

La navette spatiale (*)

par Jean-Pierre PENOT,

*Responsable de la revue Espace Information,
C.N.E.S. de Toulouse.*

Moins d'un siècle... Moins d'un siècle aura suffi pour qu'à l'avion succède un engin capable de prendre part à sa propre satellisation autour de la Terre et, sa mission terminée, de revenir au sol d'une façon autonome. Avec l'apparition de la Navette spatiale, dont le premier vol opérationnel s'est déroulé en novembre 1982, s'ouvre une ère nouvelle de l'astronautique, celle de la récupération et de la réutilisation des véhicules spatiaux.

A certains égards, l'astronautique peut apparaître comme un domaine où le gaspillage n'est guère combattu : depuis vingt-cinq ans, à chaque fois que l'on souhaite placer sur orbite un satellite artificiel, on utilise un nouveau lanceur, spécialement construit pour la circonstance. Et à ce jour, plus de deux mille lancements ont été enregistrés !

Parfois — mais très rarement — on installe plusieurs satellites au sommet d'une même fusée, en général deux ou trois, mais jusqu'à huit dans le cas des satellites soviétiques de télécommunications militaires.

Quoi qu'il en soit, les divers éléments du lanceur ne sont jamais récupérés après utilisation : les premiers étages retombent au sol (sur terre ou dans les océans), quant au dernier étage, il brûle le plus souvent dans l'atmosphère en y pénétrant à très grande vitesse. Par conséquent, *un lanceur classique ne peut servir qu'une seule fois.*

Intéressons-nous à présent au satellite que nous supposons sur orbite, effectuant la mission pour laquelle il a été conçu. Dans la plupart des cas ($\approx 97\%$ des vols sur 25 ans), c'est un véhicule inhabité. Deux possibilités se présentent alors :

* ou bien (et c'est le cas le plus fréquent) *il n'est pas prévu de le récupérer* : le satellite transmet ses informations par télémesure (voir EI, n° 13, p. 7). Lorsque sa mission a pris fin, soit

(*) *N.D.L.R.* : Cet article est extrait de la revue Espace Information (n° 22 de juin 1982). L'autorisation de reproduction nous a été aimablement fournie par l'auteur : J.-P. PENOT, responsable de la revue. Voir la note d'information en fin de Bulletin.

il continue de graviter (au-delà de 1 000 km d'altitude, l'espérance de vie est de... plusieurs siècles), soit il est détruit naturellement lors de sa rentrée dans les couches denses de l'atmosphère (pour les orbites circulaires, l'espérance de vie est de quelques années à 500 km d'altitude, de quelques semaines à 300 km et de quelques jours à 200 km) ;

* ou bien *il est prévu de le récupérer*. C'est systématique — bien entendu — pour les satellites emportant un ou plusieurs hommes (ce qu'on appelle les missions habitées), mais c'est également réalisé dans d'autres cas : satellites biologiques (animaux ou échantillons divers à bord), certains satellites militaires d'observation de la Terre (films photographiques) ; etc.

Cette nécessité de récupérer tout ou partie de l'engin spatial et de ses équipements implique des précautions particulières, entre autres celle de rendre le satellite apte à supporter sans dommages les contraintes (thermiques, mécaniques,...) rencontrées lors de la rentrée atmosphérique.

En orbite terrestre, vers 200 km d'altitude, la vitesse d'un satellite artificiel est d'environ 7,8 km/s ($\simeq 28\,000$ km/h). Souhaiter le récupérer signifie *annuler cette vitesse en quelques dizaines de minutes* !

Un véhicule spatial quelconque qui pénètre les couches denses de l'atmosphère avec une vitesse de cet ordre est l'objet d'un *intense échauffement cinétique* (frottement des molécules de l'air sur ses parois). Si aucune précaution n'était prise, les matériaux ne résisteraient pas aux températures supérieures à 1 000°C atteintes par les parois les plus exposées et le véhicule tout entier serait détruit.

Dans le cas des satellites habités, la solution retenue jusqu'à ce jour a consisté — aussi bien du côté soviétique que du côté américain — à doter le véhicule spatial d'un revêtement protecteur (bouclier thermique), à faire en sorte que le satellite s'oriente convenablement lors de sa pénétration dans l'atmosphère de façon à faire supporter à ce revêtement l'essentiel du flux thermique créé : l'énergie dégagée est absorbée par le matériau protecteur qui brûle (pour cette raison, on parle souvent de *cône d'ablation* ou *d'érodage* pour désigner cette partie du satellite).

Le problème de la rentrée atmosphérique étant traité, que reste-t-il ? Le contact avec le sol, c'est-à-dire avec l'eau dans le cas des satellites américains, avec la terre pour la plupart des satellites soviétiques. Dans les deux cas, des parachutes ralentissent, en fin de parcours, la descente des capsules spatiales. Arrivées sur les lieux, les équipes de récupération aident les hommes de l'espace à sortir de leur véhicule ou bien, pour les missions non habitées, récupèrent le matériel embarqué.

Il est évident que lors de son retour vers la Terre, le satellite a souffert : vibrations, décélérations, échauffement de certaines parois, chocs sur le sol, etc. Il n'est donc pas étonnant que personne n'ait encore envisagé de le soumettre à une deuxième mission spatiale : *même récupéré, un satellite artificiel ne sert jamais deux fois.*

Bien, dira-t-on, il est fort regrettable que ce soit si coûteux, mais c'est ainsi, la recherche spatiale est à ce prix. Et il n'y a plus, aujourd'hui, à justifier l'importance de ce secteur d'activité : les exemples de missions spatiales ayant permis des services ou la collecte d'informations impossibles à obtenir par d'autres moyens abondent (sondes planétaires ; satellites géodésiques, astronomiques, météorologiques, d'observation de la Terre, de télécommunications, de télévision directe,...).

Cependant, en contrepartie d'investissements importants, le moins qu'on puisse attendre d'un satellite c'est qu'il remplisse parfaitement la mission prévue, en premier lieu, qu'il fonctionne normalement pendant toute sa durée de vie théorique. Fort heureusement, c'est ce qui se passe le plus souvent.

Néanmoins deux exemples récents illustrent la part de risque propre au domaine spatial : le satellite européen Météosat-2 connaît, quelques jours après son lancement (le 19 juin 1981), des difficultés de fonctionnement (la fonction collecte de données n'est plus assurée) ; de même APPLE, le satellite indien de télécommunications lancé en même temps que lui, qui ne parvient à déployer qu'un de ses deux panneaux solaires, ce qui réduit considérablement son espérance de vie (voir EI, n° 20, p. 22).

Et comme il est encore impossible d'aller réparer un véhicule spatial sur orbite, on aboutit à la conclusion qu'un satellite ne devrait pas tomber en panne. Malheureusement, et bien que la réputation de la fiabilité spatiale ne soit plus à faire, tel n'est pas le cas.

Revenons à l'idée initiale, celle d'un gaspillage présumé qui reposerait sur la constatation suivante : pour remplir une mission spatiale, on est tenu de faire appel à un satellite — jamais réutilisé — qui est placé sur orbite au moyen d'un lanceur lui non plus jamais réutilisé.

Mais peut-on faire autrement ? Est-il possible de récupérer tout ou partie d'un lanceur ? d'utiliser à plusieurs reprises le même satellite ? d'aller récupérer (pour dépannage ou entretien) un véhicule spatial en orbite ?

Oui, si l'on en croit les experts américains pour lesquels l'avènement de ces « possibles » passe par la mise au point d'un

véhicule unique au monde, de conception révolutionnaire : la *Navette spatiale* (en anglais : *Space Shuttle*).

Une restriction dès maintenant : ce qui est (peut-être) vrai pour les Etats-Unis ne l'est pas forcément pour d'autres pays. Et un tel outil n'a de sens — et n'est économiquement envisageable — que dans l'espérance d'une très large utilisation. Dans le cas contraire, la raison commande d'en rester aux moyens classiques, coûteux sans doute, mais infiniment moins qu'une navette qui serait sous-employée ou incapable d'assurer toutes les missions réclamées par les utilisateurs.

LA NAVETTE SPATIALE AMERICAINE.

L'idée initiale, apparue aux Etats-Unis peu après la Seconde Guerre mondiale, était de mettre au point un véhicule qui serait à l'astronautique ce que l'avion est à l'aéronautique. Ce qu'on attendait de lui, c'est qu'il fût capable successivement (et sans de longs préparatifs) de décoller, d'atteindre une vitesse suffisamment élevée pour se satelliser autour de la Terre, enfin de revenir au sol.

C'est clair, il s'agissait de mettre au point un moyen de transport spatial véritablement révolutionnaire avec l'objectif de *banaliser l'accès à l'espace*.

Au terme d'une longue réflexion sur les besoins spatiaux dans les années 80 et 90, la Navette (*) a été conçue pour placer sur orbite de lourdes charges (jusqu'à une trentaine de tonnes). Et contrairement à tous les lanceurs existants, certains de ses éléments sont récupérables et doivent servir plusieurs fois, ce qui répond à un souci d'économie.

Il est évident que la diminution du coût d'un lancement passe par la récupération du *groupe propulsif principal* (qui, dans le cas de la Navette, représente environ 85 % du coût total). Sa réutilisation, elle, implique que le propergol ne soit pas corrosif (d'où l'emploi des ergols cryotechniques), que les moteurs aient une très grande durée de vie et enfin qu'ils présentent une très haute impulsion spécifique (qu'on n'obtient qu'avec les ergols cryotechniques).

