des fortes variations de température auxquelles sont soumis des engins spatiaux. L'ensemble de ces études vise à économiser les énergies, point vital pour la durée de vie de l'engin spatial ;
- **utilisation de l'énergie solaire** : le secteur a développé une compétence indéniable dans l'utilisation de l'énergie solaire, la seule énergie renouvelable, une fois que le satellite a été lancé ;
- **corrélation simulation / essais physiques** : avant son lancement, un engin spatial est soumis à de nombreux essais au sol dans des équipements très sophistiqués (chambres à vide, caissons acoustiques…). Et les résultats de ces essais sont systématiquement corrélés avec les simulations réalisées avec les maquettes numériques de conception ;
- **complexité des consortiums de réalisation** : la conception d'un engin spatial est est souvent le fruit d'un travail collaboratif entre entreprises spécialisées (maîtres d'œuvres, co-traitants, sous-traitants…) qui utilisent des outils de conception, simulations et essais souvent différents mais qui doivent quand même cohabiter pour la réussite du projet ;
- **outils CAO et norme STEP :** l'industrie spatiale est évidemment un grand consommateur d'outils CAO et la norme STEP (format de base de la norme IFC) commence à être largement utilisée pour les échanges de données.

4. - Le projet EVE (Environnement Virtuel Enrichi)

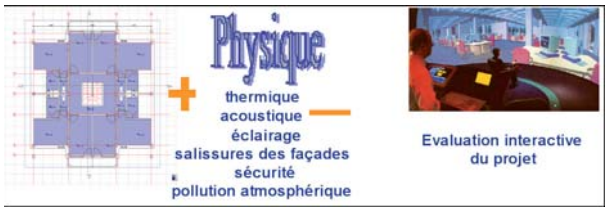

Fig. 3 - C'est en 2000 que le CSTB a lancé le projet EVE

Le CSTB a lancé, en 2000, le projet Environnement Virtuel Enrichi (EVE) qui vise à combiner « simulations scientifiquement valides » et « environnements virtuels ». Le résultat est une plate-forme, désormais industrielle, regroupant des modèles numériques, des fonctionnalités de visualisation/interaction en temps réel et des capacités de partage de données entre les différents modules mais aussi avec le monde de la CAO.
Cette plate-forme EVE du CSTB est développée, en partenariat avec les principales associations professionnelles du secteur (architectes, BET, éditeurs de logiciels…), un certain nombre de grandes entreprises (VINCI, Bouygues, OTH, etc.), d'autres centres techniques institutionnels (SETRA et des laboratoires universitaires comme ceux de EURECOM ou ESSI). Elle est en cours d'adoption par le CNES et l'ESA.
Pour une pérennisation et une parfaite évolutivité des maquettes virtuelles, EVE met en œuvre les normes d'échange et stockage de données, et en particulier les standards IFC pour les descriptions 3D sémantiques des bâtiments et la norme GML pour l'intégration des données géographiques. Elle peut aussi intégrer des données en format propriétaire, comme celui proposé par le logiciel 3DS Max, utilisé par la plupart des architectes pour présenter leurs projets en 3D.
Avec cette plate-forme, la maquette numérique de construction devient le « clone virtuel » du projet réel et un formidable support de simulation et de communication entre les acteurs du projet. EVE vise à combiner :

- harmonisation des formats de données STEP, IFC, ;
- simulations scientifiquement valides ;
- environnements virtuels, gestion des niveaux de détail ;
- le repérage automatique des différences entres plusieurs versions d'un même projet. Ceci est possible car chaque version de la maquette est archivée ; et d'un simple clic de souris il est possible de comparer deux versions et découvrir ce qui est nouveau (ajouts) ou ce qui manque (qui peut provenir d'une suppression accidentelle d'un élément).

Les mêmes objets de construction sont utilisés, en présence des spécialistes de chaque discipline en :

- simulation acoustique pour la restitution sonore de l'ambiance acoustique ;
- simulations thermoaérauliques pour le confort thermique et la consommation d'énergie ;
- simulation thermique : les objets peuvent être soumis à plusieurs analyses simultanées telles que l'évolution des températures dans les pièces, l'estimation des consommations énergétiques, etc.

L'exploitation des maquettes virtuelles conduit à :

- la constitution, la reprise de projets existants ;
- les calculs de structures ;
- des simulations, par rapport à la réglementation pour le développement durable, des phénomènes physiques, etc. ;
- la production des documents d'exécution (plans) ;
- le phasage de la construction ;
- le suivi et contrôle : gestion qualité, délai et coûts, etc. ;
- la synthèse : coordination des acteurs, communication ;
- l'actualisation du patrimoine.

5. - La salle immersive Le Corbusier

Et le CSTB s'équipe d'un moyen unique en Europe : la salle immersive (salle Le Corbusier à Sophia-Antipolis). Elle permet de mettre en commun des donneurs d'ordre, des architectes, des constructeurs, pour simuler, l'incorporation de la maquette virtuelle dans son environnement futur et prendre des décisions en temps réel.

Fig. 4 - La salle immersive est équipée de quinze sièges amovibles dont trois sont équipés d'un système individualisé de restitution de son

Elle dispose des équipements les plus en pointe :

- des super calculateurs graphiques multi-processeurs en technologie Silicon Graphic et PC ;
- trois vidéo-projecteurs technologie DLP (Digital Light Processing™) ;
- un écran conique permettant de projeter une image d'environ 33 m² ;
- un système de sonorisation globale de la salle ;
- quinze sièges amovibles dont trois équipés d'un système individualisé de restitution de son spatialisé en 3D (brevet CSTB).

6. - L'incorporation des maquettes virtuelles des travaux publics dans le paysage : le viaduc de Millau

C'est l'imagerie satellitaire qui, fournissant les données sur toutes les surface du globe, a permis d'intégrer les grands projets de travaux publics dans les paysages.
La France avec les satellites SPOT développés par le CNES et l'industrie spatiale européenne, est pionnière dans ce domaine. Ils tournent en permanence à 840 km d'altitude au dessus de nos têtes, sur des orbites quasi polaires - dites héliosynchrones -, leur permettant de passer toujours à la même heure solaire à une latitude donnée. Ils fournissent des « fauchées » d'images du paysage de 120 km de largeur (deux instruments de 60 km de fauchée). Toute la surface terrestre est renouvelée une fois par mois, sous réserve qu'il n'y ait pas eu de nuages lors de leur passage.
Ils fournissent des images stéréoscopiques permettant de reconstituer le relief du terrain et la création de modèles numériques du terrain (MNT).
L'américain *Google* a été le premier à diffuser gratuitement ce

Fig. 5 - La maquette numérique du viaduc de Millau incorporée dans le paysage des gorges du Tarn

type de données vers le grand public, sur son site *Google Earth*. Il utilise des images de différentes résolutions provenant de capteurs embarqués sur des satellites Landsat (15m), SPOT5 (2,5m), QuickBird (0,60m) ou sur des avions avec une résolution proposée pouvant atteindre 5 cm !
SPOTIMAGE, une filiale du CNES produit, archive et commercialise des images pour divers usagers, mais pas pour le grand public.
L'Institut Géographique National (IGN) a été le premier utilisateur pour la mise à jour de toute la cartographie nationale et internationale, avec des coûts très inférieurs aux productions précédentes à partir de photos aériennes. Et l'IGN, qui manipulait depuis fort longtemps les couples d'images stéréoscopiques des photos aériennes pour la restitution des courbes de niveau (photogrammétrie), a pu développer des méthodes numériques de calcul du relief, créant les modèles numériques de terrain (MNT), directement utilisables sur ordinateur. L'IGN est venue tout récemment à cette diffusion gratuite sur Internet avec son Géoportail, consacré aux images de la France (DOM compris).

