



**ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE**  
**Commission Energétique**



**Prospective énergétique embarquée :  
 Plates-formes aéronautiques et spatiales (civiles et militaires)**

**Document demandé par la Mission Scientifique, Technique  
 et Pédagogique, Ministère de la Recherche**

Auteurs :

EADS Space Transportation : Patrick Farfal (Vice Président Commission Energétique)  
 Airbus France : Christian Fabre ; Alain Chevalier  
 SNPE Matériaux Energétiques : Christian Pérut ; Pierre-Guy Amand (Président Commission Energétique)  
 Onera : Jean-Pierre Taran  
 CNRS : Claude Lamy.

## **Sommaire**

- 1. Introduction**
- 2. Etat de l'art - Besoins actuels et futurs pour les véhicules spatiaux et les avions civils**
- 3. Technologies et disciplines-clefs**
  - 3.1 Chimie de la propulsion et Matériaux énergétiques pour les plates-formes spatiales civiles et militaires ; enjeux à moyen et long termes
  - 3.2 Stockage et génération électrique à bord des véhicules spatiaux et des avions civils
  - 3.3 Apport de la métrologie
  - 3.4 Gestion de l'énergie bord des véhicules spatiaux et des avions civils
- 4. Défis technologiques**



## ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE Commission Energétique



### 1. Introduction

L'énergétique concerne de nombreuses technologies touchant à l'électrotechnique, l'électronique, la mécanique, la chimie, l'électrochimie, etc., ... Dans les domaines aéronautiques et spatiaux, civils et militaires, la gestion de l'énergie embarquée constitue un véritable enjeu : stockage, conversion, restitution d'énergie à bord, employée à la propulsion et au fonctionnement des équipements et des commandes (actionneurs, etc.).

Les technologies émergentes de l'énergétique constituent un axe majeur de travail pour l'optimisation des architectures des plates-formes aéronautiques et spatiales ; la gestion de l'énergie embarquée et les technologies associées ont des effets induits de premier ordre sur les performances du système (i.e. autonomie, célérité, masse, volume, ...) et sur les ambiances générées.

### 2. Etat de l'art - Besoins actuels et futurs pour les véhicules spatiaux et les avions civils

Les principaux besoins et défis des lanceurs spatiaux sont actuellement l'augmentation de robustesse et la diminution des coûts récurrents, associées au confort des charges utiles. En matière d'énergie propulsive et pyrotechnique, il ne faut donc pas s'attendre à court ni moyen terme à des évolutions technologiques importantes, en dehors d'une maîtrise toujours accrue de fiabilité et de sécurité et d'une meilleure compréhension des phénomènes. A long terme, la versatilité accrue des futurs lanceurs, largement fonction de la demande, les missions de longue durée, nécessiteront de considérer de nouveaux ergols (liquides, cryotechniques ou non, et solides), et de revoir les besoins des systèmes fluidiques et du stockage associé (hélium), rendus plus complexes par la variété des missions.

En termes d'énergie électrique à bord des lanceurs, différentes évolutions se font jour depuis quelques années, notamment le besoin de nouvelles sources d'énergie pour les actionneurs électriques de pilotage ; cela rejoint le concept de l'avion plus électrique (More Electric Aircraft). D'une façon plus générale, la variété des missions des lanceurs, notamment les missions longues, va imposer à moyen terme de considérer des technologies électrochimiques nouvelles, en remplacement des technologies classiques qui révèlent dès maintenant leurs limites.

En ce qui concerne le domaine des avions civils, la tendance actuelle est une augmentation significative de la demande de puissance électrique embarquée (jusqu'au delà de 1000 kW pour les nouveaux avions 300 PAX). Cela s'inscrit dans une problématique d'amélioration globale continue avec des systèmes optimisés (remplacement quand c'est possible des systèmes « tout hydraulique » ou « tout pneumatique » par des systèmes « tout électrique », « électro-hydrauliques » ou « électro-pneumatiques »).