Il n'aura cependant fallu pas moins d'une dizaine d'années d'efforts et d'innovations pour qu'à partir d'innombrables projets se dégage le concept qui a donné naissance au véhicule que nous connaissons aujourd'hui.

(*) Dans le cas de la Navette spatiale américaine, on utilise le N majuscule pour souligner l'unicité du concept.

Et, tout d'abord, comment se présente-t-elle cette Navette ? Quatre éléments principaux la composent :

* un VÉHICULE ORBITAL ou ORBITEUR (en anglais : *Orbiter Vehicle* — OV — ou encore *Orbiter* tout court). C'est la partie la plus originale et la plus spectaculaire de la Navette. Sa forme est celle d'un avion moderne à aile delta.

Il abrite l'équipage de la Navette qui y vit et y travaille. Comme son nom l'indique, il est destiné à évoluer sur orbite : c'est même le seul élément de la Navette qui y parvienne. *A un certain moment de son vol, l'orbiteur devient donc équivalent à un satellite artificiel.* Mais un satellite assez spécial puisque — fait sans précédent en astronautique — il participe à sa mise sur orbite grâce à ses propres moteurs.

C'est un peu ce qu'on obtiendrait si, dans le cas d'une fusée traditionnelle à trois étages, la vitesse de satellisation étant acquise, on décidait de ne pas séparer le troisième étage du satellite... Mais l'analogie s'arrête là, car une fois satellisé, l'orbiteur va faire montre de ses capacités : de sa soute il peut extraire plusieurs satellites ou au contraire il peut y stocker — pour les ramener au sol — des satellites qu'il récupérera sur orbite, etc. (Ses possibilités seront présentées plus loin.)

Surtout, lorsque sa mission sera terminée, il quittera l'orbite terrestre, pénétrera l'atmosphère et se posera — comme un avion ordinaire, ou presque — sur une piste spécialement aménagée à son intention. Remis en état, il sera prêt à affronter un nouveau voyage dans l'espace. Chaque orbiteur devrait, en principe, supporter une centaine de missions.

Mais comment cet orbiteur réussit-il à s'arracher à l'attraction terrestre ? Seul, il en est incapable : ses trois moteurs principaux n'ont pas la poussée suffisante pour soulever le gigantesque réservoir (contenant leur propergol) dont l'orbiteur est solidaire. Qu'à cela ne tienne ! Pour augmenter la poussée au décollage, on utilisera deux propulseurs auxiliaires, les *boosters* ;

* UN RÉSERVOIR EXTÉRIEUR (en anglais : *External Tank*, ET) qui renferme l'hydrogène et l'oxygène liquides alimentant les trois moteurs principaux de l'orbiteur pendant la presque totalité de l'ascension (≈ 9 min). Largué juste avant que la vitesse de satellisation soit obtenue, il se brise et brûle partiellement en rentrant dans l'atmosphère avant de retomber dans l'océan ($\approx 19\,000$ km du site de lancement). C'est le seul élément « consommable » de la Navette ;

* deux PROPULSEURS AUXILIAIRES (en anglais : *Solid Rocket Booster* — SRB ; *to boost* signifiant « soulever par der-

rière »). Ce sont les plus puissantes fusées à poudre jamais construites et c'est la première fois que ce type d'engin sert à la propulsion d'un véhicule habité.

Leur rôle est de permettre à l'orbiteur et à son gros réservoir de décoller (au décollage, ils fournissent plus de 80 % de la poussée totale). *Ils jouent donc le rôle de premier étage.*

Environ 130 secondes plus tard, les deux propulseurs sont décrochés et, du fait d'une altitude (≈ 49 km) et d'une vitesse ($\approx 4\,625$ km/h) relativement faibles, ils peuvent être récupérés : retombant sous parachutes dans une zone déterminée à l'avance, ils seront remorqués par bateau puis remis en état. Il est prévu d'utiliser une vingtaine de fois chaque *booster*.

Comment, schématiquement, se déroule une mission ?

Examinons le cas d'un lancement fait depuis le centre spatial Kennedy, en Floride. Dans un premier temps, à l'intérieur d'un vaste hall (haut de 160 m ; c'est celui qui a servi à l'assemblage des fusées Saturn 5 de la conquête de la Lune), on procède à l'érection — sur une plate-forme à chenilles — du réservoir extérieur auquel on fixe les deux *boosters* et l'orbiteur. La Navette ayant sa configuration de vol, la plate-forme est déplacée jusqu'à l'aire de lancement distante de 5,6 km.

Le compte à rebours peut alors commencer : il verra se succéder les vérifications d'usage, le remplissage des réservoirs, l'installation de l'équipage, etc. Les moteurs sont mis à feu et, une dizaine de minutes plus tard, l'orbiteur tourne autour de la Terre entre 100 et 200 km d'altitude, avec une vitesse proche de 27 500 km/h. Peu après, il sera placé sur son orbite définitive vers 250 ou 300 km d'altitude.

Passons rapidement sur la mission (elle fera l'objet du paragraphe suivant) et penchons-nous sur la rentrée atmosphérique. C'est sans doute la phase la plus délicate de la mission.

L'orbiteur est alors un mauvais planeur de 70 à 80 tonnes (jamais, par le passé, on n'a tenté de faire revenir au sol, en excellent état, un satellite d'une telle masse ; les capsules Apollo, par exemple, pesaient moins de six tonnes). En l'absence de tout moteur suffisamment puissant, il ne peut pas maîtriser sa descente ni s'y reprendre à deux fois. Par contre, sa voilure delta va lui donner des possibilités que n'avaient pas les capsules spatiales classiques, lesquelles, au retour, une fois la descente amorcée, suivaient passivement des trajectoires balistiques. Dans l'atmosphère, il va retrouver le comportement d'un avion hypersonique classique et, du fait d'une bonne manœuvrabilité, il peut se déporter considérablement (jusqu'à 2 000 km) de part et d'autre de sa trajectoire de rentrée.

En permanence, il faut concilier diverses exigences : éviter une rentrée trop rapide qui créerait un flux thermique trop élevé ou trop lente qui entraînerait l'orbiteur bien au-delà de la piste d'atterrissage, ne pas soumettre l'équipage à des décélérations trop importantes (elles doivent rester inférieures à 1,5 g),... Ce qui explique que le trajet orbite terrestre/sol dure une trentaine de minutes pour l'orbiteur contre une quinzaine seulement (avec des décélérations de l'ordre de 4 à 8 g) dans le cas des capsules Apollo.

Les manœuvres sont faites automatiquement mais à tout moment les pilotes peuvent reprendre la commande manuelle de l'engin. Lorsque la piste est en vue, le train d'atterrissage est sorti et l'orbiteur se pose.

S'il n'a pas atterri au centre Kennedy, il y sera transporté sur le dos d'un Boeing 747 spécialement aménagé à cet effet. Soumis à divers examens et remis en état, l'orbiteur devrait être prêt pour une nouvelle mission deux semaines après l'atterrissage (aujourd'hui la NASA admet que ce délai sera très supérieur). A terme, lorsque plusieurs orbiteurs seront disponibles, les Américains viseraient une *mise en configuration de lancement en 24 heures* avec un préavis de lancement de deux heures seulement ; ce qui impliquerait une campagne de lancement et un compte à rebours très écourtés.

A quoi servira-t-elle ?

En optant pour la Navette, les Etats-Unis ont misé, d'une part, sur les *vols habités*, d'autre part, sur une *forte utilisation de l'espace*, plus exactement du proche environnement terrestre (entendons par là occupation et exploitation intensives) dans les vingt prochaines années. Pour cela, il fallait abandonner l'implication : une charge utile satellisée $\Rightarrow$ un lanceur non récupérable.

La Navette correspond donc à cette volonté de disposer d'un véhicule de transport spatial — le « poids lourd de l'espace » — capable d'acheminer de lourdes charges sur orbite, de participer à la construction de stations orbitales et au transport d'équipages.

Ses performances dépendent, bien entendu, du site de lancement et de l'orbite visée. D'ici quelques années, elle pourra — dans le meilleur des cas — placer jusqu'à 29,5 tonnes de charge utile en orbite basse, à environ 200 km d'altitude (cette performance est réduite de moitié pour les orbites polaires ou héliosynchrones) et environ 11 tonnes à 500 km d'altitude. Au-delà de 1 000 km, la charge utile transportée devient très faible ; autrement dit, à ce niveau, l'orbiteur ne peut guère satelliser... que lui-même !

Point important : *l'aire d'évolution de la Navette se limite au proche environnement terrestre* (à moins de 1 000 km du sol). Pas question pour elle d'aller vers Mars ou Jupiter ni même vers la Lune ! L'orbite des satellites géostationnaires, à 36 000 km d'altitude, lui est également inaccessible ; on le verra dans le paragraphe suivant, pour y placer des véhicules spatiaux, il faut faire intervenir un étage complémentaire.