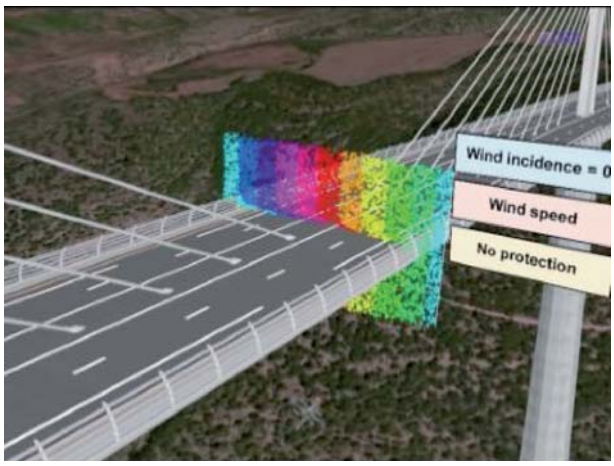

Fig.6 - Simulation de vents latéraux sur la maquette numérique

Dans notre cas, c'est par une collaboration CNES, SPOTIMAGE, IGN et GEOIMAGE, une société de Sophia-Antipolis, qu'ont été créées les images de synthèse de tous les types de terrains par une mosaïque d'images satellite et de Modèle Numérique de Terrain (MNT) de différentes résolutions. La résolution des images SPOT5 permet de voir le tissu routier, mais de n'y distinguer que des objets de la taille d'un camion.

La société Eiffage, réalisatrice du viaduc de Millau, a fourni la maquette virtuelle du pont, avec un niveau de détail très élevé. Après intégration dans le paysage, tous types de simulations peuvent être réalisés en navigant autour de l'ouvrage. Des applications supplémentaires ont été développées, en particulier pour l'étude des effets du vent. Elles ont permis de définir le meilleur profil possible pour les rambardes latérales du pont, minimisant les effets sur les véhicules le traversant.

7. - Partenariat Géoportail - IGN / CSTB

Le *Géoportail* (le « Google Earth » français) a été lancé sur Internet en 2006 par l'IGN. Par rapport à la version américaine, il apporte une meilleure qualité et une fiabilité à usage professionnel, grâce à l'apport des données précises de l'IGN, de la météorologie nationale et, à terme, des données urbaines.

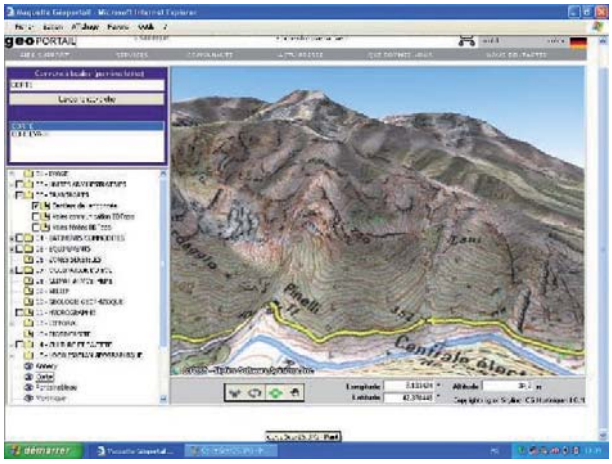

Fig. 7 - L'image du terrain de Geoportail peut être agrémentée des courbes de niveaux et des données de la cartographie

Depuis le *Géoportail*, il est possible de :
• sélectionner une zone d'étude ;
• récupérer ou accéder aux données pertinentes (BD-Ortho, Topo, cadastre… ; environnementales : météo, trafic…) ;
• créer une maquette virtuelle enrichie (CSTB & partenaires) ;
• intégrer des bâtiments détaillés (photos aériennes plus précises, photos au sol, IFC…) ;
• simuler des phénomènes physiques (acoustique, pollution, sismique…).
• récupérer les maquettes virtuelles enrichies.
Le CSTB participe au collège des experts

8. - Le futur campus STIC *(Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication)* de Sophia-Antipolis

• Le « Campus STIC » est un important projet immobilier mais aussi des projets collaboratifs de recherche financés dans le cadre du quatrième Contrat de Plan Etat Région.

Les actions associées du CSTB sont :
• la coordination avec la maîtrise d'œuvre Wilmotte & Associés retenue ;
• la modélisation, intégration des données SIG, photos et plans AutoCAD, Simulations ;
• la plate-forme EVE pour l'intégration, la visualisation et la simulation.

Fig. 8 - Le futur campus du STIC sera implanté à Sophia-Antipolis, dans la zone de St-Philippe (proche de Hewlett Packard) sur un terrain de 14 hectares acquis par le Conseil Général des Alpes-Maritimes, maître d'ouvrage du projet. Le Cabinet d'architecte Wilmotte & Associés est le maître d'oeuvre

Compte tenu de l'implantation paysagère à respecter sur le site de Sophia-Antipolis, la maquette virtuelle doit s'enrichir de simulation de la végétation.
Une bibliothèque de base de plus d'une centaine d'essences et un outil de création de nouveaux arbres, avec 2 ou 3 niveaux de détail pour chaque arbre, ont été créés.

Figure 10 - Les simulations montrées par le conférencier sont vraiment spectaculaires

9. - Cannes : une ville numérique

Les villes, qui se sont lancées dans la réalisation de maquettes modélisant leur territoire, annoncent déjà la couleur : « La maquette numérique de Cannes dispose de passerelles vers les principaux logiciels de conception 3D. Lors d'un concours, les architectes récupèrent des données 3D haute définition (1 pixel =15 cm) sur l'environnement urbain et fournissent une version 3D de leur projet, que l'on pourra ensuite intégrer à la maquette », explique Cédric BLANCHARD, chef de projet SIG (Systèmes d'informations géographiques) à la ville de Cannes, dans un article publié par *Le Moniteur*.
Que ce soit à l'échelle d'un quartier, d'une ville ou d'un département, une maquette numérique superpose sur une même zone plusieurs couches de données (aériennes, cadastrales, topographiques), mais aussi des relevés de végétation, ou de façades.