Aussi, une recherche intensive est elle menée (entre autres exemples), sur de nouveaux types d'actionneurs électro-hydrauliques, sur des starters/générateurs électriques, sur des architectures sans prélèvement d'air moteur, ainsi que sur les moyens de réduire les masses (nouveaux matériaux) et la consommation électrique des équipements.

A noter toutefois qu'une analyse fine des avantages et des inconvénients d'une architecture plus électrique doit être faite très en amont (et au cas par cas) afin d'évaluer correctement son intérêt.

A titre d'exemple on pourra inscrire au chapitre des avantages, que l'installation et la ségrégation des systèmes électriques sont généralement plus aisées, ce qui est, sans nul doute, un critère des plus intéressants dans un environnement restreint comme la cabine d'un avion et où la notion primordiale de sécurité entraîne la nécessaire duplication des systèmes essentiels.



## ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE Commission Energétique



Au chapitre des inconvénients cette fois, on notera que la suppression éventuelle du prélèvement d'air moteur nécessiterait d'installer à bord (entre autres choses) un compresseur pour assurer le conditionnement de la cabine. Or ce compresseur aurait sans nul doute un rendement plus faible que celui, remarquable, du compresseur d'une turbomachine aéronautique, qui a fait l'objet de développements importants sur plusieurs décennies. Cela sous-entend de facto que le gain espéré, lié au gain de masse dû à la suppression de la tuyauterie d'air comprimé reliant les moteurs au système de conditionnement, serait largement contrebalancé (voire annulé) par le nécessaire dimensionnement plus important du nouveau système du fait de la différence en termes d'efficacité.

De la même façon, le fait de ne plus prélever d'air sur les moteurs n'amènerait de gain de consommation de carburant que si la production d'énergie électrique, correspondant au besoin du compresseur de conditionnement d'air, était réalisée autrement que par une augmentation de la puissance d'une génératrice couplée sur les turbo machines (moteurs et Auxiliary Power Units ou APU).

On peut ainsi envisager l'utilisation par exemple de piles à combustible qui, outre leur capacité à générer de la puissance électrique, présentent également certains autres avantages indéniables comme ceux résultant de la production de chaleur et d'eau, potentiellement utilisables à bord.

Mais cela conduit inévitablement à s'intéresser aussi au mode d'alimentation en hydrogène de ces piles, à leur rendement intrinsèque global, au surpoids éventuel généré par l'installation de tels systèmes, à la traînée induite par l'installation d'une entrée d'air dédiée, etc.

On voit donc que le sujet de l'avion plus électrique est complexe, et ne peut être traité qu'en raisonnant de façon globale afin de bien identifier tous les tenants et les aboutissants des différentes approches envisagées.

### **3. Technologies et disciplines-clefs**

#### **3.1 Chimie de la propulsion et Matériaux énergétiques pour les plates-formes spatiales civiles et militaires : enjeux à moyen et long termes**

A l'horizon 2010, les technologies émergentes dans le domaine de la propulsion à carburant solide des vecteurs civils et militaires seront issues de travaux qui relèvent principalement d'une démarche incrémentale relevant plus de l'amélioration continue des systèmes existants que d'une véritable rupture technologique. Ceci est lié :

- à la contrainte de sûreté imposée par les utilisateurs finaux: sûreté pyro-nucléaire pour les missiles stratégiques, sécurité du pas de tir pour les lanceurs spatiaux, le caractère MURAT (MUnitions à Risques ATtenués) des missiles tactiques (moteurs et tête). Cette contrainte est également très présente dans les systèmes énergétiques développés pour le domaine connexe civil (automobile, aéronautique) où les effets accidentels doivent souvent être contenus dans le système,
- une puissance de calcul informatique en constante progression qui permet d'utiliser des modèles complexes et d'accéder à des simulations de plus en plus performantes. Cette puissance informatique donne aux bureaux d'étude la possibilité de répondre aux besoins en s'appuyant en particulier sur des géométries de chambres de moteurs plus complexes plutôt que de faire appel à de nouveaux produits,
- à la contrainte du « lanceur tranquille » (confort de la charge utile, mais pas seulement), satisfaite grâce à la maîtrise des ambiances dynamiques par contrôle des oscillations de poussée.

