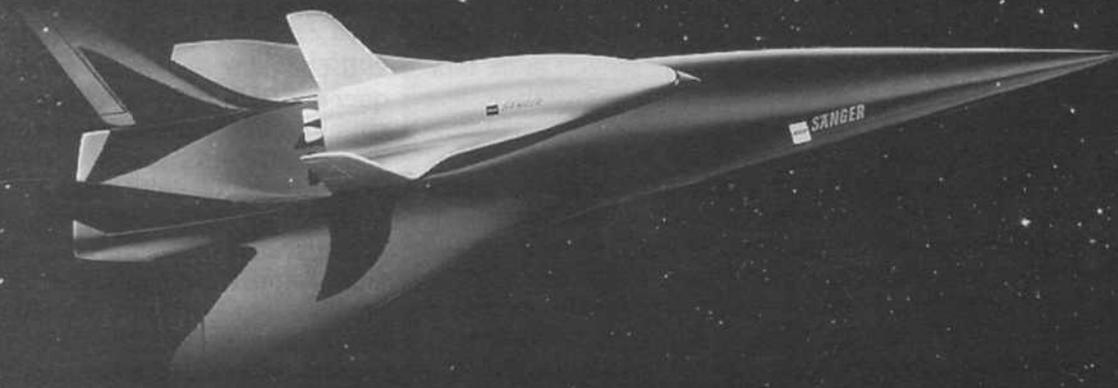


Les avions spatiaux récupérables aérobies

Dans un premier article, paru dans le N° 46 de Fusion, nous avons exposé quelques-uns des principaux problèmes techniques que pose le concept d'avion spatial récupérable susceptible, au siècle prochain, d'ouvrir la voie de la banalisation de l'accès à l'espace. Nous avons mis l'accent sur un concept « intermédiaire » que les Européens pourraient parfaitement développer, en continuité technologique avec le programme Ariane 5. Plus difficile à réaliser sera le concept d'avion spatial récupérable « aérobie » à propos duquel les Européens se trouvent confrontés à un véritable « défi américain »



Philippe Jamet

Le bilan d'ensemble des études présentées sur les concepts « intermédiaires », se situant en prolongement technologique direct des systèmes de transport spatiaux actuels ou en cours de développement, montre qu'il serait déjà possible de gagner quelques étapes au niveau de la réduction du coût du kilo en orbite en faisant appel à des lanceurs semi-récupérables ou récupérables bi ou tri-étages utilisant la technique du vol balistique et des moteurs-fusées améliorés.

Toutefois, ces solutions ont pour défaut une certaine complexité du fait qu'elles multiplient le nombre des opérations à réaliser pour parvenir à la mise en orbite. Chaque étape se traduit par des coûts qui deviennent rapidement fixes et incompressibles une fois un certain niveau de maîtrise technologique atteint, malgré la diminution du poids des matériaux utilisés.

La réduction des coûts serait relativement faible par rapport aux lanceurs consommables. En effet, par exemple, un concept américain classique de type SSTO lourd, envisagé un moment comme une des étapes postérieures au programme navette, n'offre d'intérêt que du point de vue de son énorme capacité de mise à poste en orbite basse (200 à 250 tonnes). Ce concept ne se justifierait que par la nécessité de l'installation rapide d'une importante infrastructure orbitale, à titre de « tête de pont » pour un programme lunaire ou pour emporter des éléments sophistiqués destinés à être intégrés aux centrales solaires SPS en orbite géostationnaire, dont les structures de base auraient été préalablement fabriquées sur la Lune.

On sait aujourd'hui que ce concept de gros SSTO se heurte encore à des problèmes d'intégration des moteurs et des réservoirs et que, même si sa faisabilité devrait être démontrée au début du siècle prochain, il apparaît douteux que sa mise en œuvre puisse se faire à un coût acceptable. Toutefois, en diminuant la capacité

en charge utile, et une fois les technologies maîtrisées et fiabilisées, on gagnerait beaucoup au niveau de la flexibilité opérationnelle par rapport à un lanceur consommable, même s'il ne faut pas s'attendre à une réduction des coûts du kilo en orbite allant au-delà de 30%. Pour l'Europe, la solution des concepts intermédiaires (RRL ou EARL), souhaités un moment par l'ancien directeur de l'ESA Reimar Lüst, permettrait déjà d'engager une politique débouchant sur une totale indépendance en matière d'intervention humaine en orbite.

Cela pourrait se faire parallèlement à des programmes de lanceurs lourds dérivés d'Ariane 5, puisqu'il serait possible, selon Roger Vignelles de la SEP, d'amener en orbite basse des charges utiles de 70 tonnes avec 4 boosters d'appoint. Nous verrions ainsi l'installation en microgravité dépasser le stade de l'expérimentation pour atteindre une certaine masse critique en matière de capacité de production, des opérations de maintenance, la mise en place de petites têtes de pont pour préparer des missions scientifiques lunaires, ainsi que des vaisseaux de sauvetage de type ACRV amarrés à des concepts de type Steams ou EMSI (envisagés par Aerospatiale). Si les moyens financiers étaient dégagés au cours des quinze prochaines années, cette évolution heureuse nous éviterait d'avoir à occuper un simple strapontin dans le cadre des projets de station mondiale de type « Alpha » ou « Russian/US Configuration » où la position des Européens n'est guère favorable face aux velléités américano-russes récemment apparues.

Plus intéressant encore, le moindre niveau de rupture technologique que ces concepts impliquent permettrait de remobiliser rapidement les équipes ayant travaillé sur Hermès et de former rapidement de nombreux jeunes ingénieurs dont les compétences acquises pourraient être utilisées ultérieurement pour relever un tout autre défi ! Sur le papier, le moteur-fusée n'est pas en effet le mode de propulsion idéal ni le plus économique si l'on veut disposer un jour d'un engin spatial totalement récupérable.

La propulsion aérobie

Que ce soit aussi bien pour le SSTO lourd que pour les engins spatiaux récupérables utilisant des moteurs-fusées, la barrière de gain en matière de coût de mise en orbite est de facto limitée à un certain niveau. En effet, pour alimenter le système de propulsion, il faut emporter à la fois le carburant et le comburant et donc comptabiliser la masse structurale des réservoirs. De ce fait, il sera difficile de placer en orbite, par ces moyens, des charges utiles dépassant en poids 5 à 6% de la masse au décollage si l'on a affaire à un mono-étage, et 7% si on fait appel à une solution bi-étage fusée totalement récupérable un peu plus sophistiquée que le concept RRL d'Aerospatiale doté de réservoirs largables. Sans parler, dans le cas d'un bi-étage fusée récupérable, du problème de surcoût occasionné par l'opération de séparation avant la dernière phase de l'ascension vers l'orbite.