Fig. 11 - Ville de Cannes : le niveau de détail numérique des sols et des bâtiments est saisissant. Ici le célèbre « Carlton » sur la Croisette

A ces données physiques peuvent venir s'agréger des informations réglementaires (sites pollués, classés, zones inondables, PLU, Scot…) ou techniques (réseaux, voiries, transports en commun, points lumineux, mobilier urbain, etc.)

La maquette s'obtient au terme d'un processus en trois étapes et sept phases :
1 constitution d'une orthographie vraie à partir d'images aériennes du territoire en possession de l'IGN, soit par numérisation de photos argentiques déjà en stock, soit par de nouvelle prises de vues avec des caméras numériques. La résolution (pixel) est de 15 cm au sol, très nettement supérieure à ce que peuvent fournir les satellites d'observation de la Terre ;
2 à partir d'un couple d'images stéréoscopiques, création du modèle numérique de terrain (MNT) ;
3 en parallèle, constitution d'un modèle numérique d'élévation (MNE) avec le bâti (bâtiments, voirie, ponts, etc.) et de la végétation ;
4 l'orthographie vraie est drapée sur le MNT ;
5 les maquettes du bâti sont implantées sous forme de cubes de couleur unie ;
6 insertion d'objets 3D supplémentaires, tels que mobilier urbain (lampadaires, kiosques, signalisation routière, etc.) récupérés d'une base de données de tous types de matériels ;
7 les bâtiments sont « texturés » à partir de photos numériques des façades et des toits. La végétation « artificielle » peut être remplacée par des photos numériques de la végétation réelle.

Caractéristiques de la maquette numérique de la ville de Cannes
- Résolution : 15 cm au sol, obtenue par des prises de vues aériennes avec une caméra numérique ;
- Surface : 21 km^2 ;
- 22 000 bâtiments texturés individuellement ;
- 40 000 photos numériques façades.

Partenaires :
Thales Alenia Space (Maître d'Oeuvre), PIXXIM (modélisation), ISTAR (photos aériennes), IGN (cadastre).

Rôle du CSTB
- Expertise en Visualisation avancée, plate-forme EVE ;
- Support de simulation ;
- Assurance qualité, évolutivité de la maquette.

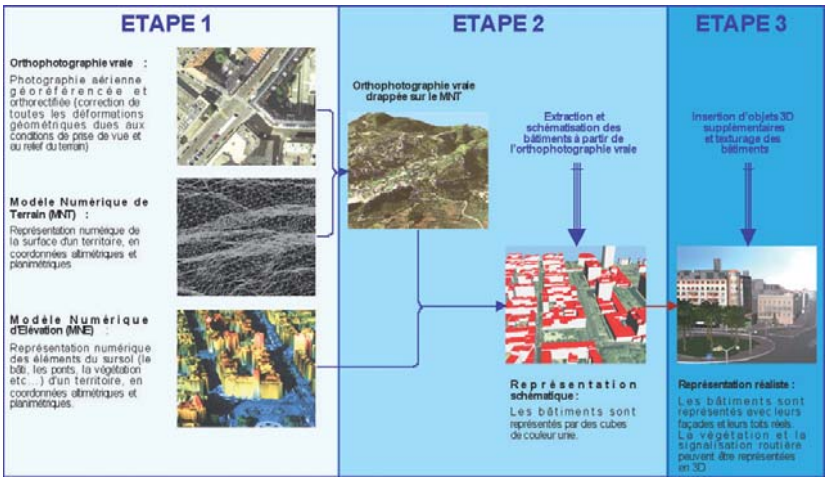

Figure 12 - -Méthodes d'acquisition. Les 7 phases de la réalisation de la maquette sont détaillées sur l'illustration

10. - Le projet d'extension « Alcatel Odyssée »

Le futur siège social de la société résultant de la fusion d'Alcatel Space et d'Alenia nécessite la construction d'un nouveau bâtiment. Sa maquette numérique a été réalisée. Elle sert à des études d'impact de l'environnement sur le choix des matériaux. Des simulations des bruits dus aux décollages des avions, permettent de faire un choix judicieux des matériaux d'isolation phonique pour le bâtiment situé à proximité de l'aéroport de Cannes Mandelieu.
Des études thermiques, de circulation des personnes (accessibilité, propagation d'incendies, évacuation des personnes, plan de signalisation) sont également menées ainsi que la simulation de la montée des eaux, la zone d'implantation étant susceptible d'être inondée.

11. - De nouvelle études en cours

Ce ne sont pas les idées qui manquent pour l'utilisation de telles maquettes numériques. Le CSTB et sa plate-forme EVE ont divers projets en cours :

• pour le Conseil Général06, des simulations de tsunami et de tremblement de terre basées sur une interopérabilité entre des modèles géologiques et des modèles de cadres bâtis. Le CSTB est maître d'œuvre, en partenariat avec le BRGM, Victor Davidovicci, SETOR (BET Structure), Graitec (logiciels de calcul de structures) ;

• les extensions de l'aéroport de Nice pour le compte de la CCI ;

• en collaboration avec l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité), un modèle microscopique de poursuite, chaque véhicule interagissant avec les véhicules qui l'entourent, simulation des carrefours, feux de signalisation…

Guy Lebègue, 3AF,
Eric Lebègue, CSTB,
Laurent Lebègue, CNES

Pour en savoir plus :

Alcatel Alenia Space : http://www1.alcatel-lucent.com/space/index.htm ;

CNES : http://www.cnes.fr/ ;

ESA : http://www.esa.int/esaCP/ index.html ;

IGN : http://www.ign.fr/rubrique.asp?rbr_id=1&lng_id=FR ;

CSTB : http://www.cstb.fr/ ;

Salle immersive du CSTB à Sophia-Antipolis : http://salle-immersive.cstb. fr/ ;

GEOIMAGE : http://www.geoimage.fr/ ;

ISTAR : http://www.istar.com/ ;

Eiffage : http://www.eiffage.fr/ ;

Le Campus STIC : http://eurecominfo.eurecom.fr/main/homepage/page1001/page1007.fr.htm ;

Cannes, ville numérique : http://3d.cannes.fr/ .

Figure 13 – Simulation du bruit provoqué par le décollage d'un avion d'affaires depuis l'aéroport deCannes/Mandelieu

Annonces

Date	Lieu	Manifestation
2007		
TOULOUSE MIDI-PYRÉNÉES (Tél. : 05 56 16 47 44 ; courriel : aaaftlse@aol.com)		
19 sept. à 18h	TOULOUSE salle Osète	« Aerospace Valley », par François JOUAILLEC
CANNES CÔTE D'AZUR (Tél : 04 92 92 79 80; courriel : aaaf.ca@wanadoo.fr)		
18 sept. à 18h	Cannes-la-Bocca Spacecamp-Alcatel	"A la recherche d'une source d'énergie nouvelle– Le projet européen ITER", une conférence de Jean-Marc Ané, CEA Cadarache