Dès lors, son rôle se précise : elle peut être assimilée à une plate-forme spatiale à usages multiples. Examinons les principales missions qui lui seront confiées. La Navette devrait permettre :

* DE PLACER SUR ORBITE DIVERSES CATÉGORIES DE SATELLITES. Deux cas sont possibles selon que l'orbiteur est, ou non, capable d'atteindre l'orbite visée ;

- dans le premier cas, une fois l'orbiteur placé sur la trajectoire que l'on souhaite affecter au satellite, les portes de la soute sont ouvertes et le satellite en sort, extrait au moyen d'un *bras de manipulation* (en anglais : RMS pour *Remote Manipulator System*. Fabriqué par le Canada, celui-ci est conçu sur le modèle du bras humain, trois articulations simulant l'épaule, le coude et le poignet. Il pèse 360 kg, mesure 15,2 m de long et est manœuvré depuis la cabine de pilotage). Le satellite est alors libéré puis mis en service par télécommande : l'orbiteur ne s'en éloigne qu'après avoir vérifié son bon fonctionnement. Ce sera la procédure suivie avec la plupart des satellites terrestres placés à moins de 1 000 km du sol ;

- dans le second cas, l'orbiteur est placé sur une orbite intermédiaire. Il s'agit, par exemple, de satellites à orbite haute ou de satellites géostationnaires (pour la météorologie, les télécommunications, les applications militaires ou la recherche scientifique) ou encore de sondes spatiales à injecter sur des trajectoires planétaires (selon la technique décrite dans EI, n° 12, p. 8). Il pourrait aussi s'agir — la possibilité est étudiée aux Etats-Unis — de déchets nucléaires que l'on souhaiterait éloigner de la Terre.

Cette fois, le satellite est doté d'un (ou plusieurs) étage(s) propulsif(s) destiné(s) à permettre le transfert entre l'orbite provisoire atteinte et l'orbite définitive. Extrait de la soute, comme dans le premier cas, il est placé à distance suffisante de l'orbiteur et son dispositif propulsif autonome est mis à feu..

Plusieurs types d'étage propulsif ont été envisagés :

- le *remorqueur spatial* (*Space Tug* en anglais), étage supérieur dit à haute énergie ; il utilise l'hydrogène et l'oxygène liquides. A l'origine, il devait être récupérable par la Navette elle-même au moyen du bras télémanipulateur et réutilisable. Au

début des années 70, il apparaissait comme la future contribution européenne au système de transport spatial américain avant que l'Europe ne décide de réaliser le Spacelab. Pour des raisons budgétaires, ce projet a été abandonné il y a quelques années.

Dans l'immédiat ont été mis au point des *étages non récupérables*, moins chers à développer mais plus coûteux d'emploi : l'IUS et le SSUS ;

- l'*Inertial Upper Stage* (IUS, initialement dénommé *Interim Upper Stage* pour souligner son caractère transitoire avant la mise au point du *Space Tug*). C'est un étage à propergols solides qui pourrait être réalisé en plusieurs versions, selon les besoins.

Un projet de version triétage, que la NASA réservait au lancement de sondes interplanétaires, a été abandonné en 1981.

Une version deux étages doit permettre de placer sur orbite des charges utiles géostationnaires pesant jusqu'à 2,5 tonnes (l'opération se fait en deux temps : un moteur de périégée assure le transfert et un moteur d'apogée la circularisation de l'orbite).

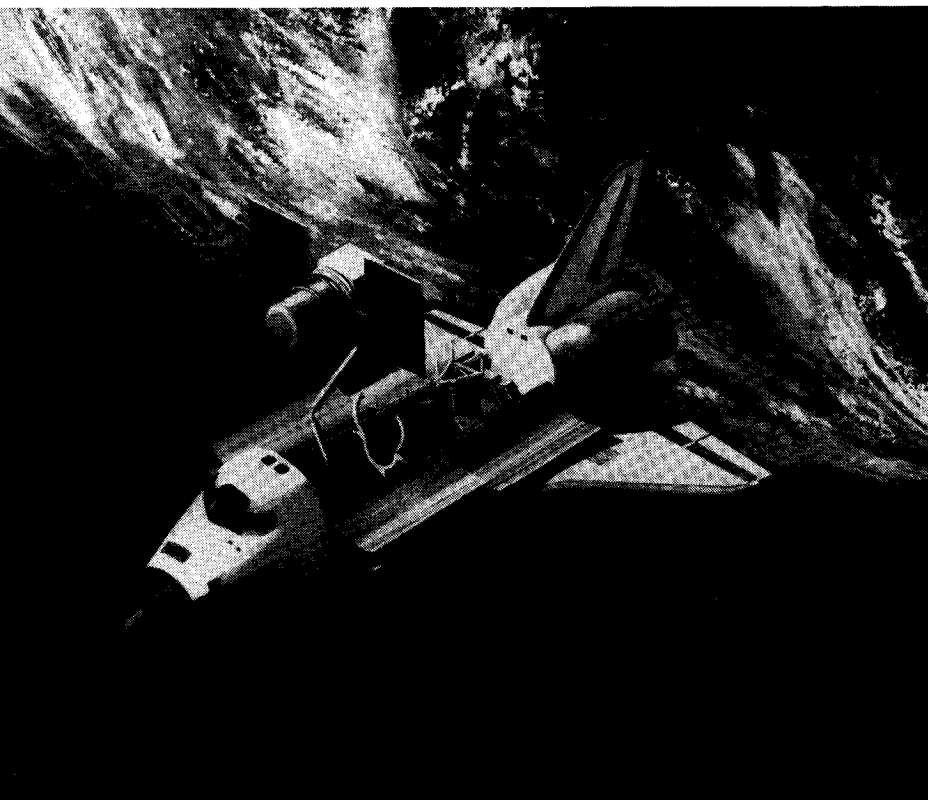
Il pourra être utilisé à la fois sur la Navette et sur le lanceur Titan 34 D. Le premier vol de l'IUS sur la Navette a eu lieu en avril 1983 (STS-6) ;

- le *Spinning Solid Upper Stage* (SSUS), à propergols solides, tire son nom du fait qu'il est stabilisé par rotation sur lui-même. Ses performances sont plus modestes que celles de l'IUS : il servira aux charges utiles pesant de 1,1 à 2 tonnes. Sa première utilisation sur la Navette date de novembre 1982 (STS-5).

Quelle sera la fréquence d'utilisation de ces étages supérieurs ? Vraisemblablement élevée. En 1976, il était estimé par la NASA que 62 % des missions de la Navette exigeraient le recours à un étage supérieur ;

* DE SERVIR DE PLATE-FORME. A lui seul, en effet, l'orbiteur n'est qu'un moyen de transport : ce n'est ni un laboratoire, ni une station orbitale. Mais il peut très bien — dans son mouvement orbital autour de la Terre — servir de support par exemple à un laboratoire spatial dont il reste solidaire. C'est un tel rôle qui est réservé au *Spacelab* à la réalisation duquel ont travaillé dix des onze états actuellement membres de l'Agence spatiale européenne. Il représente la contribution de l'Europe au système de transport spatial américain.

Le Spacelab, c'est la possibilité de disposer sur orbite d'un laboratoire mettant à profit les conditions expérimentales que



Photographie 1

Vue d'artiste illustrant un type de mission de la Navette :
mise sur orbite d'un satellite que le bras de télémanipulation extrait
de la soute (*Doc. Martin Marietta*).

seul le vol spatial peut offrir : absence prolongée de pesanteur, plate-forme d'observation unique pour étudier aussi bien la Terre (large champ de vision) que la sphère céleste (au-delà des turbulences et de l'absorption de l'atmosphère).

Sa conception, d'une grande souplesse, fait intervenir en nombre variable des éléments modulaires. Schématiquement, le Spacelab comprend un module pressurisé (enceinte où peuvent travailler, sans scaphandre, des ingénieurs et des scientifiques) et une (ou plusieurs) plate-forme (en anglais : *a pallet*) sur laquelle reposent — à ciel ouvert — matériels et équipements divers : télescopes, antennes,...

Installé dans la soute de l'orbiteur, le Spacelab ne la quitte jamais. Une fois les portes de la soute ouvertes, sa mission peut commencer : dans le cas général, elle durera 7 jours. La mission terminée, les portes sont refermées et l'orbiteur revient sur Terre où l'on procédera à l'extraction du Spacelab.

Construit par un consortium industriel conduit par ERNO (firme allemande choisie par l'ASE en juin 1974), le premier modèle de vol du Spacelab a été remis à la NASA en décembre 1981. Son vol sur la Navette s'est effectué à l'automne 1983 : le premier astronaute de l'Agence spatiale européenne était à bord (voir EI, n° 15, p. 21).

Prévu pour une cinquantaine de vols, il a une durée de vie théorique de 10 ans. Sa réalisation aura coûté à l'ASE près de 8 milliards de francs (prix 1983). Un deuxième exemplaire du Spacelab, commandé par la NASA, est en cours de construction.

* L'INSPECTION OU LA RÉCUPÉRATION DE SATELLITES DÉJÀ SUR ORBITE. Il s'agit là d'une possibilité tout à fait nouvelle, encore jamais rencontrée dans l'histoire de la recherche spatiale.

Si un satellite quelconque suit une trajectoire accessible à l'orbiteur, celui-ci peut ou bien s'en approcher et le saisir à l'aide du bras de manipulation ou bien envoyer un petit remorqueur piloté (MMU), qui ramènera le satellite vers l'orbiteur. Munis d'une tenue appropriée, des astronautes peuvent rejoindre le satellite et entreprendre toute opération jugée nécessaire : inspection, réparations (ou remplacement) d'instruments ou d'équipements défectueux, prélèvement de cassettes de film ou d'échantillons divers : c'est la *maintenance sur orbite*.