Il convient également de remarquer que, dans le cadre des moteurs chimiques, ces performances ne peuvent être atteintes que par des engins utilisant le couple cryotechnique classique (oxygène/hydrogène liquides) et que, seule, l'utilisation de moteurs faisant appel à du propane ou du méthane liquides (plus intéressants théoriquement que l'hydrogène à cause de leur plus forte densité) offre l'opportunité de faire passer un peu au-delà de 8% la masse en charge utile par rapport à la masse au décollage.

D'où l'idée, fort séduisante sur le plan théorique, de faire appel, lors de la traversée de l'atmosphère avant la phase de mise en orbite, à des propulseurs capables d'utiliser directement l'air atmosphérique comme comburant et dits *aérobies*. Pari lucide mais difficile : lucide car, sur le plan théorique, la réduction de quantité de carburant embarqué pourrait permettre d'augmenter la charge utile visée. Difficile aussi parce que, en dépit de l'extrapolation des techniques issues de l'aéronautique militaire de poin-

te, nous ne savons guère réaliser des moteurs allant très au-delà de Mach 5-Mach 6. Nonobstant les probables recherches secrètes, toutes les expérimentations effectuées au sol à des vitesses de Mach 7-Mach 8 l'ont été jusqu'à présent sur des temps très courts, bien inférieurs aux conditions requises pour un vol spatial transatmosphérique, lequel doit atteindre en fin de vol Mach 25 pour parvenir à la vitesse de satellisation.

Toutefois, et ce depuis la fin des années soixante, l'identification des problèmes rencontrés a permis de déterminer les domaines où un important effort de recherche était nécessaire : aérodynamique générale des engins en configuration mono-étage ou lancement de l'étage supérieur par une plate-forme aérienne, aérodynamique des moteurs permettant une entrée d'air plus efficace, formes adéquates des divergents des tuyères pour permettre aux gaz de se détendre de la façon la plus efficace avec possibilité d'y ajouter un système extensible pour augmenter le rapport de détente, modèles idéaux des écoulements subsoniques et supersoniques dans les chambres de combustion, bonne connaissance des températures internes et externes des avions en concordance avec le développement de matériaux adaptés pour le nez, les bords d'attaque, les bords des ailes et les entrées d'air. Ainsi, la viabilité de tels concepts passera non seulement par des progrès sur la motorisation mais également sur le poids et les structures.

D'autre part, nos connaissances sont encore incomplètes en matière d'aérodynamique à grande vitesse, en particulier au moment où les couches d'air supérieures commencent à se raréfier et que l'engin parvient aux très grandes vitesses. Il apparaît que c'est la partie intermédiaire du vol, bien avant la phase de mise en orbite, qui sera la plus dure à réaliser !

L'avion spatial récupérable de troisième génération, qu'il soit mono ou bi-étage, autopropulsé ou semi-autopropulsé comme le Star-H de Dassault, effectue son ascension en mode aérobie, en ricochant sur les couches atmosphériques, tirant l'essentiel de

Hotol : le concept le plus futuriste



Le concept britannique Hotol (Horizontal-Take Off-on Landing), aujourd'hui abandonné au grand dam de ses inspirateurs Alan Bond et Peter Conchie, possède incontestablement le double privilège de l'originalité... et d'avoir suscité le plus grand scepticisme ! Originale en elle-même, la reprise d'une idée sur laquelle ont déjà travaillé par le passé Rolls-Royce et Bristol-Siddeley, à savoir le lancement de l'engin sur une piste à 540 km/h au moyen d'un chariot-fusée guidé par laser, permettant d'économiser une fraction très faible mais non négligeable du comburant embarqué.

Selon les diverses configurations étudiées, le poids de Hotol, navette mono-étage, pourrait aller de 200 à 240 tonnes au départ pour 40 à 42 tonnes à l'atterrissage, ce qui en fait une navette relativement légère à la fois en phase lancement et au niveau de la rentrée atmosphérique. En effet, en n'emportant, en plus de la charge utile, qu'un grand réservoir d'hydrogène et une réserve minimale d'oxygène, Hotol offre l'avantage pour la phase rentrée d'une finesse aérodynamique remarquable (rapport portance/trainée), et de disposer d'une réserve d'hydrogène importante au moment du retour dans l'atmosphère à Mach 25, vers 80-85 kilomètres d'altitude. Une partie de cet hydrogène liquéfié étant alors transformé en gaz, Hotol va alors voir sa masse volumique réduite et, un peu à la manière d'un ballon d'oxygène flottant dans l'air, va de ce fait ralentir relativement tôt et beaucoup plus haut qu'une navette de type Shuttle ou qu'une capsule balistique. L'avantage, du point de vue des protections thermiques, se révèle considérable puisque la température des parties les plus exposées devrait à peine dépasser les 1200°, alors que les mêmes parties de la navette américaine sont soumises à des contraintes atteignant parfois les 1400°. Hotol semble, sur ce point, révolutionnaire puisqu'il fait appel à des matériaux existants : structures sandwich titane/rene 4 résistant à une température de 950° pour la majeure partie de l'avion et protection en carbone pour le nez et les bords d'attaque.

Conçu pour emporter une charge utile de 7 à 8 tonnes en version automatique, Hotol est encore plus étonnant du point de vue de son mode de propulsion et le mystère n'a jamais été levé sur ses moteurs Swallow et Satan. Lancé au départ par le chariot-fusée dont nous avons déjà parlé, Hotol est ensuite propulsé pendant un court laps de temps par un moteur-fusée avant qu'un statoréacteur à combustion supersonique (jusqu'à Mach 5 et 26 kilomètres d'altitude !) ne prenne le relais en mode aérobie jusqu'à la phase de mise en orbite assurée par quatre moteurs-fusées. Le grand problème vient du fait que, pour faire fonctionner un superstato pendant une phase aussi longue, il faut traiter des quantités d'air considérables à la seconde dans les basses couches de l'atmosphère et disposer de compresseurs et séparateurs d'air que la plupart des spécialistes estiment impossibles à réaliser d'ici 25 à 30 ans.

son comburant dans les plus basses couches. Contrairement aux fusées, il n'aura pas à embarquer un poids considérable qui s'additionne à la masse inerte due aux contraintes aérodynamiques et au système d'atterrissage.

Le fait de devoir passer par des domaines de vol successifs de plus en plus élevés implique un propulseur à forte impulsion spécifique dont les parties non actives et les protections thermiques constituent un « poids mort » : plus on veut aller vite et plus les contraintes de puissance impliquent une croissance en masse du propulseur intégré dans la cellule. Un des défis fondamentaux posé par l'avion spatial de troisième génération consiste à trouver la solution optimale pour que la masse du propulseur ne pénalise pas trop la charge utile.