Colloques nationaux et internationaux

Date	Lieu	Organisateur	Manifestation
2007			
1-6 juillet	BRUXELLES Belgique	EUCASS www.eucass.eu	2nd European Conference for Aerospace Sciences
24-26 juillet	HAMPTON Virginia (USA)	le National Institute of Aerospace www.nianet.org/workshops/quietaircraft.php	Workshop on Revolutionary Aircraft for Quiet Communities
10-13 sept.	BERLIN Allemagne	CEAS www.ceas2007.org	First CEAS European Air & Space Conference
15 sept.	MONACO Musée Océano.	AAAF/ACF/AAE/UFH	Centenaire de l'hélicoptère : Maurice Léger le père de l'hélicoptère co-axial
25-27 sept.	PARIS Sénat	AAAF transformation.collloques-aaaf.com	Transformations vers des capacités européenne en réseau
27-28 sept.	LISBONNE Portugal	CEAS–ASC www.ist.utl.pt aero@popsrv.ist.utl.pt	11th CEAS-ASC Workshop & 2nd Scientific Workshop of X3 – NOISE : Experimental and Numerical Analysis and Prediction of Combustion Noise
30 sept. 2 octobre	BORDEAUX Jean-louis.cullerier@snecma.fr		Exposition –Colloque : « La conquête spatiale 1957-2007-2057 »
26-28 nov.	STANFORD UNIV. CALIF. USA / SEE www.cogis2007.org		COGIS'07 COGnitive systems with interactive sensors 2007

La propulsion électrique pour les missions spatiales

Par André BOUCHOULE (GREMI, Université d'Orléans), Olivier DUCHEMIN (Snecma, division Moteurs Spatiaux), Michel DUDECK (ICARE, CNRS Orléans, directeur du GdR), Stéphane MAZOUFFRE (ICARE, CNRS Orléans)

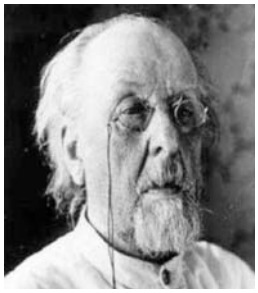

Fig. 1 - C.E. Tsiolkowski

Suggérée au début du 20ème siècle, la propulsion par plasma n'a été utilisée pour la première fois dans le domaine spatial qu'au cours des années 60. Elle fait actuellement partie des grands enjeux scientifique, technologique et économique ; enjeu scientifique, en raison de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu, technologique par les contraintes liées aux missions dans l'espace et économique par ses implications en particulier dans le domaine des télécommunications.

Deux conférences ont été organisées sur la propulsion par plasma le 28 novembre 2006, l'une à Orléans, l'autre à Rouen. La conférence organisée par le Groupe régional Centre de la 3AF et Centre Sciences qui s'est tenue au Muséum d'Orléans était articulée autour de trois thèmes : l'histoire et le développement de la propulsion par plasma, les principes physiques en propulsion par source à effet Hall et les missions spatiales actuelles et futures basées sur la propulsion à plasma solaire. La conférence qui s'est tenue à Rouen à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Génie Electrique, organisée conjointement par l'association Science Action Haute Normandie et le Groupe Normandie de la 3AF, était quant à elle centrée sur les grands principes de la propulsion électrique, les principaux programmes en cours – notamment en Europe – et les perspectives ouvertes à la fois pour les missions commerciales et pour les missions d'exploration scientifiques.

Le présent article reprend le contenu des deux conférences et propose ainsi aux lecteurs à la fois une introduction à la propulsion spatiale à plasma, en particulier aux propulseurs dits « à effet Hall » et une revue des diverses missions commerciales et scientifiques qui profitent, et profiteront des avantages de ce type de propulsion électrique.

I. Des précurseurs à aujourd'hui : deux grandes étapes scientifiques et techniques

Le temps des rêves

Visiter un jour l'espace

Avec la caractérisation (charge et masse) des particules chargées élémentaires (réalisée par J.J. Thomson en 1897 pour l'électron puis par E. Rutherford vers 1914 pour le proton) les progrès de la physique montrent dès le 19ème siècle que l'on pouvait peut-être disposer de « projectiles » susceptibles d'être accélérés par des champs électriques à des vitesses considérablement plus élevées que celles que peuvent avoir des atomes ou des molécules neutres dans un gaz, même quand ce gaz est porté aux températures les plus élevées. C'est à la même période qu'un pionnier de l'astronautique, Constantin E. TSIOLKOWSKI (1857-1935, figure 1) met en place les premiers concepts et les lois de l'astronautique et imagine la possibilité de visiter un jour l'espace.

La propulsion spatiale

La propulsion spatiale qui donne cette possibilité, s'exerce par définition dans des conditions de vide extrême. Sans un fluide ambiant sur lequel s'appuyer, la force de poussée ne peut résulter que de l'éjection d'un flux de matière (via la conservation de la quantité de mouvement) : plus la vitesse d'éjection est grande, plus la quantité de mouvement emportée par ce flux, donc la force de poussée, est élevée. C.E. Tsiolkowski a perçu l'intérêt de ce mécanisme dès 1903, suivi de près par un autre grand pionnier de l'astronautique moderne, Robert GODDARD (1882-1945).

La propulsion électrique

Mais la vitesse n'est pas tout : la poussée P = md x vej où md est le débit de masse et vej la vitesse du fluide éjecté, doit être significative. Il a fallu attendre les années 1950 et l'arrivée de sources d'ions délivrant des courants d'ions importants pour que la propulsion électrique apparaisse crédible (étude de faisabilité par L. SPITZER). Les années 60 marquent un tournant significatif, avec l'émergence de la physique des plasmas magnétisés (premières études sur la fusion nucléaire) et les progrès en techniques d'ionisation des gaz et extraction de jets ioniques, réalisés aux USA, en URSS, en Europe et au Japon. Et dès 1964 parait le premier livre sur la propulsion électrique écrit par E. STUHLINGER alors à la NASA : « Ion propulsion for space flight ». E. CHOUEIRI, (EPPDyL, Princeton), présente en détailsde la propulsion spatiale de ce premier demi-siècle dans son article « A critical history of EP : 1906-1956 », accessible sur internet.

Le temps des études concrètes et de l'utilisation

Les premiers propulseurs électriques

Si l'on excepte les moteurs « resistojets » ou « arcjets », de type thermique à haute température, les premiers propulseurs électriques étudiés en laboratoire appartiennent à deux familles : les sources d'ions à grilles (H. KAUFMAN, USA, 1959) et les propulseurs à effet Hall (A.I. MOROZOV, URSS, 1962).

Dans le premier cas, extraction, focalisation et accélération des ions sont assurées par un système de 2 ou 3 grilles, à partir d'un plasma de potentiel uniforme et fortement ionisé (Cs puis Xe). Dans le second cas, le champ électrique obtenu dans un plasma magnétisé permet d'obtenir cette accélération au sein du plasma lui-même. Ce dernier sera testé dans l'espace dès 1972 (satellite URSS Meteor).