Si l'état du satellite nécessite son retour au sol, ou simplement si une révision complète est souhaitée, il sera stocké dans la soute et ramené sur Terre.

C'est particulièrement efficace lorsque on a tenu compte, lors de la conception du satellite « dépanné » ou « visité », de cette révision éventuelle. La NASA étudie actuellement la possibilité d'aller réparer sur orbite au printemps 1984 le satellite astronomique SMM (Solar. Maximum Mission) dont le système de commande d'attitude est tombé en panne en novembre 1980, ce qui empêche le pointage du satellite vers le Soleil, comme l'exige sa mission. Lancé le 14 février 1980, c'est le premier satellite conçu pour être récupéré par la Navette (points d'attache compatibles avec le bras télémanipulateur, composants modulaires,...) en vue de sa modernisation (tout le destinait donc à tomber en panne... ce qu'il n'a pas manqué de faire !)

Autre exemple, l'inspection périodique du télescope spatial (*Space Telescope*) que la NASA doit satelliser en 1986 devrait lui donner une durée de vie exceptionnelle d'une quinzaine d'années (voir EI, n° 14, p. 2).

Signalons aussi le concept du LDEF (*Long Duration Exposure Facility*) : c'est une grande structure métallique constituée de bacs dans lesquels pourront être installés des expériences, des instruments, des composants électroniques, des collecteurs de particules,... Installé dans la soute de l'orbiteur, le LDEF pourrait être libéré par une première Navette et récupéré six mois plus tard au cours d'une autre mission : ramenés au sol, les divers équipements expérimentaux seraient récupérés et soumis à l'examen ;

* dans un futur plus éloigné, la RÉALISATION DE PROJETS TRÈS AMBITIEUX, par exemple la mise en place de vastes *structures orbitales* métalliques pouvant servir d'usine spatiale, de laboratoire orbital ou simplement de plate-forme à des fins diverses (radiotélescopes, radars, générateurs d'énergie, antennes de télécommunications,...).

Les éléments de base de telles structures pourraient être transportés repliés dans la soute de l'orbiteur puis déployés sur orbite : leur assemblage serait réalisé soit de façon automatique (les différentes parties s'unissant les unes aux autres), soit par des astronautes équipés de systèmes de propulsion individuels.

À l'heure actuelle, la NASA finance la poursuite d'études visant à la mise au point d'une *station orbitale permanente* qui pourrait voir le jour — si la décision était prise — dans les années 90. Pour le moment, deux options sont en concurrence : le *Space Operations Center* (SOC), étudié chez Boeing et une *plate-forme spatiale évolutive*, étudiée par McDonnell Douglas. Il est probable que la configuration choisie sera différente et que l'on s'orientera vers une station spatiale construite par paliers en vue de la conduite d'opérations spatiales à partir de l'espace.

Quels seront les utilisateurs de la Navette ?

À l'origine, les intentions des promoteurs de la Navette étaient claires : il fallait banaliser l'accès à l'espace. Ce qui impliquait, entre autres, la rapidité et la simplicité d'utilisation.

Rapidité ? Cela signifie accélérer les opérations de mise en configuration de lancement, réduire la durée de la campagne de lancement. En un mot, que la Navette décolle presque aussi naturellement qu'un Airbus...

Simplicité ? Il fallait faire de la Navette un outil, mais un outil simple. Fini le temps des astronautes hyper-entraînés : à

terme, n'importe quel scientifique ou ingénieur, en bonne condition physique, devrait pouvoir y prendre place, les contraintes physiques (accélérations, décélérations,...) étant rendues moins éprouvantes que sur les lanceurs classiques.

Pour être promis à une large utilisation, un lanceur moderne devait s'adapter à l'Homme... et non le contraire. Il ne fallait pas recommencer les erreurs du programme Apollo qui, par certains côtés, avait découragé les scientifiques et n'avait pas bénéficié de leur soutien. Selon l'un d'eux : « *On passait dix fois plus de temps à préparer un magnétomètre pour un vol Apollo [tant étaient nombreuses les contraintes] que le même instrument pour une mission inhabitée* ». Terminons par cette image qui se suffit à elle-même : l'outil devait s'adapter à la main et non la main se déformer pour empoigner convenablement l'outil !...

Les prévisions d'utilisation de la Navette ont beaucoup varié au cours du temps. En 1973, la NASA envisageait de 60 à 70 vols par an (soit plus d'un par semaine !) dans les années 80. Aujourd'hui il n'est prévu d'atteindre le rythme de 24 vols par an qu'à partir de 1988 (soit un total de moins de 200 vols d'ici à 1992. Pour la même période, on en prévoyait 486 en 1980 et 570 en 1976 alors que cinq orbiteurs étaient attendus).

Comment se répartissent les vols prévus pour les dix prochaines années ? Au début de 1981, on prévoyait approximativement :

* $\simeq$ 30 % DES MISSIONS POUR LES USAGES MILITAIRES. Les autorités militaires américaines (le DOD, *Department of Defense*) ont joué un rôle important dans la conception et le financement de la Navette spatiale (ils auraient contribué pour environ 2,3 milliards de dollars ; données 1981).

Afin de garantir le secret à leurs missions spatiales, ils ont entrepris la construction d'un nouveau centre de contrôle des opérations pour coordonner les vols militaires de la Navette. Installé à Colorado Springs, dans le Colorado, près du centre de la NORAD, il devrait être opérationnel vers 1986. Pendant un temps a été envisagée la construction d'un orbiteur qui serait la propriété exclusive des autorités militaires.

Dans le même ordre d'idée, l'US Air Force a récemment demandé l'étude d'un *planeur spatial*, habité ou non, qui serait lancé depuis la Navette pour des missions militaires en liaison avec un réseau de stations sur orbite.

Demain les militaires seront des *utilisateurs prioritaires* de la Navette : leurs missions devront être satisfaites les premières, quitte à reporter d'autres missions (scientifiques ou commer-

ciales). De vives critiques ont d'ailleurs été émises il y a peu de temps par l'Union soviétique qui s'inquiète des nouvelles possibilités militaires que la Navette spatiale va, selon elle, offrir aux Etats-Unis.

D'autre part, en vue de réaliser d'éventuelles interventions rapides, l'US Air Force fait étudier un autre concept de petite navette spatiale qui serait lancée à partir d'un avion à réaction gros porteur. Avec un préavis de lancement très court, elle serait capable d'atteindre rapidement une orbite basse ;

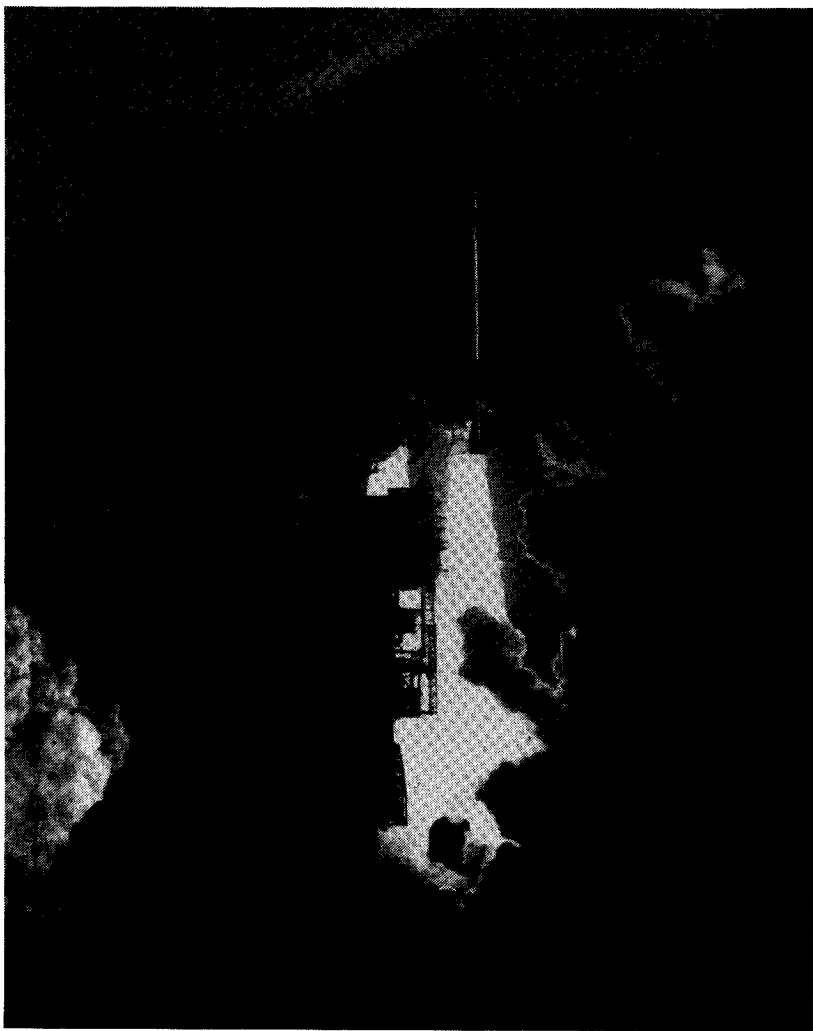
* $\simeq$ 35 % DES MISSIONS POUR LA NASA. Ces vols, à caractère scientifique, expérimental ou technologique, seront réalisés au profit soit du gouvernement, soit d'agences spatiales étrangères. Les disciplines concernées sont, entre autre, l'astronomie, la physique, les sciences de la vie, la métallurgie en impesanteur, l'étude de la Lune et des planètes. Par exemple, c'est dans cette catégorie qu'entrent les missions Spacelab de l'Agence spatiale européenne ;

* $\simeq$ 35 % DES MISSIONS POUR D'AUTRES UTILISATEURS. Elles ont un caractère opérationnel et commercial et font intervenir des satellites dits d'applications (télécommunications civiles, observation de la Terre, météorologie, navigation, industrie spatiale,...). Les clients sont alors divers organismes, des administrations américaines ou étrangères.