Selon le spécialiste Gérard Laruelle (ex-Onera passé aujourd'hui chez

Aerospatiale), pour maintenir un niveau de charge utile intéressant, l'effort en matière de réduction du poids des structures devrait tendre vers un « indice structural » (rapport masse à sec/masse initiale) de 20%. Il est donc essentiel d'arriver à un bon compromis d'optimisation entre l'aérodynamique générale du transporteur spatial (forme du fuselage), le système de propulsion (aérodynamique des entrées d'air et des tuyères) et la trajectoire.

Le pari de pouvoir mettre en orbite une charge utile résiduelle intéressante et à un prix acceptable suppose donc la résolution d'un certain nombre de contraintes qui sont amplifiées par le mode d'ascension. Après avoir décollé de façon horizontale (ce qui est le plus rationnel), notre avion spatial va effectuer plusieurs changements de direction et d'attitudes pour atteindre progressivement l'orbite désirée. Il va consommer à

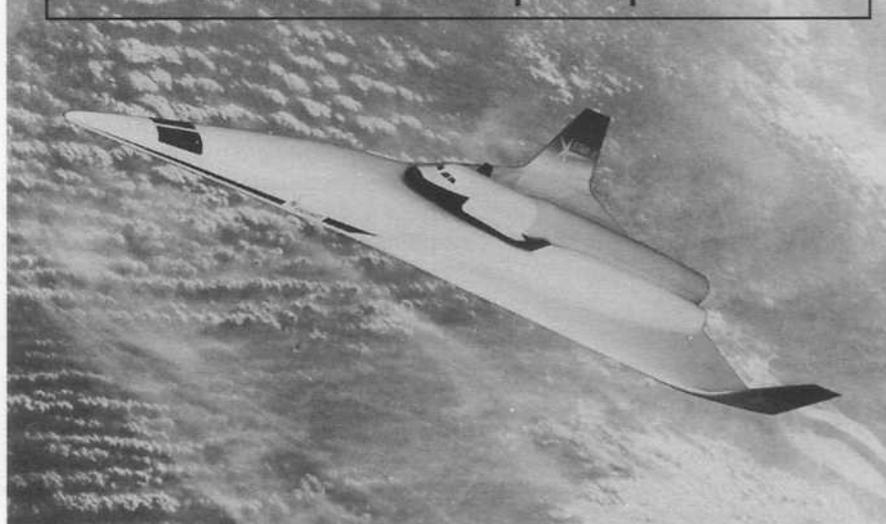
chaque fois un supplément de combustible qu'il faut minimiser sous peine, là encore, d'obérer une fraction de la charge utile potentielle. Le fait de voler un certain temps dans les couches atmosphériques les plus épaisses n'est pas sans conséquences sur le système propulsif qui doit être doté d'une impulsion spécifique élevée. A partir d'un certain seuil de vitesse, et du fait qu'il faut quitter rapidement les basses couches atmosphériques à moins de ne pouvoir parvenir en orbite, tout gain dans ce domaine va exiger un supplément d'énergie disproportionné. Celle-ci accroîtra fortement la traînée de l'avion (c'est-à-dire la résistance qu'il oppose à son déplacement dans l'air), entraînant des conséquences sérieuses sur les systèmes de protection thermique !

Un autre problème se pose par la diminution de la masse volumique de l'air en haute altitude qui pénalise la portance ainsi que les moteurs aérobies, puisque la combustion dépend de la quantité d'air absorbée. Donc, plus on veut voler haut, plus il faut voler vite pour compenser la diminution de la densité de l'atmosphère, d'où la nécessité d'un bon choix, toujours délicat, des voilures pour améliorer la portance.

Une des caractéristiques communes à tous les concepts d'avions spatiaux aérobies envisagés est également de disposer de moteurs « hybrides » ou « combinés », intégrant des modes de propulsion complémentaires correspondant chacun à une phase bien précise du vol, du point de vue de l'altitude et du nombre de machs. On fait généralement appel dans le même moteur hybride à des modes de fonctionnement divers pour propulser l'avion orbital : parfois petit moteur-fusée lors de la phase initiale, ou chariot-fusée (concept Hotol), ou catapulte à vapeur pour faire gagner de la vitesse au départ, puis turboréacteur, statoréacteur à combustion subsonique ou supersonique, moteur-fusée pour la phase terminale de mise en orbite.

Un terme technique revient toujours au niveau des raisonnements sur les moteurs combinés : celui de

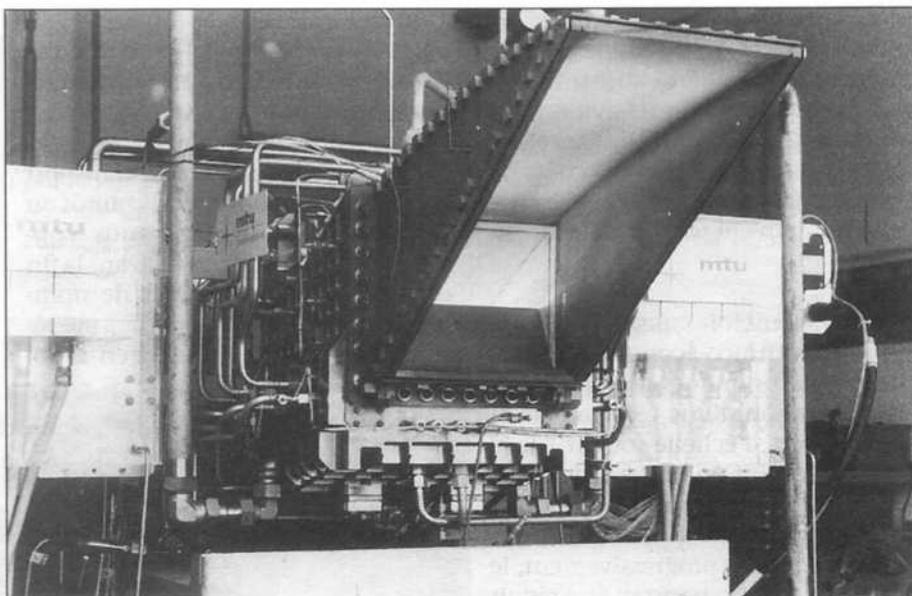
Star-H : un tri-concept complexe



Ayant déjà réfléchi, dans les années soixante, au projet de « Transporteur spatial européen », la société Dassault a, il y a quelques années, proposé à ses ingénieurs de plancher sur ce concept. Par comparaison avec le mono-étage Hotol (qui ne pèse au plus que 240 tonnes au décollage), Star-H dispose d'une masse totale se situant aux alentours de 400 tonnes. C'est en fait un tri-concept associant un engin porteur hypersonique aérobie (turbo-fusée-stato) totalement récupérable et portant sur son dos une double structure, associant une navette de type Hermes à un lanceur consommable classique. Si la réalisation d'un tel concept peut être envisagée à terme, la complexité des opérations à réaliser laisse planer des doutes sur sa viabilité économique par rapport à un lanceur consommable classique. En fait, les études Star-H ont permis aux ingénieurs de Dassault d'identifier un certain nombre de problèmes dans une optique d'études progressives visant à ne pas brûler les étapes vers l'engin spatial totalement récupérable.