Citons néanmoins quelques technologies issues des travaux de recherche récents qui arriveront à maturité pour de futurs développements :



## ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE Commission Energétique



- de nouvelles compositions d'ergols solides basées sur de nouvelles molécules énergétiques permettant d'apporter une réponse :
  - ❖ au compromis performance/vulnérabilité, avec des gains attendus de 15 à 30% « d'énergie » en fonction des systèmes finaux d'utilisation,
  - ❖ adaptée pour de nouveaux dispositifs de fonctionnement des systèmes (modulation de poussée, vannage des gaz) ;
- l'application aux moteurs spatiaux des procédés de fabrication de petits chargements de propergols en continu développés en sécurité automobile. Ces procédés permettent de diminuer le coût de possession des équipements et d'accroître la sécurité industrielle dans la fabrication des chargements ;
- A horizon 2010, toujours, on vise le lanceur « zéro choc », qui nécessite de repenser la technologie (e.g. séparation continue non sécable ou discrète utilisant des mécanismes sans choc induit, en lieu et place de pyrotechnie classique à base de technologie détonique).

A l'horizon 2020-2030, les technologies de propulsion devront répondre aux critères suivants :

- plus de performances énergétiques (à décliner en fonction du système final d'utilisation) et une sensibilité moindre (les exigences en matière de sûreté ne vont pas décroître, bien au contraire),
- une sûreté de fonctionnement accrue en conception pour réduire le coût de développement,
- un coût de possession réduit et/ou une durée de vie accrue,
- des technologies qui tiennent compte de l'environnement (les « ergols verts », le démantèlement est un service associé au produit).

Pour répondre à ces besoins, les technologies émergentes à l'horizon 2020 – 2030 doivent être en rupture franche avec les technologies existantes. Celles qui apparaissent les plus prometteuses sont :

- de nouvelles structures moléculaires (HEDM = High Energy Density Matter, molécules poly-azotées....) qui présentent un potentiel de gain énergétique de plus de 50%, par rapport au meilleurs composés actuels (azote polymérique, etc.) avec un potentiel énergétique multiplié au moins par 2 par rapport aux meilleurs composés actuels,
- les nanomatériaux et les procédés associés: l'utilisation de produits énergétiques nanométriques devrait permettre d'augmenter les performances énergétiques des propergols sans accroître leur sensibilité voire en la diminuant. Si certaines matières premières sont déjà disponibles à cette échelle, il apparaît que les équipements et les procédés actuels ne permettront pas d'apporter une réponse adaptée. Il faut donc repenser dans leur ensemble les procédés associés à la synthèse de ces composés et à la réalisation d'ergols contenant des éléments nanométriques. L'enjeu est à ce niveau,
- de nouvelles formes d'ergols (gélifiés, gélés),
- la génération d'hydrogène : il doit y avoir une réponse énergétique sous forme solide à la question de délivrer H<sub>2</sub> de manière maîtrisée.

### 3.2 Stockage et génération électrique à bord des véhicules spatiaux et des avions civils

L'énergie électrique embarquée à bord des systèmes aérospatiaux est essentiellement fournie par des piles (systèmes non rechargeables), des accumulateurs (systèmes rechargeables), des panneaux solaires photovoltaïques (systèmes primaires) et des super capacités (éléments de stockage). On demande à ces systèmes une grande fiabilité, une densité d'énergie importante (> 100 Wh/kg), une souplesse d'utilisation dans



## ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE Commission Energétique



des conditions difficiles (température de  $-50^{\circ}\text{C}$  à  $+70^{\circ}\text{C}$ , accélération de quelques dizaines de g, résistance aux vibrations et aux chocs, ...) et un coût raisonnable ( $< 5\,000\ \text{€}/\text{kW/h}$ , coût des batteries Ag/Zn utilisées actuellement). Pour leur fiabilité et leurs performances, les systèmes basés sur le lithium (piles  $\text{LiSOCl}_2$ ,  $\text{LiSO}_2$ ,  $\text{LiMnO}_2$  et accumulateurs Li-ion, Li-métal polymère) font l'objet de recherches intenses. Les accumulateurs Li ion présentent des caractéristiques intéressantes : des densités d'énergie ( $150\ \text{Wh/kg}$ ,  $300\ \text{Wh/dm}^3$ ) et de puissance ( $500$  à  $1500\ \text{W/kg}$ ,  $1000$  à  $3500\ \text{W/dm}^3$ ) élevées, une très grande réversibilité (97%), un nombre de cycles élevé (plusieurs milliers), une durée de vie élevée (10 ans), mais le coût des matériaux en fait des systèmes chers : d'où des recherches sur les matériaux de cathode à base d'oxyde mixte - Co, Ni, Al, Mn -, ou de phosphate de Fe. Par ailleurs, les super-capacités constituent des éléments de stockage intéressants pour délivrer des impulsions de courant courtes ( $<100\ \text{ms}$ ) : densité de puissance élevée (quelques  $10\ \text{kW/kg}$ ), mais densité d'énergie faible (quelques  $\text{Wh/kg}$ ). Cela implique des recherches sur les électrolytes (non aqueux, de stabilité élevée  $> 3\ \text{V}$ ) et sur les matériaux d'électrodes (à base de carbone) pour augmenter la capacité spécifique, proportionnelle à la surface spécifique ( $> 1000\ \text{m}^2/\text{g}$ ).

Enfin, à plus long terme (horizon 2010-2020), les piles à combustible (PAC), générateurs primaires, pourront fournir à bord les puissances nécessaires pour satisfaire les besoins électriques : quelques kW à quelques 100 kW. Les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC) ont atteint une maturité technologique ( $1\ \text{kW/kg}$  et  $1,5\ \text{kW/dm}^3$ ) suffisante pour les applications à l'automobile, mais leur coût reste élevé ( $> 5000\ \text{€}/\text{kW}$ ). Cela conduit à des recherches sur les matériaux d'électrolyte (membranes protoniques) et d'électrodes (catalyseurs à base Pt), et sur le système (auxiliaires, contrôle commande, etc.). Le combustible à bord déterminera le type et le coût du générateur PAC : avec de l'hydrogène pur (engins spatiaux) les PEMFC et les piles alcalines (AFC) sont les plus adaptées, tandis qu'avec du kérosène à bord (avions) la complexité et le coût du processeur de combustible pour fabriquer  $\text{H}_2$  orienteront le choix soit vers les PEMFC (tolérance au CO  $< 10\ \text{ppm}$ ), soit vers les piles à oxyde solide (SOFC) où CO est l'un des combustibles possibles.

Pour les avions civils, l'énergie électrique est produite par l'intermédiaire de génératrices entraînées par les turbomachines (moteurs ou APU). Cette énergie est donc directement issue de la combustion du carburant stocké à bord de l'avion. En cas de dysfonctionnement majeur (perte totale de la puissance électrique et hydraulique), il existe un moyen auxiliaire mécanique appelé RAT (Ram Air Turbine) pour produire suffisamment d'énergie afin de permettre la poursuite du vol. Un bras supportant une hélice est déployé à l'extérieur de l'avion. Le vent relatif lié au déplacement met en rotation cette hélice qui, reliée à une pompe hydraulique, entraîne la pressurisation d'un des trois circuits. Outre la récupération d'une puissance hydraulique suffisante, la pressurisation de ce circuit hydraulique autorise également, par l'intermédiaire du couplage d'une génératrice dédiée, d'assurer une production électrique minimale. A noter que la production d'énergie globale (quelques dizaines de kW) est étroitement liée à la vitesse de l'avion. En dernier recours, des batteries (systèmes rechargeables), peuvent assurer une fourniture d'énergie suffisante pendant une durée limitée.

Dans le cadre d'activités de recherche, des études sont actuellement en cours pour évaluer la faisabilité et l'intérêt que présenterait le remplacement de la RAT (et éventuellement des batteries derniers secours), par des piles à combustible. Le niveau de puissance demandée semble compatible avec ce que la technologie des piles est en mesure d'offrir actuellement ou à moyen terme.