A signaler, le programme *Getaway Special*, réalisé au moyen de conteneurs installés dans la soute et pouvant recevoir un certain nombre de petites charges utiles (moins de 200 livres soit 90,7 kg et de 5 pieds cubes soit 0,14 m³) dont le financement serait privé (organisations à but non lucratif, sociétés professionnelles, industrie privée, particuliers, étudiants, chercheurs,...) : à la fin de 1981, la NASA avait déjà accepté plus de 300 expériences de ce type.

Où en est actuellement le programme d'utilisation de la Navette et comment se présente-t-il pour les toutes prochaines années ?

A ce jour, les quatre premiers vols expérimentaux ont eu lieu : STS-1 (avril 1981), STS-2 (décembre 1981), STS-3 (mars 1982), STS-4 (juin 1982). La qualification du système de transport spatial ayant été prononcée, les *premiers vols opérationnels* ont pu débuter : STS-5 en novembre 1982, STS-6 en avril 1983, STS-7 en juin 1983, STS-8 en août-septembre 1983 et STS-9 en novembre-décembre 1983. (La mission STS-10 a purement et simplement été supprimée du calendrier à la fin de 1983.) Puis viendront STS-11 (29 janvier 1984), STS-13 (avril), STS-12 (mai), STS-14 (juin), STS-15 (juillet), STS-16 (août),...



Photographie 2. — La Navette spatiale quitte sa base de lancement de Cap Canaveral (*Photo AFP*).

Durant l'été 1981, la NASA décidait de réduire de 48 à 36 le nombre de vols de la Navette prévus jusqu'en 1985. Au début de 1982, ce nombre était ramené à 28 et au début de 1983, la cadence prévue des missions était la suivante : 5 en 1983 (4 seulement seront réalisées), 11 en 1984, 13 en 1985, 17 en 1986, 24 en 1987,...

On peut prévoir que la Navette sera vraiment opérationnelle vers la fin de 1985 lorsque seront disponibles les quatre orbiteurs et les deux centres de lancement.

Un pari économique ambitieux.

La décision de développer le système de transport spatial — dont la Navette n'est qu'un élément — résulte d'un pari sur l'avenir : selon les experts américains, *l'industrialisation de l'espace* est pour demain et *l'occupation permanente du proche environnement terrestre* va s'imposer.

Mais la réussite, au sens économique, d'un si vaste projet suppose plusieurs choses, notamment :

- la *pleine utilisation* des capacités du système : à pleine charge, l'orbiteur est un véhicule d'une centaine de tonnes dont 30 % au maximum sont constitués par la charge utile. Une bonne rentabilité du système implique des voyages à pleine charge. Quel sera dans la pratique le taux de remplissage de la soute ?

- la *réutilisation*, dans les conditions prévues, des différents éléments de la Navette. Là aussi des incertitudes subsistent : quelle sera la durée de remise en état de l'orbiteur entre deux missions ? l'ampleur des réparations ? leur coût ? Pourra-t-il supporter une centaine d'allers et retours Terre/orbite ? Ses moteurs satisferont-ils aux 55 allumages escomptés ? Par ailleurs, les fusées d'appoint seront-elles récupérées et remises en état dans les conditions attendues ? Pourront-elles servir une vingtaine de fois ? Autant de questions — encore sans réponse — qui conditionnent la réussite ou l'échec de la NASA quant à ce pari économique.

La Navette ou Ariane ? Au cours de ces dernières années, les organes d'information n'ont pas manqué de souligner cette concurrence dans le domaine spatial. Sans revenir sur cette question (évoquée dans le numéro sur Ariane, EI, n° 17, p. 14), disons simplement que les deux lanceurs n'ont pas la même finalité (*).

La Navette a été « optimisée » (c'est-à-dire plus particulièrement conçue) pour la satellisation, à faible altitude, de très lourdes charges (plusieurs dizaines de tonnes). Ce qui ne veut pas dire qu'elle soit incapable de lancer des engins géostationnaires ou sur orbite polaire ; simplement, dans ce cas, le « rendement » est moindre...

De son côté, Ariane a été « optimisée » pour le lancement de satellites géostationnaires (sur l'orbite définitive : environ 1 tonne avec la version Ariane-1 et jusqu'à 2,5 tonnes avec Ariane-4). Ce

(*) Voir l'article de J.-C. BOUILLON, *Ariane ou la Navette ?*, Futuribles (55, rue de Varenne, 75007 Paris), n° 38, novembre 1980, p. 49.

qui ne l'empêche pas de pouvoir lancer des satellites sur des orbites plus basses (par exemple SPOT en 1984).

Si les deux lanceurs répondent à des préoccupations très différentes, il n'en est pas moins vrai qu'ils se trouvent en concurrence pour les satellites géostationnaires de quelques tonnes et les coûts, alors, deviennent assez comparables. Pour le client éventuel, c'est plus qu'une simple comparaison de tarifs car il doit également prendre en compte des éléments difficiles à « chiffrer » comme les délais et conditions de remise de la charge utile, les éventualités d'un report, les facilités de paiement, etc.

Qu'en est-il sur le plan financier ?

En 1972, l'enveloppe autorisée pour le programme *Shuttle* était de 5,15 milliards de dollars 1971 (plus 20 % d'aléas). A partir de 1979, en raison de sérieuses difficultés technologiques, la NASA était contrainte de réviser les estimations initiales. Au moment du premier vol du premier orbiteur (avril 1981), on admettait que les 9 milliards de dollars (1980) seraient dépassés pour parvenir au stade de la Navette opérationnelle, c'est ce qu'on appelle les frais de développement. Par rapport aux évaluations publiées en 1971, le dépassement du coût de développement (en dollars constants, pour tenir compte de la dépréciation de la monnaie, ce qu'on appelle l'inflation, le dollar de 1981 ayant une valeur inférieure au dollar de 1971) avoisine les 30 %.

En mai-juin 1981, la NASA chiffrait le coût global du programme *Shuttle* à environ 15,5 milliards de dollars (1982) dont 9,9 pour les frais de développement et 5,6 pour les frais de production.

A titre indicatif, pour 1982, le programme Navette représente le tiers des autorisations de programmes de la NASA.

Donnons quelques prix : ce ne sont que des données partielles malheureusement insuffisantes pour permettre au lecteur d'établir des comparaisons ou un bilan. A lui seul, chaque orbiteur coûte environ 800 millions de dollars. En période opérationnelle, à partir de novembre 1982, la NASA facture un lancement à pleine charge 35 millions de dollars soit 18 millions de dollars 1975 (le prix est moindre pour une occupation partielle : 26,3 millions pour 65 % de la soute et 10,9 millions pour 19 % de la soute). Ces prix sont valables jusqu'en 1985 : un ajustement sera alors fait pour tenir compte, d'une part, de l'inflation, d'autre part, des résultats enregistrés. Une forte augmentation est attendue : on considère qu'à cette époque un vol à pleine charge sera facturé 38 millions de dollars 1975 (soit de 80 à 90 millions 1985).

Ces chiffres sont à rapprocher des tarifs actuellement pratiqués dans le domaine des lanceurs : environ 30 millions de dol-

lars pour Thor Delta (≈ 1 tonne sur orbite en transfert), 200 millions de francs pour Ariane-1 (1,7 tonne en orbite de transfert) et environ 50 millions de dollars pour Atlas Centaur (≈ 2 tonnes en transfert).

Par ailleurs, en juillet 1981, la NASA rendait publiques les estimations suivantes : coût d'une fusée d'appoint (SRB) ≈ 25 millions de dollars ; récupération et remise en état ≈ 7 millions de dollars par fusée soit 14 millions par mission.

APRES LA NAVETTE ?

La Navette spatiale américaine est parfois présentée comme devant supplanter *tous* les autres lanceurs américains. Rien n'est moins sûr et pendant de nombreuses années encore, on verra coexister les deux procédés de lancement, même aux Etats-Unis sans doute.

La preuve nous en est fournie par la décision des Américains de poursuivre la production des lanceurs traditionnels, voire même les modifier quelque peu (par exemple, les Delta) ainsi que par les récents contrats passés par la NASA à l'industrie pour l'étude d'un nouveau lanceur, le SRB-X. Utilisant certains éléments du *Shuttle* (booster et réservoir extérieur notamment), celui-ci serait capable de placer une charge utile (sans passager) d'environ 30 tonnes en orbite basse. Le SRB-X serait destiné à lancer les charges utiles conçues pour la Navette... quand celle-ci ne sera pas immédiatement disponible. Ainsi se confirme donc la volonté de la NASA de mettre en service une « flotte mixte » de Navettes spatiales et de lanceurs conventionnels.