Ces 50 dernières années ont confirmé la place prépondérante de ces deux types de propulsion spatiale électrique. Des centaines de moteurs utilisant l'un ou l'autre ont été mis en œuvre et leur utilisation courante sur les satellites commerciaux semble probable à courte échéance. La fiabilité démontrée par les

missions d'exploration DEEP SPACE 1 (NASA, moteur à grille, 16.265 h) et SMART 1 (ESA, moteur de Hall, ≈ 5.000 h) permettant en effet d'envisager une réduction du coût d'assurance élevé demandé aux opérateurs.
L'intérêt de ces technologies de propulsion et certains aspects de leurs développements actuels sont illustrés dans la section suivante.

II. Spécificités et developpement actuels en propulsion spatiale électrique

Electrique versus thermique : moins de masse mais plus de temps

En éjectant à la vitesse ve une masse me de fluide propulsif un moteur spatial assure une variation Δv de vitesse du vaisseau de masse initiale M^0. La conservation de la quantité de mouvement se traduit par la relation : $m_e = M^0 [1-\exp(-\Delta v/v_e)]$. Ceci quantifie une notion intuitive : un même effet peut être obtenu avec moins de masse si la vitesse d'éjection augmente. Les performances de 3 moteurs sont comparées dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Technologie	Industriel	Mission	Poussée	Vitesse v_e
Hydrazine	Snecma	SPOT 5	15 N	2200 ms^{-1}
Hall (xénon)	FAKEL	EXPRESS 1	80 mN	15000 ms^{-1}
Ionique (xénon)	Hughes	DEEP SPACE 1	90 mN	31000 ms^{-1}

La masse de fluide propulsif requise pour mettre à poste puis contrôler pendant 15 ans un satellite géostationnaire représente près de 60% de la masse totale du satellite au lancement, résultat qui justifie l'intérêt porté aux propulseurs électriques.
L'autre caractéristique, évidente sur les données de poussée, est qu'il faut plus de temps pour assurer la même manœuvre (voir le Tableau 2 où l'on compare masse et temps estimés pour deux missions différentes : contrôle d'attitude durant 15 ans d'un satellite géostationnaire et mission Terre-Lune de la sonde SMART-1 avec a) le moteur à effet Hall PPS®1350 de Snecma (70 mN, v_e = 15 000 m/s) et b) le propulseur à hydrazine précité).

Dernière considération importante : la propulsion électrique nécessite des générateurs de puissance à bord des vaisseaux. La puissance mise en jeu dans les moteurs actuels est de l'ordre de 1,5 kW et la poussée générée par unité de puissance (en N/W) est un paramètre de qualité à prendre en compte. La puissance variant comme me ve^2 et la poussée comme meve ; cette « poussée spécifique » varie comme l'inverse de la vitesse d'éjection : ceci peut conduire à un compromis selon la puissance électrique disponible.
Autrement dit, l'optimisation des deux ressources majeures disponibles à bord (puissance électrique et masse de fluide propulsif) conduit à des exigences opposées en termes de vitesse d'éjection, d'où un compromis à trouver en fonction de la mission.

Développements récents en propulsion électrique

La R&D industrielle, visant le marché potentiel des satellites, se développe en prolongeant les acquis technologiques actuels (ionique et Hall) en direction d'une augmentation de puissance (5-6 kW) autorisant soit une vitesse ve plus grande (20-30 km/s), soit une poussée plus forte (200-300 mN). Mais d'autres développements accompagnent des missions spécifiques : moteurs de très forte puissance (20-100 kW) pour des missions rapides d'exploration du système solaire et moteurs de très faible poussée (quelques 10 µN) pour des missions scientifiques.

La figure 2 montre un moteur ionique de 20 kW développé et testé aux USA (JPL, Pasadena, programme NASA Prometheus). Sa mise au point s'est accompagnée d'un progrès technologique essentiel puisqu'il a fallut construire des grilles en carbone pour un jet d'ions de 60 cm de diamètre !

Des études encore plus ambitieuses existent, visant des missions rapides aller-retour vers Mars avec des moteurs de 100 kW et plus, impliquant des champs magnétiques très élevés créés par bobines supraconductrices et supposant l'existence de réacteurs nucléaires à bord. Le moteur VASIMR, concept nouveau développé à Houston par l'astronaute Chang Diaz en est un exemple.
A l'opposé, le moteur de très faible poussée, développé par ALTA (Italie), repose sur l'extraction d'ions Indium émis par effet de champ (108-109 V/m) à partir d'une fente ultrafine (µm) alimentée en métal liquide. Ce moteur doit permettre de corriger à quelques nm près les perturbations de trajectoire d'une sonde provoquées par le rayonnement ou des impacts particulaires. Il sera mis en œuvre dans les missions MICROSCOPE (CNES) et LISA PATHFINDER (ESA-NASA) destinées respectivement à tester le principe d'équivalence de Galilée et à la détection d'ondes de gravitation.

TABLEAU 2

ΔV total (ms^{-1})	Masse totale au lancement avec propulsion électrique	Durée de poussée (moteur de Hall)	Durée théorique (hydrazine)	Masse totale éjectée (Hall)	Masse théorique (hydrazine)
750 (satellite géostationnaire)	6000 kg	6300 h	35 h	110 kg	950 kg
3700 (SMART-1)	370 kg	5000 h	70 h	80 kg	260 kg

III. Propulsion plasma par source à effet Hall

Un propulseur à effet Hall repose sur un concept simple : un plasma partiellement magnétisé est produit entre deux électrodes et les ions positifs présents sont accélérés par un champ électrique réalisant l'effet propulsif.

Fig. 2 - Photographie d'un moteur ionique à grilles de 60 cm de diamètre capable de fonctionner à 60 kW. Ce moteur a été développé au JPL dans le cadre du programme Prometheus.

Principes et caractéristiques des propulseurs à effet Hall

Le plasma

Le plasma est obtenu grâce à une cathode placée à l'extérieur du propulseur qui génère des électrons par effet thermo-émissif (généralement à partir d'un élément en hexaborure de Lanthane, LaB6 ou en oxyde).

Ces électrons neutralisent électriquement le jet et créent un flux en direction d'une anode placée au fond d'un canal annulaire. Ce flux est de sens opposé à celui d'un gaz (du xénon) injecté au travers de l'anode. Le xénon est choisi en raison de son faible potentiel d'ionisation (12,2eV), de sa masse molaire élevée, de son absence de toxicité et de ses propriétés thermodynamiques.

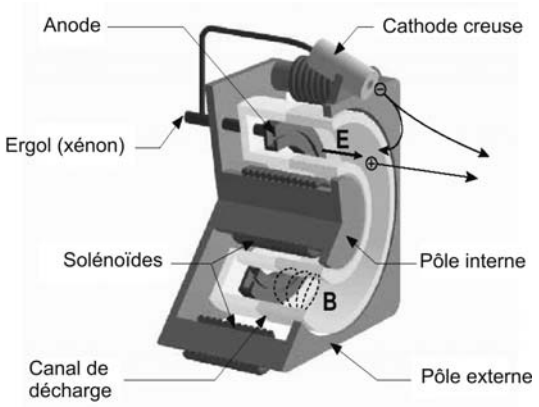

Fig. 3 - Schéma d'un propulseur à effet Hall. Le champ magnétique est produit par les bobines. Le champ électrique résulte de la chute de mobilité électronique dans la barrière magnétique. Les ions produits dans le canal sont éjectés à grande vitesse et le faisceau est neutralisé par une partie des électrons émis par la cathode

Les collisions entre les atomes de xénon et les électrons dirigés vers l'anode sont à l'origine de la formation d'un plasma.