statoréacteur. La raison de l'arrivée en force de ce concept est évidente, parce que l'ascension d'un avion spatial couvre plusieurs domaines de vol et que le système propulsif d'un avion ordinaire n'est à même d'en assurer qu'une petite partie. Les turboréacteurs, susceptibles de prendre le relais des moteurs-fusées après la phase de décollage, utilisent des compresseurs d'air, des turbines, et donc des pièces mobiles, mais deviennent inopérants au-delà de Mach 3-Mach 3,5. C'est à ce moment qu'apparaît la nécessité du stato, lequel ne peut être opérationnel qu'à une certaine vitesse, car c'est la vitesse de l'air qui s'engouffre dans sa section divergente qui assure la compression dans ce moteur à pièces fixes.

Le stato se présente comme un concept relativement simple : une prise d'air divergente, complétée pour le freinage et le réchauffement par un diffuseur, une chambre de combustion où le carburant mis en présence de l'air comprimé, lui-même à température et vitesse croissantes, est injecté et brûlé, et une tuyère réactive placée à la sortie de la section convergente du stato. A la sortie de la chambre de combustion, donc à l'entrée de la tuyère, la pression et la température vont décroître mais, sous l'influence de phénomènes « d'élargissement subsonique puis supersonique », la vitesse du gaz va être accélérée d'un facteur considérable, ce qui assure la poussée. On voit donc l'intérêt d'utiliser pour les avions spatiaux le concept *turbo-stato-fusée*, le rôle du stato apparaissant alors évident : prendre à partir de Mach 3 le relais du turboréacteur ou du moteur-fusée assurant le démarrage de l'avion spatial et, dans la formule turbo-stato-fusée, ou encore fusée-stato-fusée, donner le relais à une altitude de 25 kilomètres à un moteur-fusée chargé ensuite de la phase de mise en orbite. Les expériences effectuées, comme tout dernièrement en Russie, ont montré que ce type de moteur peut parfaitement fonctionner jusqu'à Mach 6-Mach 8 (vitesse déjà probablement atteinte par l'avion secret américain Aurora), ce qui est très intéressant car ces vitesses correspondent assez bien à certaines phases intermédiaires du vol de l'avion orbital.



Dans le cadre de son programme Hypersonic Technologies Program, largement financé par le ministère fédéral de la Technologie et impliquant les instituts de recherche de la DLR, l'Allemagne a fait procéder sur les installations de MTU à Ottobrunn à des essais de statoréacteurs et de divergents de tuyères dans des conditions simulant le vol spatial transatmosphérique jusqu'à Mach 7. Ces essais ont montré que la tuyère allemande présentée ici était capable de supporter un flux de gaz chaud porté jusqu'à la température de 2120° !

Apparemment simple et évidente quant aux concepts de base, l'application du stato n'est pas sans poser quelques problèmes technologiques ardues. Ainsi, par exemple, le fait de prendre de l'oxygène dans l'air augmente la traînée de façon notable d'où un échauffement des matériaux à propos duquel il faut prendre en compte le fait que la température croît, à partir d'un certain niveau, comme le carré de la vitesse. L'échauffement cinétique croissant avec le nombre de machs, à partir de Mach 5 il faut faire appel à des matériaux sophistiqués à matrice métallique et tenir compte de phénomènes d'écoulement souvent surprenants. Au cours de cette ascension sont particulièrement exposés le nez, les bords d'attaque, les bords des ailes de l'avion et les entrées d'air du stato.

D'autre part toutes les études tendent à démontrer que, pour disposer de véhicules efficaces, il faudra probablement utiliser la propulsion aérobie jusqu'à Mach 10-Mach 12. Or, jusqu'à présent, excepté deux véhicules russes expérimentaux et quelques essais « classifiés » américains, les essais au sol n'ont pas dépassé

Mach 7-Mach 8. De plus, il est bien difficile de transposer à ces recherches ce que l'on connaît des véhicules hypersoniques anaérobies comme les missiles stratégiques équipés de têtes de rentrée.

Dans le cadre de ce que nous savons faire actuellement l'expérience démontre que, pour un avion spatial récupérable aérobie, plus le nombre de machs augmente, plus les mesures compensatoires à prendre pour contrebalancer les effets induits en atmosphère par cette vitesse sont élevées et contribuent à pénaliser la capacité en charge utile. Ce qui fait qu'actuellement, si le pari de l'avion spatial récupérable à propulsion combinée n'est pas aussi fou que certains veulent bien le dire tant que l'on reste au stade de démonstrateur expérimental version réduite, il y a une grande incertitude sur le délai à partir duquel un tel type d'engin peut devenir opérationnel. S'y ajoute le fait que, dans le cadre des technologies impliquées sur lesquelles sont effectuées des recherches (moteurs aérobie, modélisation des trajectoires et des écoulements, chambres de combustion, aérothermique, nouveaux

matériaux,) le caractère *novateur* de celles-ci est tel qu'il semble pour le moment impossible de construire un seul exemplaire d'un tel avion pour moins de 2 milliards de dollars et ce, en tenant compte des seuls coûts de construction auxquels il faut ajouter les frais de recherche & développement !

Il faut toutefois considérer que le système technico-économique évolue et tenir compte des effets de temps de maturation d'une technologie et de ses effets d'échelle jouant sur le coût de revient en matière de constructibilité. Avec la baisse des coûts et un haut niveau de flexibilité opérationnelle atteint progressivement, le coût du transport pourrait être réduit d'un facteur de deux, puis de plusieurs ordres de grandeur au fur et à mesure que leur mise en œuvre serait peu à peu banalisée.

Définir une stratégie

Au niveau de l'approche pour la mise au point des transporteurs spatiaux récupérables de troisième génération, deux attitudes opposées se partagent actuellement la faveur des spécialistes. On assiste soit à la définition d'un concept en lui-même pour en faire un projet bien spécifié et défini (stratégie de MBB/Dasa et de British Aerospace), soit à la mise en place parallèle de toute une série d'études préliminaires visant à ne pas engager les recherches dans des voies sans issue, en se basant sur le fait que toutes les technologies requises par ce genre de projet ne sont pas disponibles et comportent une grande part d'incertitudes (stratégie d'Aerospaiale et de Dassault).