Pour en revenir à la Navette, il faut bien reconnaître que le concept actuel a ses limites. Il a été dit que les contraintes budgétaires avaient empêché la NASA de développer un engin à deux étages entièrement récupérables. Et la Navette que nous connaissons ne constitue pas le véhicule idéal : à chaque mission, le réservoir extérieur est détruit et les deux boosters (qui ne peuvent théoriquement servir que de 10 à 20 fois) doivent être récupérés et remis en état pour un vol ultérieur. L'orbiteur lui-même, n'est conçu que pour une centaine de vols au maximum...

Néanmoins, c'est cet engin qui devrait être utilisé pendant quinze ou vingt ans. Bien sûr, au fil du temps, il bénéficiera d'améliorations lui permettant — vers les années 1995-2000 — de satelliser jusqu'à une centaine de tonnes en orbite basse. Parallèlement on cherchera à *augmenter la durée des missions*, actuellement limitée à 7 jours (après l'abandon du projet du générateur solaire déployable, la solution pourrait venir d'un véhicule en permanence sur orbite destiné à la production d'électricité d'origine solaire, le module de puissance ou *Power Module*).

Au-delà ? Dans l'état actuel des choses, il est très délicat de se risquer à prédire le développement que pourraient connaître les moyens de lancement américains et il n'est pas évident du tout que se poursuive la course au gigantisme.

ANNEXE 1

LES GRANDES DATES DU PROGRAMME SHUTTLE

(Shuttle = Navette)

* *Fin des années cinquante* : premières études sur la *récupération partielle des lanceurs de satellites* et la réalisation d'un *planeur hypersonique*.

* *Vers 1969* : début des études officielles du projet de *navette spatiale*.

* *31 juillet 1971* : le congrès américain approuve le projet.

* *5 janvier 1972* : le président Nixon annonce officiellement la *décision de construire une navette spatiale*. Le coût du projet est alors estimé à environ 5,2 milliards de dollars. Le premier vol expérimental est prévu en 1978.

* *15 mars 1972* : les principales caractéristiques du projet sont figées.

* *17 septembre 1976* : le premier orbiteur (*Enterprise*) sort de l'usine Rockwell Int. de Palmdale (Californie) et est transporté jusqu'à la base Edwards pour des tests de vol et d'atterrissage. A cette époque, la NASA prévoit environ 570 missions de 1980 à 1992 au moyen de cinq orbiteurs.

* *18 février 1977* : fixé sur le dos d'un Boeing 747 modifié, *Enterprise* effectue son *premier vol captif* (durée ≈ 2 h, altitude et vitesse atteintes $\approx 7\,200$ m et 460 km/h). Au total, huit vols captifs (5 vols sans passagers et 3 vols avec 2 astronautes à bord de l'orbiteur) seront réalisés.

* *12 août 1977* : *premier vol libre de l'Enterprise* qui, lâché depuis le Boeing de la NASA, revient au sol sous la conduite de deux astronautes. Au total, cinq vols libres (durée totale ≈ 20 mn 56 s) seront effectués.

* *mars 1979* : la construction d'un second orbiteur (*Columbia*) s'achève. C'est le premier modèle de vol.

* 20 février 1981 : premier tir statique des trois moteurs principaux de *Columbia* sur l'aire de lancement. Pendant une vingtaine de secondes, ils développent entre 94 et 100 % de la poussée nominale.

* 12 avril 1981 : premier vol expérimental (STS-1) de la Navette spatiale (orbiteur : *Columbia* ; équipage : Young et Crippen ; durée $\simeq$ 54 h).

* 12 novembre 1981 : deuxième vol expérimental (STS-2) de la Navette spatiale (orbiteur : *Columbia* ; équipage : Engle et Trully ; durée $\simeq$ 54 h).

* 22 mars 1982 : un troisième vol expérimental (STS-3) de la Navette spatiale (orbiteur : *Columbia* ; équipage : Lousma et Fullerton ; durée $\simeq$ 8 jours).

Un quatrième vol expérimental (STS-4) a eu lieu du 27 juin au 4 juillet 1982 et les cinq premières missions opérationnelles se sont déroulées en novembre 1982 (STS-5), en avril 1983 (STS-6), en juin 1983 (STS-7), en août-septembre 1983 (STS-8) et en novembre-décembre 1983 (STS-9).

ANNEXE 2

LE PREMIER VOL DE LA NAVETTE (STS-1, avril 1981)

Premier des quatre vols expérimentaux prévus, STS-1 (Space Transportation System) était destiné à s'assurer de l'aptitude de la Navette à se comporter comme prévu au cours des différentes phases du vol (décollage, vol orbital, rentrée atmosphérique, atterrissage). Il s'agissait donc d'étudier les réactions de ses différents éléments (orbiteur, réservoir extérieur et fusées auxiliaires) et d'obtenir des données sur leur comportement réel en vol.

Outre l'originalité du véhicule lui-même, les innovations étaient nombreuses. Entre autres, c'est la première fois que les Etats-Unis procédaient au lancement d'un nouveau véhicule spatial habité sans essais à vide préalables. C'est aussi la première fois que des propulseurs à poudre étaient utilisés pour un vol habité.

Avant de résumer le vol proprement dit, récapitulons les principales étapes préliminaires :

* 25 mars 1979 : arrivée de l'orbiteur *Columbia* au centre spatial Kennedy.

* *novembre 1980* : assemblage, sur une plate-forme mobile à chenilles, du réservoir extérieur, des deux boosters et de Columbia (hissé par une grue spéciale).

* *29 décembre 1980* : la première Navette spatiale est transportée jusqu'à son aire de lancement.

* *20 février 1981* : fonctionnement simultané, durant une vingtaine de secondes, des trois moteurs principaux de l'orbiteur.

* *10 avril 1981* : première tentative de lancement. Interruption de la chronologie en raison d'une erreur de synchronisation entre les quatre ordinateurs principaux et le calculateur de réserve. Le lancement aura lieu deux jours plus tard.

Chronologie des principaux événements du vol.

• *au temps $\simeq T - 6,5$ s* : début de la séquence d'allumage des trois moteurs principaux (SSME) de l'orbiteur.

• *au temps T* (le dimanche 12 avril 1981, à 12 h 10 mn 3,9 s TU) : *allumage des deux boosters et décollage de la Navette.*

• $\simeq T + 53$ s : franchissement du mur du son (altitude $\simeq 7,2$ km ; vitesse : Mach 1 soit environ 1 200 km/h).

• $\simeq T + 1$ mn 53 s : altitude $\simeq 36$ km ; vitesse $\simeq$ Mach 3.

• $\simeq T + 2$ mn 11 s : les boosters sont éjectés (altitude $\simeq 49$ km ; vitesse $\simeq$ Mach 4,5 soit $\simeq 4 625$ km/h). Ralentis par des parachutes, ils toucheront l'eau environ 5 mn plus tard à 240 km du site de lancement.

• $\simeq T + 4$ mn : altitude $\simeq 111$ km ; vitesse $\simeq$ Mach 6,3.

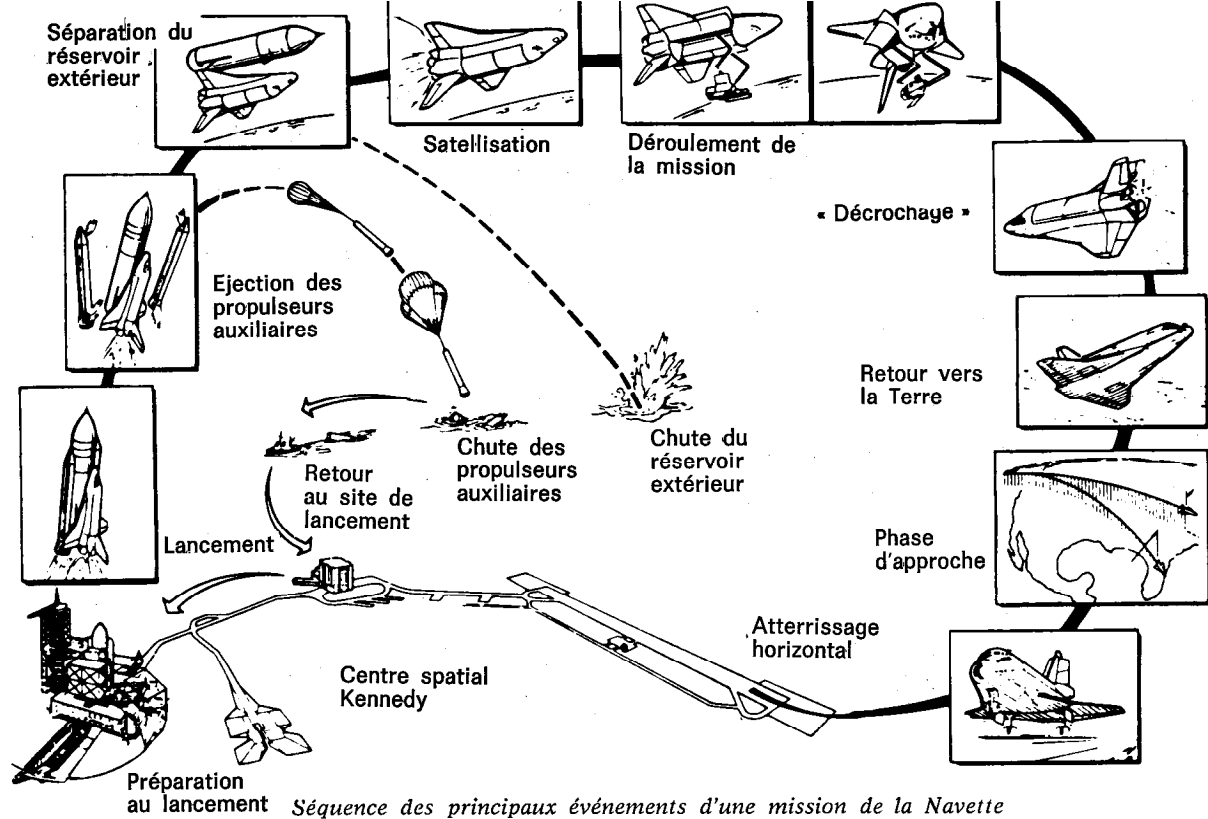
• $\simeq T + 6$ mn 30 s : altitude $\simeq 129$ km ; vitesse $\simeq$ Mach 15.