Augmenter le nombre de collisions

Le propulseur étant prévu pour fonctionner à une très basse pression à laquelle les collisions électron-xénon sont en nombre très faible, il est donc nécessaire de piéger les électrons afin d'augmenter leur temps de séjour et donc la probabilité de réaliser des collisions ionisantes formant principalement des ions positifs Xe+ une fois chargés. Ce piégeage est réalisé par un champ magnétique essentiellement radial dont la valeur maximale est d'environ 200 Gauss. Le champ magnétique est créé par un ensemble de bobines, placées l'une à l'intérieur, et les autres à l'extérieur du canal confinant la décharge. Les ions positifs sont ensuite accélérés par un champ électrique axial généré par le plasma lui-même afin de compenser la baisse de mobilité électronique due au champ magnétique, ou, en d'autres termes, de compenser l'augmentation de la résistance électrique à la sortie du canal.

L'avantage des propulseurs à effet Hall

On est donc en présence d'une source où les ions sont accélérés par le plasma sans avoir besoin d'utiliser des grilles accélératrices comme pour un moteur ionique. C'est un avantage indéniable des propulseurs à effet Hall qui leur confère en particulier une très grande souplesse d'utilisation.

Les ions Xe+ (il y a seulement 15 à 20% d'ions Xe++ créés) n'étant pas sensibles au faible champ magnétique appliqué en raison de leur masse, vont être accélérés par le champ électrique qui atteint typiquement une amplitude de l'ordre de 500 V/cm en sortie du canal de décharge. Ce champ accélérateur permet aux ions d'atteindre une vitesse de l'ordre de 15 à 20 km/s. Cette vitesse donne une impulsion spécifique élevée à ce type de propulseur et une poussée modérée.

Le propulseur PPS®1350 de Snecma, qui équipait la sonde lunaire SMART-1 (figure 4), développe une poussée de 88 mN et offre une impulsion spécifique (Isp) de 2500 s à 1500 W. Le dernier né des propulseur Snecma, le PPS®X000, peut délivrer 300 mN de poussée et 3000 s d'Isp à 5 kW.

Une physique complexe pas encore totalement maitrisée

Comment les électrons peuvent-ils atteindre l'anode ?

Les électrons présents dans la décharge sont soumis à un champ électromagnétique croisé E x B qui leur communique

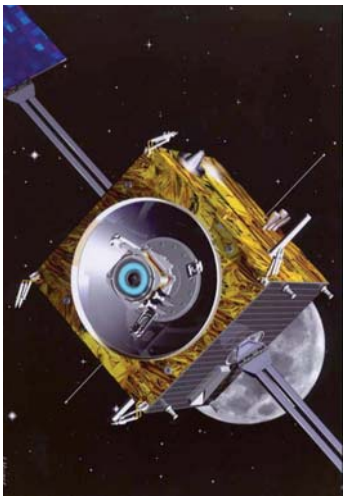

Fig. 4 - Sonde lunaire SMART-1 et son propulseur à plasma PPS®1350-G construit par Snecma

un mouvement de dérive azimutale donnant un courant de plusieurs dizaines d'Ampères, le courant de Hall. Ils doivent cependant atteindre l'anode pour maintenir électriquement la décharge. Cela conduit à poser une question essentielle : comment les électrons piégés sur les lignes de champ magnétiques peuvent-ils atteindre l'anode ? Cette question a fait l'objet de nombreux débats scientifiques depuis le début des études sur les propulseurs à effet Hall.
La première théorie proposée par A. I. MOROZOV est celle du transport pariétal selon laquelle les électrons réémis par les parois du canal vont, de proche en proche, changer de ligne de champ magnétique et se rapprocher de l'anode. Les équipes françaises s'orientent actuellement vers une autre interprétation, celle de la turbulence plasma à haute fréquence en s'appuyant sur les modélisation effectuées au CPHT de l'Ecole Polytechnique et sur les mesures expérimentales réalisées au moyen d'antennes.
Bien que le principe de fonctionnement de ces sources soit simple, il est apparu très rapidement que la maîtrise de ces propulseurs passe par la compréhension de phénomènes physiques complexes. Les difficultés concernent principalement les phénomènes de transport électronique et ionique.

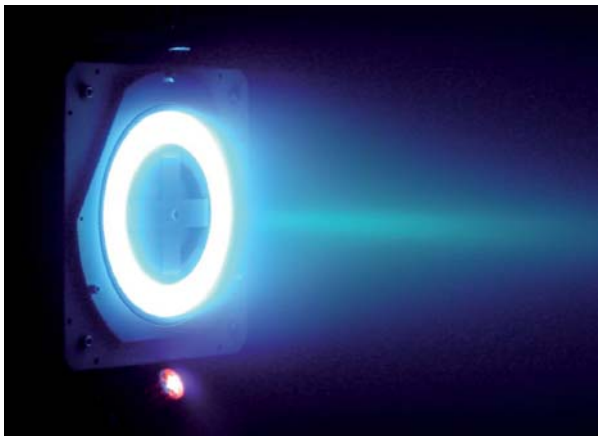

Fig. 5 - Panache de plasma du propulseur à effet Hall PPS®X000 lors d'un tir à 5 kW dans le moyen d'essais PIVOINE-2G de l'Institut ICARE

Des sources à plasma difficiles à maîtriser

Mais d'autres processus physiques rendent la maîtrise de ces sources à plasma magnétisées difficile. On peut citer par exemple :
• les interactions entre le plasma et les surfaces qui se traduisent par un phénomène d'érosion, donc d'usure des parois en céramique de la chambre à décharge dû à un intense bombardement par les ions et les électrons, par un échauffement des parois qui nécessite la mise au point de systèmes d'évacuation de la chaleur par radiation et aussi par la formation de dépôts isolant sur l'anode ;
• les oscillations du courant et du potentiel dans une large gamme de fréquences allant des basses fréquences (à quelques 10 kHz ? phénomène dit de « breathing mode ») aux hautes fréquences (à quelques MHz liées à la dérive des électrons) en passant par des fréquences intermédiaires de l'ordre de 100 kHz associées au mécanisme de transit des ions dans le canal ;
• le recouvrement entre les zones d'ionisation et d'accélération qui conduit à des pertes d'énergie cinétique pour les ions et à une grande divergence du faisceau d'ions.