Néanmoins de nombreuses questions restent posées, notamment en ce qui concerne le mode (et la forme) de stockage de l'hydrogène à bord pour l'alimentation en combustible de ces piles. Des études sont également faites sur cette problématique particulière (réservoir cryogénique pour hydrogène, stockage d'hydrogène gazeux, stockage chimique sous forme solide, reformage de combustibles divers...).



## ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE Commission Energétique



La fourniture d'énergie, toujours à partir de piles à combustible pour assurer le conditionnement d'air ou pour le remplacement éventuel de l'APU, est également envisagée. Cependant du fait du niveau d'énergie plus important nécessaire pour ces applications, cela ne devrait intervenir (si toutefois l'intérêt est bien démontré) que dans un deuxième temps.

Les types de piles à combustible actuellement estimées comme étant les plus prometteuses pour une application aéronautique sont les PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) fonctionnant à basse température et les SOFC (Solide Oxide Fuel Cell) fonctionnant à haute température.

### 3.3 Apport de la métrologie

Les mesures physiques constituent un outil indispensable à tout programme moderne de R&D sur les matériaux énergétiques. Sur le plan pratique, elles permettent en effet :

- de visualiser les écoulements de façon qualitative ou semi quantitative, permettant de comprendre le mélange de deux réactifs, l'accrochage d'une flamme, le développement d'une couche limite, ou les causes d'une instabilité,
- de mesurer ponctuellement, en volume ou sur une paroi et de façon quantitative température, vitesse et composition chimique des gaz, notamment des produits hors d'équilibre d'une explosion.

Elles jouent un rôle crucial dans trois phases clés :

- compréhension des phénomènes physico-chimiques au lancement des études, préalablement au développement des modèles,
- validation des codes de simulation numérique,
- surveillance et contrôle des réacteurs industriels ou des paramètres d'un engin terrestre ou volant.

Pour les deux premières phases, qui sont principalement du ressort du laboratoire universitaire ou de l'institut de recherche, on privilégie le recours aux méthodes optiques qui sont non intrusives, précises, spatialement et temporellement résolues. On citera pour les mesures ponctuelles en volume la Diffusion Raman anti-Stokes Cohérente (DRASC) qui est très précise et la Fluorescence Induite par Laser (LIF), semi quantitative. Cette dernière est également employée pour l'imagerie en température et la visualisation de radicaux. Les mesures de vitesse sont réalisées au moyen des techniques de Particle Image Velocimetry (PIV) et de Doppler Global Velocimetry (DGV). L'optique permet aussi les mesures pariétales de température et de pression grâce aux peintures sensibles à la température (TSP) ou à la pression (PSP) ; ces mesures requièrent également le recours au laser et sont de précision moyenne. Elles offrent cependant le grand avantage de couvrir des champs étendus de l'ordre du m<sup>2</sup> et sont étalonnables à l'aide de thermocouples ou de capteurs de pression classiques.

Pour la troisième phase qui concerne le contrôle du fonctionnement de machines diverses et qui est généralement du ressort du centre d'essai ou de l'industrie ces méthodes sont trop onéreuses ou délicates. On leur préfère généralement les sondes classiques (thermocouples, fluxmètres, sondes de Pitot, etc.) disposées à des endroits judicieusement choisis. Ceci ne peut cependant dispenser de les étalonner dans les configurations finales d'usage au moyen des mesures optiques afin d'en valider l'emploi.

Les méthodes optiques ont accompli d'importants progrès depuis trente ans, et ces progrès se poursuivront avec l'arrivée de sources laser compactes et fiables et l'élargissement du domaine spectral vers l'infrarouge et l'ultra-violet. Par ailleurs, il semble important de développer les sources à rayons X pour l'étude des combustions



## ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE Commission Energétique



diphases, notamment dans les propulseurs à ergols solides. Des résultats prometteurs sont obtenus sur les explosifs avec la source synchrotron de l'Institut Budker de Novosibirsk.

### 3.4 Gestion de l'énergie à bord des véhicules spatiaux et des avions civils

Le besoin en gestion de l'énergie à bord des lanceurs et véhicules spatiaux est apparu il y a quelques années. La gestion de l'énergie embarquée (on board power/energy management) n'est d'ailleurs qu'un aspect de la « gestion véhicule » (vehicle management) dont le développement a suivi une loi quasi-exponentielle, à mesure de l'augmentation de complexité des systèmes.