• $\simeq T + 7$ mn 30 s : l'accélération maximale est atteinte (3 g) ; altitude $\simeq 124$ km ; vitesse $\simeq$ Mach 17.

• $\simeq T + 8$ mn 32 s : arrêt des trois moteurs principaux ; c'est la fin du vol propulsé (altitude $\simeq 119$ km ; vitesse $\simeq$ Mach 25 soit environ 26 715 km/h par rapport à la Terre, ce qui est inférieur à la vitesse de satellisation à cette altitude).

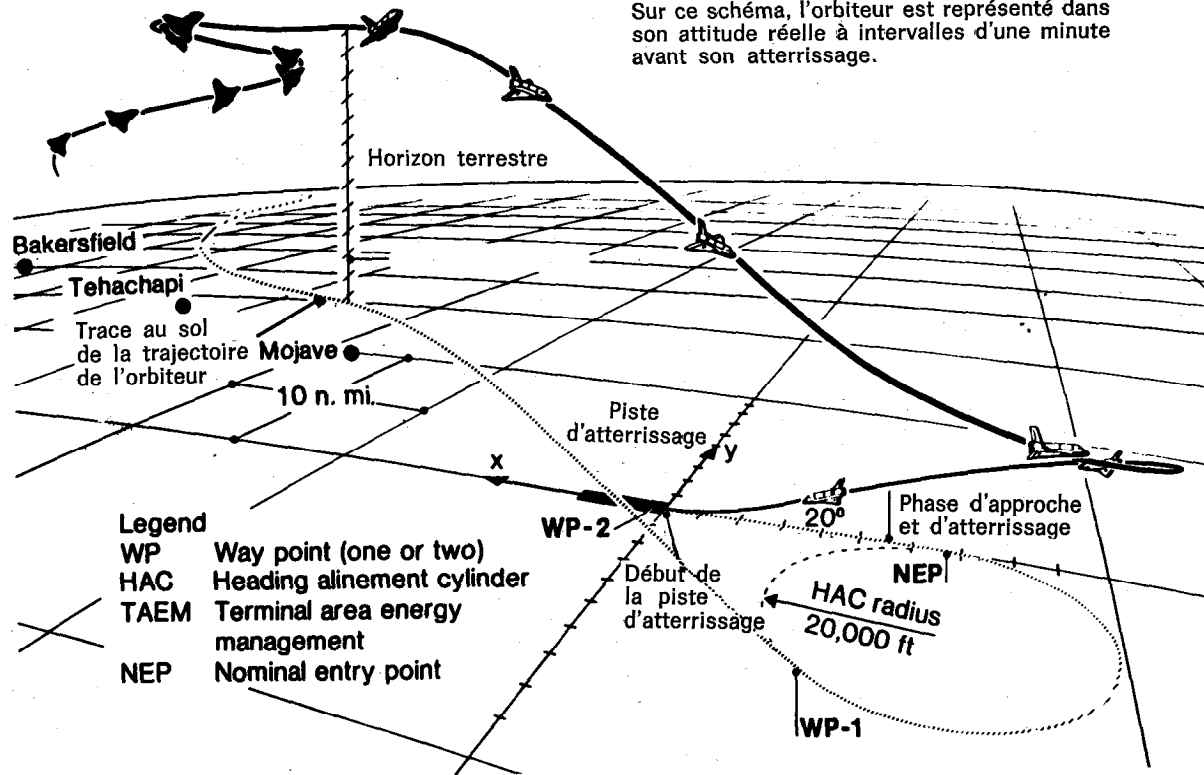
Une vingtaine de secondes plus tard, le réservoir extérieur est largué et il retombera dans l'océan.

• $\simeq T + 10$ mn 36 s : premier allumage des deux moteurs de manœuvre orbitale (OMS), ce qui va permettre à l'orbiteur d'atteindre la vitesse de satellisation et de graviter sur une orbite provisoire. D'autres manœuvres « circulariseront » cette orbite à une altitude moyenne d'environ 275 km.



Séquence des principaux événements d'une mission de la Navette
(Doc. Martin Marietta).

Sur ce schéma, l'orbiteur est représenté dans son attitude réelle à intervalles d'une minute avant son atterrissage.



Le retour de Columbia à l'issue de son premier vol (Doc. Nasa).

- $\simeq T + 3 \text{ h } 30 \text{ mn}$: les deux astronautes ôtent leur scafandre pressurisé et endossent les survêtements qu'ils conserveront toute la mission (ils feront les gestes inverses avant le retour, vers $T + 50 \text{ h } 30 \text{ mn}$).

La partie « spatiale » proprement dite de la mission STS-1 commence : *elle va se poursuivre deux jours* et consistera essentiellement à vérifier les divers éléments de Columbia et à tester son aptitude au vol et aux manœuvres.

- Le moment du retour étant venu, l'orbiteur effectue — au moyen de ses moteurs auxiliaires — un demi-tour sur lui-même : il progresse en quelque sorte « à reculons » et « la tête en bas ». Mis à feu (à partir de $\simeq T + 53 \text{ h } 21 \text{ mn}$) les moteurs secondaires (OMS) de l'orbiteur agissent comme des rétrofusées et réduisent — dans un premier temps — la vitesse d'environ 300 km/h, ce qui a pour effet de placer l'orbiteur sur une trajectoire de rentrée. Columbia qui reprend rapidement son attitude initiale (« ventre dirigé vers le sol ») survole alors l'océan Indien et se dirige vers les Etats-Unis.

- $\simeq T + 53 \text{ h } 50 \text{ mn}$: l'orbiteur amorce sa descente (vitesse $\simeq$ Mach 24 ; altitude $\simeq$ 120 km ; éloignement de la piste d'atterrissage $\simeq$ 8 000 km). Sous l'effet du frottement atmosphérique, la température des parois croît considérablement, ce qui provoque l'ionisation de l'air environnant et l'interruption des communications radio entre Columbia et le sol : c'est le *black-out* qui prendra fin vers $T + 54 \text{ h } 08 \text{ mn}$ (vitesse $\simeq$ Mach 10,8 ; altitude $\simeq$ 60 km).

Diverses manœuvres permettent à Columbia de réduire sa vitesse : au terme de quelques virages, il est en vue de la base Edwards de l'US Air Force (en Californie, à 140 km au nord-est de Los Angeles, dans le désert Mojave) où a été aménagée — sur le fond asséché de l'ancien lac salé Rogers — une piste longue de 8 km et large de 90 m.

- $\simeq T + 54 \text{ h } 20 \text{ mn } 52 \text{ s}$: *Columbia touche le sol* à la vitesse d'environ 330 km/h. Il s'immobilise environ 2 700 m plus loin ($\simeq T + 54 \text{ h } 21 \text{ mn } 50 \text{ s}$), 851 m au-delà du point prévu. Il vient d'accomplir dans l'espace un périple estimé à 1 733 450 km en deux jours un quart ! Les équipes de décontamination interviennent immédiatement pour éliminer les gaz hautement toxiques des tuyères.

- $\simeq T + 55 \text{ h } 28 \text{ mn}$: Young et Crippen quittent Columbia. A tous points de vue, la mission STS-1 est un succès (voir EI, n° 20, p. 24).

ANNEXE 3

LA NAVETTE EN CHIFFRES

Ce qu'on appelle la Navette spatiale comprend en fait plusieurs éléments : un réservoir extérieur, deux fusées auxiliaires et un orbiteur.

* masse totale au décollage $\simeq 2\,040$ t soit l'équivalent de 6 Boeing 747 à pleine charge ou de 10 fusées Ariane-1 ;

* poussée totale au décollage $\simeq 30\,800$ kN ;

* hauteur totale $\simeq 56,1$ m ;

* accélération initiale : $0,45$ g (le calcul approximatif de cette valeur peut être fait selon la méthode indiquée pour Ariane (voir EI, n° 17, p. 13)).