La stratégie française : un Groupement de Recherche

Les efforts français en propulsion à plasma
Afin de disposer d'une capacité de réponse et d'expertise, le Cnes, le Cnrs, la Snecma (alors Sep) et l'Onera ont créé en 1996 un Groupement de Recherche (GdR) qui coordonne et pilote les efforts français en propulsion à plasma.
Depuis 1996, c'est à dire quelques années après les premiers contacts entres les ingénieurs du Cnes et de Snecma avec le professeur A. I. MOROZOV, père des propulseurs à effet Hall, ce GdR a engagé des recherches en associant 13 équipes de scientifiques travaillant à la mise au point de simulations numériques et à la mesure de données expérimentales. Les laboratoires concernés sont à Orléans : ICARE, le GREMI, le CRMHT, le LPCE ; à Bourges : le LASEP ; à l'Ecole Polytechnique : le CPHT et le LPTP ; dans les Universités de Versailles : le LGeMAC ; d'Orsay : le LPGP ; de Toulouse : LAPLACE ; de Provence : le LPIIM ; de Grenoble : le LSP et de Nancy : le LPMIA. Le CNES, le CNRS et la SNECMA apportent un soutien financier important et constant à ces travaux de recherche.

Le moyen d'essais PIVOINE-2G de l'institut ICARE
Les activités expérimentales sont menées dans le moyen national d'essais PIVOINE-2G à l'Institut ICARE du CNRS d'Orléans dont les capacités du système de pompage cryogénique viennent d'être portées à 150 000 l/s en xénon afin de pouvoir étudier dans des conditions de vide optimales des propulseurs fonctionnant avec une puissance de 5-10 kW et un débit de xénon atteignant 20-25 mg/s (figure 5). Cet outil de recherche, de par ses caractéristiques et de par les moyens de diagnostics dont il dispose, peut être considéré actuellement comme le plus performant en Europe.
La démarche scientifique du GdR s'appuie également sur des échanges réguliers et fructueux avec de nombreux instituts étrangers, en particulier ceux de Moscou (MAI, RIAME, MIREA, RRC Kurchatov), de Pologne (IPPT) et d'Ukraine (KhAI).

IV. Les missions spatiales

La mission SMART-1

Un double objectif
La mission SMART-1 (« Small Missions for Advanced Research in Technology ») de l'Agence Spatiale Européenne, la première du genre, visait deux objectifs principaux :
• un objectif technique : tester de nouvelles technologies en propulsion et en communication ;
• un objectif scientifique avec la cartographie détaillée de la surface lunaire.
Cette mission s'est déroulée sur 3 ans depuis le lancement de la sonde par une fusée Ariane 5, le 27 septembre 2003, jusqu'à l'impact programmé de la sonde sur le sol lunaire, le 3 septembre 2006 (figures 6 et 7).

Une première
La sonde (1 mètre cube de volume, 367 kg au décollage, dont 19 kg de charge utile répartie sur 8 instruments) était équipée du propulseur à effet Hall PPS®1350-G développé par Snecma.
C'est la première fois dans l'histoire de la conquête spatiale

qu'une sonde interplanétaire était propulsée par un moteur à plasma (la sonde américaine Deep Space One, lancée en 1998, était équipée d'un moteur ionique à grilles). Grâce à son moteur à plasma délivrant 68 mN de poussée et 1640 s d'impulsion spécifique (Isp) pour 1190 W de puissance fournie par des panneaux solaires, la sonde SMART-1 a parcouru plus de 100 millions de kilomètres en consommant seulement 82 kg de xénon.

Des records

Au passage, le propulseur à plasma a battu deux records : 4958 heures de tir cumulées et un tir en continu de 240 heures. Le PPS®1350-G fonctionne nominalement à 1500 W et délivre alors une poussée de 88 mN. Ce propulseur est cependant capable de fonctionner à la fois en modeforte poussée (jusqu'à 145 mN en laboratoire) et en mode Isp (3100 s en essais) avec un rendement compris entre 45 % et 60 %.

Fig. 6 - Photographie d'un cratère double prise par la camera AMIE de SMART-1 le 2 septembre 2006 soit 2 jours avant l'impact

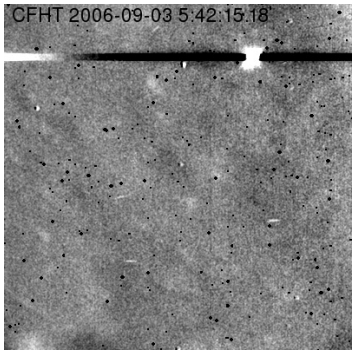

Fig. 7 - Photographie infra-rouge de l'impact lunaire de Smart-1 dans le Lac de l'Excellence, le 3 septembre 2006 (image Canada-France Hawaï Telescope)

De plus, il détient le record en terme de durée de vie (plus de 10500 heures au point nominal sans défaillance et sans dégradation notable des performances).

La propulsion à effet Hall validée

La mission SMART-1 représente une étape importante en validant l'emploi de la propulsion à effet Hall pour les missions interplanétaires et en démontrant que ce type de propulsion électrique offre un gain en masse d'ergol et une souplesse sur les fenêtres de tir, et permet de couvrir de longues distances et avec une manoeuvrabilité et une flexibilité accrues.

Les missions à venir, plus ambitieuses en terme de taille, de masse des vaisseaux et de distance à parcourir, nécessitent le développement de moteurs plus puissants et par conséquent de plus grandes dimensions.

Les missions du futur

Transfert d'orbite

Les propulseurs à effet Hall seront désormais couramment employés pour le maintien à poste, le contrôle d'attitude et la désorbitation en fin de vie des satellites géostationnaires de télécommunication.

Ils peuvent aussi être utilisés occasionnellement pour éviter une collision avec un débris ou pour compenser une défaillance lors de la mise sur une orbite de transfert. On propose aujourd'hui aux opérateurs d'utiliser la propulsion électrique pour effectuer les manœuvres de transfert d'une plateforme de l'orbite basse de parking vers l'orbite de travail (GEO ou non). En réalité, ces manœuvres seraient réalisées en combinant propulsion chimique et électrique ; le moteur électrique servirait à effectuer la partie finale du transfert. Le même moteur serait ensuite utilisé durant toute la durée de vie du satellite pour le contrôle de trajectoire.

Le transfert d'orbite « électrique » nécessite la mise au point de propulseurs à forte puissance capables de fournir plusieurs centaines de mN de poussée, tout en étant capable d'atteindre une impulsion spécifique de l'ordre de 3000 s pour le maintien à poste. Le gain de masse serait ainsi de plusieurs centaines de kg tout en garantissant des périodes de transfert de 1 à 2 mois, compatibles avec les attentes des opérateurs. Une telle technologie présente un intérêt en particulier pour les futures plateformes de télécommunication géostationnaires à très grande capacité, destinées au transfert de données à haut débit pour Internet et la télévision numérique à haute définition.

Le démonstrateur technologique PPS®X000, en cours d'essais chez Snecma et au GDR, et dont l'étude est une des priorités du GdR, répond parfaitement à ces besoins. Il préfigure un propulseur, le PPS®5000, conçu pour fonctionner à 5 kW ; il est capable de délivrer 300 mN de poussée ou 2500 s d'Isp. Des tests conduits récemment dans le moyen d'essais PIVOINE-2G ont permis d'atteindre 400 mN ou 3200 s à 7 kW, démontrant ainsi la robustesse et les capacités duales du PPS®X000.