Appartiennent à la première catégorie le projet Hotol (aujourd'hui abandonné), les projets Sänger 2 et NASP. Dans la seconde catégorie se situent les concepts STS-2000 d'Aerospaiale et Star-H de Dassault, le programme à large éventail Festip de l'ESA, les programmes français Hyperspace et Prepha, certains des projets étudiés par la firme Molnya en CEI,...

Passons sur Hotol, proposé à l'ESA en 1985 par les Anglais et refusé car jugé trop ambitieux, et pour lequel en compensation les Britanniques ont reçu des fonds de l'Agence pour l'étude détaillée de systèmes de transport aérobie. Intéressons-nous plutôt au Sänger 2 que les Allemands voudraient voir européeniser avant la fin du siècle et qui, de l'avis de nombreux experts, est un programme sérieux et structuré. Présenté en 1986,

et vivement défendu par l'ingénieur Högenauer, le bi-étage Sänger vise essentiellement trois objectifs :

- les coûts spécifiques de charge utile pour le transport des hommes et du matériel dans l'espace doivent tout au plus se monter à 20% des coûts du couple Ariane 5P-Hermès ;
- réduire les coûts de développement en recourant, pour une partie



Basé sur la perception du coût élevé impliqué par le système de transport constitué par le couple Ariane 5P-Hermès, le projet allemand Sänger vise à la fois à éviter les inconvénients du système adopté en 1987 à la Conférence de La Haye (du point de vue des infrastructures et de la mise en œuvre), et à réduire les coûts spécifiques de charge utile pour les hommes et le matériel dans l'espace.

Conçu en mode bi-étage, Sänger 2 utilise au niveau du premier étage porteur six moteurs combinés stato-aérobies de 3 tonnes chacun et emportant 200 tonnes d'hydrogène liquide et, au niveau de son deuxième étage, deux moteurs-fusées ATC (Advanced Topping Cycle). Baptisé Horus dans sa version habitée (équipage de 5 personnes avec une charge utile de 7 tonnes) et Cargus dans sa version cargo (charge utile de 15 tonnes), Sänger 2 a vu depuis 1986 ses configurations constamment modifiées au niveau de son aérodynamisme avec l'utilisation sans cesse plus marquée de voilures et empennages à grande flèche.

Pour faciliter l'acceptation de leur concept au niveau européen, les ingénieurs de MBB/DASA avaient prévu de construire un démonstrateur hypersonique de taille réduite dénommé Hytex avant la fin du siècle. Du fait de la réduction considérable des engagements financiers de l'Etat allemand à l'égard de l'aérospatial depuis 1991, il semble bien que Hytex n'effectuera pas de vol de démonstration au minimum avant 2005/2007 !

Même si la validité de la solution bi-étage reste à prouver en matière d'efficacité économique, il n'est pas douteux que les Allemands ont pris une légère avance sur leurs voisins européens en matière de recherches effectives dépassant les études de faisabilité.

importante du concept, à des technologies éprouvées et disponibles, notamment pour ce qui concerne le deuxième étage ;

- la fiabilité et la sécurité du système de lancement doivent être compatibles avec les meilleurs avions de ligne.

Défis ambitieux assurément mais l'histoire de nombreuses réussites technologiques doit nous enseigner à garder l'esprit ouvert.

En février 1989, les premiers crédits fédéraux (BMFT et DLR) ont été débloqués pour cette navette bi-étage prévue pour décoller et atterrir sur n'importe quel type d'aéroport. Le premier étage (variant de 340 à 385 tonnes selon les diverses configurations proposées) serait propulsé par 6 moteurs combinés turbo-stato aéro-bies de 3 tonnes chacun, qui emporteraient plus de 100 tonnes d'hydrogène liquide et devraient être à même de pouvoir traiter environ 150 m³ d'air à la seconde.

Au cours des années la configuration aérodynamique de la navette a singulièrement évolué puisque la première version jouait avant tout sur le cône de l'avion tandis que les dernières versions se caractérisent par l'utilisation de voilures et empennages à grande flèche.

Le second étage, qui se sépare du premier à Mach 6-Mach 8, est baptisé soit Horus soit Cargus selon qu'il se présente en configuration transport passagers plus charge utile ou en configuration cargo, avec dans ce dernier cas des potentialités de charge utile de 12 à 15 tonnes. Sa propulsion serait assurée par deux moteurs-fusées ATC de la même famille que ceux proposés par Dornier pour ses concepts d'avions-fusées bi-étage récupérables EARL. Il était prévu de valider le concept de premier étage au moyen d'un démonstrateur dénommé Hytex dont les essais en vol étaient envisagés pour les années 1998-2000, mais aujourd'hui on parle plutôt de 2005-2010.

Le programme américain NASP, qui mobilisait au départ 5000 ingé-

Petit lexique des avions spatiaux récupérables

Impulsion spécifique : rapport exprimé en secondes, entre la poussée d'un propulseur et le produit du débit massique d'une combinaison d'ergols par la valeur normale de l'accélération de la pesanteur. Ce rapport caractérise l'efficacité et la capacité d'un propulseur à transformer le débit de ses gaz de combustion en poussée.

SSTO (Single Stage To Orbit) : désigne un concept de lanceur mono-étage.

TSTO (Two Stage To Orbit) : désigne les concepts de lanceurs bi-étage. Dans ce cas, le premier étage fonctionne comme une plate-forme aérienne de lancement et, seul, le second étage accède à l'orbite désirée.

Traînée : terme d'aérodynamique, emprunté à l'aéronautique, qui désigne l'ensemble des forces qui s'opposent à l'avancement d'un avion dans les couches atmosphériques.

Portance : terme technique qui exprime la capacité d'un avion à exercer une force perpendiculaire de sustentation par rapport aux fluides gazeux et atmosphériques dans lesquels il est plongé.

Moteur anaérobie : propulseur emportant avec lui le comburant nécessaire pour brûler le carburant.

Moteur aérobie : moteur aéronautique ou spatial transatmosphérique utilisant l'air atmosphérique comme comburant pour faire brûler le carburant embarqué.

Statoréacteur : propulseur sans pièces mobiles puis dans lequel l'air est comprimé à haute température et à haute pression par combustion du carburant et du comburant, ensuite détendu dans une tuyère.

Statoréacteur à combustion supersonique : dénommé souvent « scramjet », le statoréacteur à combustion supersonique est un statoréacteur dans lequel la vitesse moyenne de l'air au niveau de la chambre de combustion est supersonique.