D'abord limitée à la « gestion de la rareté » de l'énergie embarquée (économie de l'énergie à bord, par définition limitée car fournie par des piles et des accumulateurs), avec l'utilisation d'équipements « distributeurs » (Power Distribution Units), la gestion de l'énergie à bord est devenue une fonction résolument active du système : le besoin est d'utiliser au mieux des ressources, limitées (piles) ou non (panneaux solaires), à disponibilité continue (piles) ou non (accumulateurs, panneaux solaires), dans un environnement devenu très complexe : diversité des phases et modes de fonctionnement des systèmes, profils de consommation et environnement thermique éminemment variables, nécessité d'un contrôle thermique actif.

La gestion de l'énergie embarquée, sur des véhicules automatiques auxquels on demande d'assurer de plus en plus de fonctions, sera désormais une fonction à part entière du système véhicule, dont le caractère incontournable ne peut que s'accroître.

Cette évolution s'accompagne du caractère de plus en plus marqué de l'interpénétration des disciplines : contrôle thermique, génération et stockage électriques, compatibilité électromagnétique, gestion à bord (par le logiciel de vol) et sûreté de fonctionnement. Outre les véhicules spatiaux de transport, de type Automated Transfer Vehicle, les missions de longue durée pourraient amener à confirmer cette tendance sur les lanceurs (hybridation des sources d'énergie).

Il n'est plus possible de mener séparément les études et les développements dans chaque discipline, en attendant la sanction finale de l'intégration : le recours à la simulation, comportementale et physique, est devenu indispensable au parcours du cycle de conception validation. On voit alors se dessiner une véritable maquette numérique (virtual model) des sous-systèmes en interaction, enrichie et validée progressivement au long du cycle de développement, et qui, étendue à l'ensemble du système, devrait déboucher à terme sur le concept de véhicule virtuel.

Pour l'aéronautique, la problématique de la gestion de l'énergie à bord s'articule surtout autour du besoin d'utiliser au mieux les sources embarquées, avec le souci constant de réduction des coûts globaux d'utilisation. Cela passe par l'évaluation fine des besoins de l'avion en fonction des différentes phases de vol, de façon à ne pas avoir systématiquement un surdimensionnement pour « passer les pics » de puissance, mais plus pragmatiquement de gérer intelligemment la demande. Cette démarche devient d'autant plus nécessaire que les besoins sont en constante augmentation avec en particulier l'apparition et le développement rapide de moyens de communication (vidéo individuelle, téléphone cellulaire, communication Internet,...).



## ASSOCIATION AERONAUTIQUE ET ASTRONAUTIQUE DE FRANCE Commission Energétique



### 4. Défis technologiques

De grandes opportunités de développement de technologies et des méthodologies associées dans le domaine de l'énergétique embarquée se présentent pour répondre aux besoins énergétiques croissants, aux masses et aux volumes plus faibles des équipements embarqués, l'optimisation du rendement énergétique global des futures plates-formes aéronautiques et spatiales :

- le génie électrique, domaine pluridisciplinaire offrant aux véhicules aérospatiaux des architectures plus souples et plus sécurisantes pour assurer leur mobilité et leur évolution,
- la propulsion : mise au point de nouveaux matériaux énergétiques plus performants, plus fiables, plus sûrs, répondant notamment aux besoins d'accroissement de performances, de confort et de sécurité des véhicules spatiaux,
- le développement de nouveaux générateurs électrochimiques plus performants et de moindre coût, notamment les piles à combustible,
- l'hybridation des différentes sources énergétiques embarquées, contributrice de premier ordre au rendement énergétique d'un véhicule,
- le développement d'outils de simulation comportementale et physique pour la validation en amont des performances des systèmes complexes.

### Références bibliographiques:

Recueil de Communications du Symposium AAAF "On-Board Energetic Equipment 2004", Avignon, 18-20 Octobre 2004.