Exploration planétaire robotisée

Les agences spatiales envisagent à l'horizon 2015-2020 des missions d'exploration vers des planètes du système solaire distantes de plusieurs centaines de millions de km telles que Jupiter, Saturne et Neptune.

Sur le plan théorique, la propulsion à plasma est bien adaptée à ce type de voyage interplanétaire en terme de consommation et de durée. En pratique, cela demande la mise au point d'une nouvelle génération de moteurs de grande taille capables de fonctionner à 8-10 kW pour fournir typiquement 400 mN de poussée ou 4000 s d'Isp pendant 3 à 4 ans.

Le PPS®X000 de Snecma devrait permettre de développer 400 mN mais il est peu probable que la version actuelle puisse atteindre 4000 s d'Isp sur une longue période. On pourrait donc s'orienter vers un moteur de plus grandes dimensions à l'architecture dérivée de celle du PPS®X000.

Les américains quant à eux proposent deux propulseurs à effet Hall susceptibles de répondre aux besoins : le 173M de la NASA (_ 5 kW) (figure 8) et le T220HT de Pratt & Whitney. Ce dernier peut fonctionner jusqu'à 20 kW et fournir 500 mN de poussée. Le propulseur russe SPT140 (_ 5 kW) de Fakel est également un candidat potentiel.

Des grappes de propulseurs

Le défi technologique à relever ne s'arrête pas à la conception de propulseurs à effet Hall de forte puissance. En réalité, la poussée requise pour les missions d'exploration planétaire nécessite de combiner plusieurs propulseurs sous forme de « clusters » et de les faire fonctionner ensemble. Des calculs récents montrent qu'une charge utile élevée peut-être délivrée

Fig. 8 - Propulseur à effet Hall 173 M de la NASA qui fonctionne à une puissance nominale de 5kW

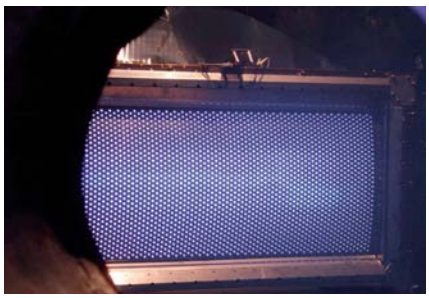

Fig. 10 - Faisceau d'ions du moteur ionique à grilles de forte puissance HiPEP de la NASA (12 kW – 0,3 N – 6000 s)

dans des temps raisonnables à l'aide de plusieurs propulseurs :
– Jupiter : 2000 kg en 4 ans avec 3 moteurs ;
– Saturne : 1900 kg en 6 ans avec 3 moteurs ;
– Neptune : 1250 kg en 11 ans avec 4 moteurs.
Cependant, le fonctionnement des clusters ne va pas sans poser de problèmes : interactions entre faisceaux d'ions, refroidissement, systèmes de contrôle…

Cargos lunaires et martiens
En support à l'exploration par l'homme de la Lune et de Mars, les agences spatiales prévoient la réalisation de cargos pour acheminer fret et vivres. Les chiffres avancés sont impressionnants : un aller-retour Terre-Lune en 11 mois et un aller-retour Terre-Mars en 26 mois avec comme charge utile 30 t pour la Lune et 65 t pour Mars. La propulsion à plasma est envisagée car elle permettrait de réduire substantiellement la masse du véhicule et d'effectuer plusieurs allers-retours avec un seul plein.
La poussée nécessaire pour de telles missions est de l'ordre de 25 N ce qui signifie que la puissance électrique nécessaire avoisine les 1 MW. Pour ces cargos, on resterait dans

Fig. 9 - Propulseur à effet Hall 457M de la NASA. Ce propulseur a fonctionné avec du krypton à 75 kW. Il a délivré 2,95 N de poussée et atteint une Isp de 2900 s

le cadre de la propulsion électrique solaire avec des panneaux de 3000 m² de surface. Si la technologie des panneaux est déjà au point, ce n'est nullement le cas des propulseurs à plasma. On parle de moteurs de 40 cm de diamètre capables de fonctionner à 25 kW afin de délivrer 650 mN de poussée et 6000 s d'Isp. Les scientifiques envisagent des architectures particulières à double-étage et l'utilisation du bismuth comme ergol à la place du xénon. De plus, pour atteindre les performances requises, il s'agirait de maîtriser le fonctionnement de clusters de plusieurs dizaines de propulseurs !

V. Conclusion et Perspectives

Pour terminer, il est légitime de se pencher sur l'emploi de la propulsion à plasma dans le cadre des vols habités.
Les contraintes en terme de durée du voyage sont très fortes car la durée de vie d'un être humain dans l'espace est limitée à quelques dizaines de mois à cause de l'intense bombardement issu de radiations diverses (rayons X, rayons gamma, particules a…) ce qui signifie que la poussée délivrée doit être importante, probablement plusieurs centaines de Newtons. Autrement dit, la puissance à fournir serait de plusieurs dizaines de MW ce qui est irréaliste à l'aide de panneaux solaires d'autant plus que l'emploi de l'énergie solaire est exclu pour des missions aux confins du système solaire.
En conclusion, en plus de demander la mise au point de nouveaux concepts de propulseurs à plasma, les vols habités « électriques » nécessiteront l'utilisation de réacteurs nucléaires embarqués.

André BOUCHOULE, Olivier DUCHEMIN, Michel DUDECK, Stéphane MAZOUFFRE

Editeur
• **Association Aéronautique et Astronautique de France**
3AF – 6, rue Galilée, 75016 Paris
Tél. : 01 56 64 12 30
Fax : 01 56 64 12 31
www.aaaf.asso.fr

Directeur de Publication
• **Michel SCHELLER**

Rédacteur en chef
• **Khoa DANG-TRAN**

Comité de rédaction
• **Michel de la BURGADE, Philippe JUNG, Jean TENSI**

Rédaction
Tél. : 01 46 73 37 80
Fax : 01 46 73 41 72
E-mail : lettre@aaaf.asso.fr

Conception
• **Khoa DANG-TRAN, Sophie BOUGNON**

Imprimerie
• **SB Imprimerie**

Réalisation
• **Sophie BOUGNON**

Dépôt légal
2ème trimestre 2007

Crédits Photos :
Canada-France Hawaï Telescope, CSTB, ESA, ICARE, JPL, NASA

Ont notamment contribué à ce numéro : Fernand d'AMBRA, André BOUCHOULE, Olivier DUCHEMIN, Michel DUDECK, Hubert GOSSOT, Philippe JUNG, Guy LEBEGUE, Eric LEBEGUE, Laurent LEBEGUE, Jean-Yves LONGERE, Stéphane MAZOUFFRE.

ISSN 1767-0675 / Droit de reproduction, texte et illustrations réservés pour tous pays