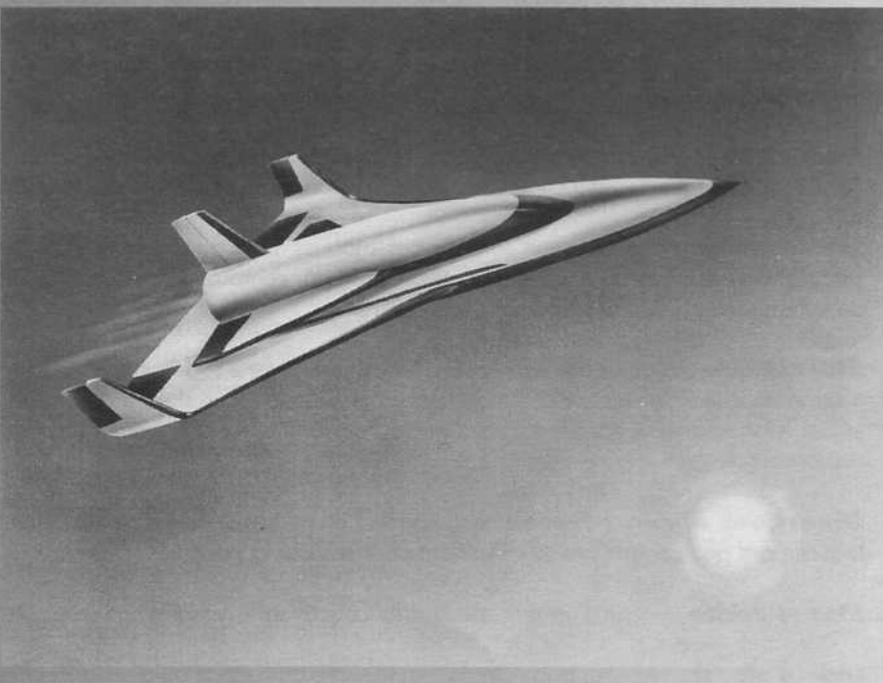
Divergent d'une tuyère : partie arrière d'une tuyère de propulseur dans laquelle des gaz comprimés se détendent pour assurer la poussée.

Masse sèche : masse d'un étage ou d'un lanceur avant le remplissage en ergols.

Indice structural : rapport entre la masse sèche d'un étage ou d'un lanceur et sa masse totale incluant les propergols et la charge utile à placer en orbite. Dans le cas des engins spatiaux récupérables, un effort considérable doit être effectué pour réduire la masse sèche (poids et structures, pièces mobiles pour améliorer l'aérodynamique) afin de conserver des possibilités résiduelles suffisantes de mise en orbite de la charge utile. L'idéal serait d'atteindre un indice de 20% par l'emploi de matériaux à la fois ultra-légers, réfractaires et résistants !

Masse inerte : ce terme, à usages multiples, peut être employé, dans le cas des avions spatiaux récupérables, pour désigner toutes les parties de l'engin nécessitées par des impératifs aérodynamiques et dont la taille est quasi-incompressible. Cette masse indispensable se comporte comme un poids mort pour lequel on va rechercher le maximum d'efficacité aérodynamique à titre de compensation. Les progrès sur cette masse inerte passent évidemment par des avancées sur la réduction du poids des matériaux constituant ces structures.

STS-2000 : la réponse française



Imaginé par la division Espace-Défense d'Aérospatiale, lors d'études en partie financées par le CNES et l'ESA, le concept STS-2000 (Système réutilisable de transport spatial du futur), recouvre en fait une large palette de possibilités. La firme des Mureaux a préféré engager un certain nombre d'études préliminaires pour tester la faisabilité des technologies impliquées par les différents concepts.

Dans les années 1986-87 la firme française, dans l'optique d'une mise à poste de 7 tonnes en orbite basse, avait présenté trois concepts possibles, à savoir : un bi-étage comportant un avion accélérateur aérobie plus un avion orbital fusée (masse totale au décollage de 250 tonnes) ; un avion orbital mono-étage utilisant seulement des moteurs-fusées ; un avion orbital aérobie-fusée mono-étage (masse au décollage de 300 tonnes).

Au cours des trois dernières années, l'Aérospatiale a abandonné la deuxième solution pour se concentrer sur les concepts de mono-étage (SSTO) et de bi-étage (TSTO) faisant tous les deux appel à la propulsion aérobie pour une partie conséquente du vol. Dans leurs dernières versions, le TSTO est devenu « Radiance » et le SSTO « Oriflamme ». Le SSTO dispose d'une masse totale de 338 tonnes au décollage, tandis que la masse du TSTO passe à 204 tonnes.

Les ingénieurs d'Aérospatiale ont étudié tous les modes de propulsion pour des engins spatiaux récupérables faisant appel aux concepts aérobies : selon eux ce serait le combiné turbofusée-stato-fusée qui offrirait le meilleur rapport de performances pour un mono-étage.

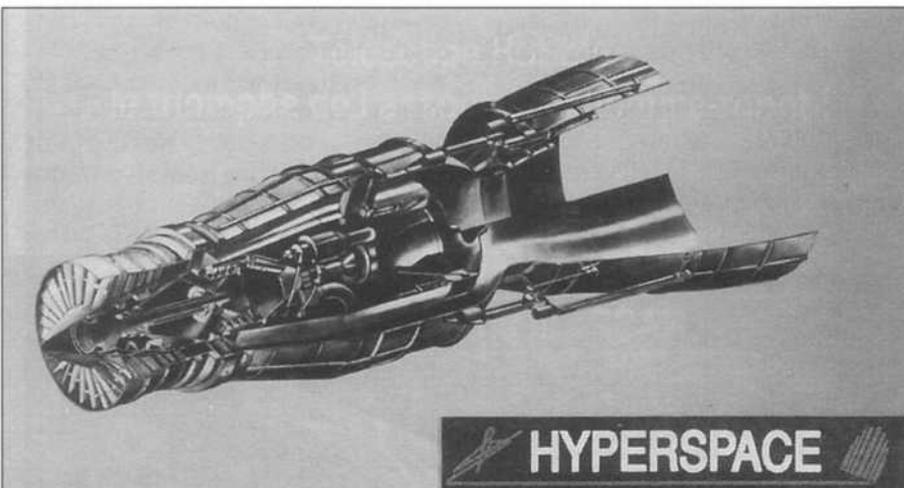
nieurs et techniciens, vise quant à lui à construire deux démonstrateurs expérimentaux dénommés X-30 qui soient capables de couvrir les domaines de vol allant de Mach 5 à Mach 13-14 ! La plupart des spécialistes européens considèrent ce défi comme « difficile » et relèvent que, pour l'année 1993, il a été largement sous-budgétisé par rapport aux prévisions. Sur ce point la décision de construire ces démonstrateurs se fait encore attendre... Toutefois il se peut, comme le pensent nombre d'ingénieurs du vieux continent, que le program-

me NASP ne soit qu'un simple programme de recherches technologiques et que le mystérieux programme Aurora, en principe centré sur un concept d'avion de reconnaissance stratégique volant à plus de Mach 5 et déjà opérationnel, recouvre en fait toute une palette d'engins différents dont certains ne seraient que de petites navettes bi-étages pouvant déjà mettre quelques tonnes en orbite. Pour ce qui concerne l'avion de reconnaissance stratégique repéré à plusieurs reprises, le débat fait rage à propos de son mode de propulsion.

Certaines traînées observées lors de son passage, en Arizona et au-dessus de la mer du Nord par des marins hollandais, laissent à penser que le concept « avion de surveillance » utiliserait un « pulsoréacteur » ! Imaginé dès le début du siècle par le russe Karavodine et le français Marconnet, le pulsoréacteur est un curieux propulseur comportant une tuyère placée à son avant et disposant de sortes de petits volets où s'engouffre l'air aspiré qui va servir à enflammer le carburant. Le phénomène de « mélange détonant » induit par la brus-

que compression va alors assurer la force de réaction et entraîner la fermeture des clapets, lesquels vont se rouvrir à nouveau lorsque le mélange va être totalement éjecté et que la pression de l'air va s'exercer de nouveau sans rencontrer de résistance. A ce moment-là, l'opération est renouvelée avec une nouvelle quantité de carburant, ce qui fait qu'un pulsoréacteur n'est en fait qu'un propulseur à mouvements alternés. La projection de cette idée audacieuse s'est effectivement traduite par des réalisations concrètes pendant la dernière guerre en Allemagne dans le cadre du programme allemand FI103 qui devait donner naissance au V1.

Toutefois il faut remarquer qu'un tel propulseur ne peut être efficace que dans les basses couches de l'atmosphère et qu'à haute altitude son rendement décroît au point de ne plus pouvoir le rendre opératoire. Selon M. Calmels, un ancien responsable de Microturbo que nous avons interrogé à ce sujet, cette technique serait d'une efficacité désastreuse pour un avion spatial et l'on peut penser qu'en fait, dans le cas d'Aurora, notre pulsoréacteur n'interviendrait que



HYPERSPACE

Les avions spatiaux récupérables utilisent, pour leur propulsion, divers systèmes de « moteurs combinés » dont les composants respectifs correspondent chacun à une partie bien spécifique des domaines de vol devant progressivement conduire à la mise en orbite à Mach 25. Ces moteurs combinés peuvent prendre des formes différentes : turbofusée-turbofusée stato, fusées à air liquéfié, fusées à air refroidi ou statoréacteur à combustion supersonique.

Pour le premier étage d'un lanceur bi-étage, un concept turbofusée-stato-fusée, du type représenté par cette illustration, semble être une des solutions les plus rationnelles. Pour ce qui concerne un mono-étage, les calculs sur trajectoires effectués par les experts d'Hyperspace semblent montrer, qu'à priori, seule une propulsion combinée intégrant un statoréacteur à combustion supersonique peut permettre le maintien d'une charge utile sensiblement positive du fait d'une impulsion spécifique élevée.

VILEBREQUINS - BIELLES



pour moteur essence, diesel
pour automobiles, poids lourds, divers
pour compresseurs : air, froid industriel, freinage, divers
pour pompes : gaz, liquide, pour machines-outils et divers

chambon sa

81 RUE DE LA TOUR 42000 ST ETIENNE TEL. 77 93 69 82 FAX 77 74 33 58
ADRESSE POSTALE B.P. 640 - 42042 ST ETIENNE CEDEX 1

pendant une brève partie du vol avant que le relais ne soit pris par un stato...

A une certaine époque financés par le CNES et l'ESA, les concepts STS-2000 d'Aerospatiale relèvent de la catégorie des études technologiques préliminaires. Au départ, en 1987,

ces études avaient porté sur trois concepts (avion accélérateur aérobie plus avion orbital-fusée, avion orbital aérobie-fusée mono-étage, avion orbital fusée mono-étage) mais, depuis 1991, les ingénieurs français ont concentré leurs réflexions sur deux concepts : un mono-étage dit SSTO et un

bi-étage dit TSTO visant chacun à mettre 7 tonnes en orbite, soit à peu près l'équivalent du Sänger.

En France, il semble que, malgré le scepticisme général sur la possibilité de réalisation rapide de ces concepts, les menaces représentées par les programmes Sänger et NASP aient été perçues à la fois par les industriels et les pouvoirs publics. Le groupe Hyperspace, inspiré par la SEP et la Snecma et animé par Pierre Betin, a réussi à concentrer des fonds propres venus des industriels pour étudier la validité et la faisabilité d'un certain nombre de systèmes de propulsion envisagés pour les avions spatiaux du futur : turbo-fusée-stato, turbo-expander-stato, turbo-stato, fusée-stato, statoréacteur à combustion subsonique et même statoréacteur à combustion supersonique-fusée pour un bi-étage. Certaines de ces études ont fait l'objet de présentations lors des deux derniers colloques de l'IAF (Fédération internationale d'astronautique) et, tout récemment, lors d'un colloque au mois de novembre à Strasbourg. L'initiative d'Hyperspace a certainement conduit les pouvoirs publics, en 1991, à créer le Prepha (Programme de recherche de propulsion hypersonique avancée) qui, sous l'égide de la DGA, associe l'Onera, Aerospatiale, Dassault, Snecma, la SEP. Doté d'un budget annuel de 125 millions de francs par an (60 viennent du ministère de la Défense, 40 du ministère de la recherche, 25 des industriels), le Prepha vise à coordonner les moyens d'essais en matière de propulsion (avec concentration sur le statoréacteur à combustion supersonique ou « scramjet »), d'aérodynamique, d'aérothermique, de nouveaux matériaux et de sous-ensembles.

Pour ce qui concerne le futur lanceur européen (FEL) souhaité par l'ESA dans le cadre de son programme d'études Festip, il ne reste plus actuellement que les Français et les Allemands dans la course. En 1995, ils auront des opportunités d'européaniser les programmes post-Hermes, pour lesquels il serait souhaitable de décider de la mise au point de prototypes grandeur nature pour des essais au sol et de « bancs d'essai volants »

NASP : le projet américain



Lancé en 1985, l'ambitieux programme de recherches NASP sur un possible mono-étage a été vigoureusement soutenu pendant un certain nombre d'années par la division DARPA du DOD (département de la Défense), la Nasa et l'US Air Force. Il a impliqué jusqu'à 5000 ingénieurs et techniciens de haut niveau venus notamment de chez Mc Donnell/Douglas, Rocketdyne et Pratt & Whitney.

Contrôlé par les militaires dans le cadre du projet IDS, le projet avait également pour but avoué de réduire de 80% par rapport à la navette actuelle le coût du kilo en orbite et de déboucher sur un type de véhicule spatial commercial dénommé NDV. Au fur et à mesure de son avancement, cet ambitieux programme mono-étage a vu peu à peu son objectif revu à la baisse à cause de la découverte de problèmes technologiques imprévus auxquels auront à faire face tous les concepts mono-étage.

Bien que plus faiblement budgétisé avec l'arrivée au pouvoir du Président Clinton, le NASP aurait donné une impulsion considérable à la recherche américaine de pointe, par exemple pour ce qui concerne les nouveaux matériaux. Pour de nombreux experts spatiaux et industriels européens, comme Gérard Laruelle, Heinrich A. Pfeffer ou bien encore les ingénieurs de Dassault ayant travaillé sur le concept Star-H, le programme NASP ne serait en fait qu'un programme de recherches technologiques masquant un projet réel beaucoup plus concret. Des analystes financiers particulièrement perspicaces font remarquer que près de 25 milliards de dollars sont dépensés annuellement aux Etats-Unis dans des programmes secrets que l'on ne peut rattacher à aucun projet déjà connu ! Seraient particulièrement concernés par ces programmes, les fameux laboratoires et ateliers secrets « skunks works » de la firme Lockheed.

Il paraîtrait même que les Américains, dans le cadre de leur programme d'avion de reconnaissance stratégique secret Aurora, disposeraient déjà d'un petit bi-étage TSTO capable de mettre jusqu'à 5 tonnes en orbite ! Au cours de sa phase ascensionnelle, ce TSTO utiliserait à la fois un « pulsoréacteur » et un « supers-tato ». Les Européens ont intérêt à se réveiller.

(démonstrateurs technologiques d'ascension et de rentrée), après qu'une comparaison des faisabilités et des opportunités ait permis d'aboutir à une décision. Face aux défis américains, Français et Allemands ont intérêt à s'entendre rapidement et à ne pas entretenir de stériles et stupides divisions. ■

Bibliographie

Aerospatiale, MBB/ERNO, Marconi Avionics, Dornier Systems, « *Future Launching Systems - Final Report* », 1980.

Aerospatiale, « *STS-2000* », 1987.

Aerospatiale, « *Les lanceurs du futur* », juin 1991.

Herbert J. Coleman, « The United States is in position to Break the Hypersonic Barrier », *Commercial Space*, spring 1986.

DASA, « *Reusable Space Transportation Systems. Reference Concept Sänger* », Hypersonics Technologies, 1993.

Maurice Delahais, Jean-François Lieberherr et Heinrich A. Pfeffer, « The ESA Proposals for Future Space Transportation Systems beyond Ariane 5 and Hermes », *L'Aéronautique et l'Astronautique*, 1991.

ESA, « *Intermediate Results of ESA STS-LTPP-Studies* », 1984.

Eurospace, « *Proposals for a European Long Term Space Policy* », 1980.

Ernst Hogenauer, « Le projet Sänger : transporteur spatial de l'an 2000 », *Fusion*, N° 20, mars-avril-mai 1987.

Philippe Jamet, « L'indispensable transporteur spatial de troisième génération : Sänger 2, Hotol ou... STS-2000 ? », *Fusion*, N°22, septembre-octobre-novembre 1987.

Philippe Jamet, « Avions spatiaux récupérables : une porte de sortie pour l'Europe », *Fusion*, N° 46, mai-juin 1993.

Ministère fédéral de la recherche et de la technologie, « *Hypersonic Technology Programme* », Bonn, 1988.

NASA, « *One Step to Space : The X-30 National Aerospace Plane* », 1991.

Heinrich A. Pfeffer (ESA), « *The action of ESA to Prepare for Future Space Transportation Systems : the FESTIP Programme* », Conférence donnée en décembre 1992, au Sheraton Plaza Hotel à Orlando, en Floride.

Philippe Ramette (Hyperspace), Dominique Scherrer (ONERA) et Michel Doublier (Snecma), « *Etude comparative de différents systèmes de propulsion combinés* ».

Télescope Hubble : le triomphe de l'association homme-robot !



C'est avec une grande satisfaction que la Nasa et l'Esa, ainsi que tous ceux qui croient encore avec lucidité à l'avenir de la conquête de l'espace, ont appris que les opérations successives d'intervention sur Hubble (mission STS-61 Endeavour) se sont déroulées comme prévu. Cette mission constitue un succès sans précédent depuis l'épopée d'Apollo. En effet, à part l'incident imprévu relatif aux difficultés rencontrées par les astronautes Musgrave et Hoffmann pour ce qui concerne la fermeture des portes du compartiment contenant les deux jeux de gyroscopes remplacés (Rate Sensor Units), tout s'est passé de la meilleure façon possible.

Que ce soit les opérations de manipulation du robot Canadarm (astronaute Nicollier), du remplacement des panneaux solaires (astronautes Tom Akers et Kathryn Thornton), de la mise en place de la caméra planétaire grand champ WFPC-2 (au lieu de la WFPC-1 ramenée à Terre), ou de l'installation du système correctif Costar chargé de compenser le défaut de courbure (aberration sphérique) du miroir primaire de Hubble, nos « mécanos » de l'espace ont démontré une parfaite maîtrise.

Cette mission est également une probante démonstration de la validité des tests de simulation effectués auparavant au sol. Mais surtout, elle s'affirme comme un cinglant démenti à ceux qui ne croient pas à l'avenir de l'homme dans l'espace, sous prétexte de crédibilité excessive au « tout automatique »... L'expérience tend à montrer, en effet, que l'homme reste supérieur au robot pour tout ce qui est non répétitif et faire face aux imprévus, lors d'interventions dans l'espace. En fait, l'association idéale reste homme et robot à la fois, solution choisie précisément pour l'opération de maintenance sur Hubble.

Comme le dit fièrement Greg Harbaugh, responsable Nasa des communications avec la navette, « *Tout va devenir grand et demain va devenir un autre grand jour !* » Le succès de l'opération sur le télescope spatial Hubble préfigure en effet, en réduction, ce que sera le travail des futurs « ouvriers spatiaux » pour la mise en place de la station spatiale internationale appelée à se substituer au concept Freedom et, plus encore, les opérations d'installation des grandes infrastructures orbitales du siècle prochain...

Philippe Jamet