* *Réservoir extérieur (External Tank, ET) :*

- longueur $\simeq 47$ m ;
- diamètre $\simeq 8,4$ m ;
- masse $\simeq 35$ t (à vide) et $\simeq 756$ t (rempli) ;
- capacité $\simeq 721$ t (2 millions de litres) dont environ 618 t d'oxygène liquide et 103 t d'hydrogène liquide.

* *Fusées auxiliaires (Solid Rocket Boosters, SRB) :*

- longueur $\simeq 45,5$ m ;
- diamètre $\simeq 3,7$ m ;
- masse unitaire $\simeq 580$ t dont 504 t de poudre ;
- poussée unitaire $\simeq 12\,900$ kN (niveau de la mer).

* *Orbiteur (Orbiter Vehicle, OV) :*

- longueur $\simeq 37,2$ m ;
 - envergure $\simeq 23,8$ m ;
 - masse $\simeq 68$ t (à vide), 97 t maximum (au décollage) et $82,5$ t maximum (à l'atterrissage) ;
 - 3 moteurs principaux (SSME), poussée unitaire $\simeq 1\,668$ kN (niveau de la mer) ;
 - 2 moteurs secondaires (OMS), poussée unitaire $\simeq 26,7$ kN.
-

ANNEXE 4

L'ORBITEUR, UN ENGIN REVOLUTIONNAIRE

Le véhicule orbital ou *orbiteur* (*Orbiter Vehicle*) a l'aspect et approximativement les dimensions d'un avion commercial contemporain (type DC 9). Mais c'est un avion très particulier pouvant atteindre, en une dizaine de minutes, une centaine de kilomètres d'altitude et la vitesse fantastique d'environ 28 000 km/h. Autrement dit, *il est en mesure de se satelliser autour de la Terre...*

En outre, c'est la première fois dans l'histoire de l'astronautique qu'un véhicule de ce type, capable de regagner le sol par ses propres moyens, peut se prêter à plusieurs utilisations successives.

Structure et protection thermique.

La partie externe de la structure de l'orbiteur est essentiellement à base d'alliages d'aluminium et de divers matériaux composites. Elle est donc légère mais... très sensible à la chaleur. En aucun cas, elle ne doit être soumise à des températures supérieures à 176°C. Or l'orbiteur est exposé à un échauffement cinétique très important au cours du vol ascensionnel et surtout lors de la rentrée atmosphérique (jusqu'à 200 ou 300 kW/m²... à titre de comparaison, rappelons que le flux solaire, au sol, est de l'ordre de 1 kW/m²).

Pour les parties les plus exposées, les températures peuvent atteindre de 1 200 à 1 600°C. D'où la nécessité de doter l'orbiteur d'une *protection thermique* (l'intérieur du véhicule étant régulé thermiquement par un système adapté). Contrairement à celle des véhicules spatiaux employés jusqu'à ce jour, elle sera *permanente* du fait de la réutilisation de l'orbiteur.

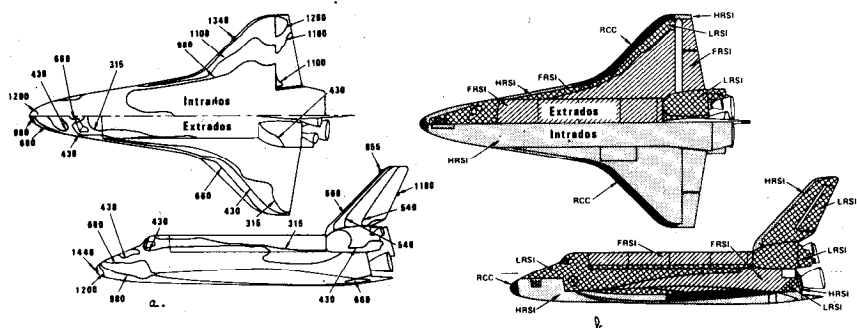
On y parvient en faisant appel à plusieurs matériaux isolants, chacun étant adapté à une certaine gamme de températures. La masse totale de la protection thermique de l'orbiteur est de l'ordre de 7 tonnes.

Les matériaux retenus sont le plus souvent des composites, généralement synthétiques (résines, fibres,...) qui ont subi de nombreux traitements (chimiques, thermiques, mécaniques,...). Citons les trois matériaux principaux :

- *le revêtement FRSI (Felt Reusable Surface Insulation)* qui est utilisé pour les parties les moins exposées, où la température reste inférieure à environ 400°C (les portes de la soute, la partie supérieure des ailes, la partie latérale du fuselage,...).

• *les tuiles en fibre de silice.* Un même matériau de départ conduit, après traitements spécifiques, à deux catégories de tuiles utilisées soit pour les basses températures, soit pour les hautes températures :

— LES TUILES LRSI (LOW-TEMPERATURE, REUSABLE SURFACE INSULATION) sont appliquées en des zones où la température reste comprise entre 371 et 648°C (voir schéma).



Protection thermique de l'étage orbital.
a. isothermes (en °C).
b. matériaux de protection employés.

(Doc. L'aéronautique et l'astronautique).

— LES TUILES HRSI (HIGH-TEMPERATURE,...) sont réservées aux endroits ayant à supporter des températures comprises entre 648 et 1 260°C (partie inférieure du fuselage et des ailes, certaines portions de la queue,...).

Ce sont ces tuiles qui ont beaucoup fait parler d'elles à partir de 1980. Faites de fibres de silice, très légères (leur densité est comprise entre 0,15 et 0,30), elles sont fragiles et ont surtout une fâcheuse tendance à se décoller des parois sur lesquelles elles sont appliquées. Elles constituent près de 70 % de la protection thermique de l'orbiteur qui en compte environ... 31 000. Sur Columbia, elles furent collées une à une, chaque tuile étant faite sur mesure (il n'y en a pratiquement pas deux semblables) avec un profil et une épaisseur correspondant à son emplacement. En moyenne, leur épaisseur varie de 2,5 à 12 cm et leur côté mesure 15 cm environ.

A l'issue de STS-1, plus d'un millier de tuiles durent être changées ou renforcées : elles avaient été arrachées ou endommagées lors de l'ascension, au moment de l'atterrissage (projection de sable) ou lors des manipulations ultérieures (rayures d'ongles !)

• *le revêtement RCC (Reinforced Carbon-Carbon)* destiné aux endroits de la structure dont la température excède 1 260°C (nez de l'orbiteur et bord d'attaque des ailes).

Par la suite (c'est-à-dire pour les orbiteurs ultérieurs), il est vraisemblable qu'une protection thermique moins fragile et moins délicate à appliquer sera utilisée. Pour mettre au point ces matériaux hautement réfractaires, l'industrie américaine a dû innover : c'est ainsi, par exemple, que le revêtement RCC n'existait pas en... 1972 lorsque fut décidée la construction de la Navette spatiale.

Propulsion.

Le véhicule orbital est pourvu de *trois moteurs principaux* (SSME, *Space Shuttle Main Engine*) qui sont mis en fonctionnement au moment du décollage et pendant la phase ascensionnelle *uniquement*. Ils sont du type cryotechnique (ils consomment de l'hydrogène et de l'oxygène liquides, stockés dans le gros réservoir extérieur qui en renferme environ 721 t!...) Consommant près d'une demi-tonne de liquide par seconde (six fois plus d'oxygène que d'hydrogène), chaque SSME développe une poussée qui peut être modulée entre 65 % et 109 % de la valeur nominale (environ 1,6 million de newtons au sol et 2,1 dans le vide), ce qui permet — entre autres — de limiter l'accélération à 3 g (contre 5 à 6 g avec Apollo).

Ce sont les plus puissants moteurs de ce type jamais construits. C'est la première fois que des moteurs cryotechniques fonctionnent au niveau du sol (jusqu'à présent, ils étaient allumés au-delà de l'atmosphère ; voir Saturn 5, Ariane,...). Ils fonctionnent à très haute pression (200 à 210 bars dans la chambre de combustion contre une trentaine dans celle du troisième étage d'Ariane).

Jusqu'à ce jour, les moteurs de fusée ne servaient que quelques minutes et (à de rares exceptions près) qu'une seule fois : *ils n'étaient jamais rallumés*. Ceux de l'orbiteur sont conçus pour servir théoriquement 55 fois, soit une durée cumulée de fonctionnement de 7 heures et demie avec de simples révisions. Aussi leur mise au point a-t-elle été difficile (pannes, incendies, explosions,...) et est-elle une des causes du retard enregistré par le programme Navette.

Pourtant, en dépit de ses performances, l'ensemble orbiteur/réservoir extérieur est incapable de décoller... Pour l'aider dans la partie initiale de son vol, on lui adjoint deux fusées d'appoint, à poudre, qui seront larguées environ 2 mn après le décollage.

Environ 9 mn après le décollage, le réservoir extérieur est vide : il est alors décroché. Mais la vitesse de satellisation n'est pas atteinte ; pour y parvenir, l'orbiteur dispose de *deux moteurs secondaires* (OMS, *Orbital Maneuvering System* ; poussée unitaire $\simeq 26,7$ kN). Ultérieurement, ils seront utilisés pour les changements d'orbite, les manœuvres de rendez-vous orbital et pour le retour sur Terre. Ils fonctionnent avec un propergol hypergo-

lique (c'est-à-dire des ergols réagissant spontanément entre eux) en l'occurrence du peroxyde d'azote et du monométhylhydrazine (MMH). Ils sont conçus pour pouvoir fonctionner au cours de chaque mission pendant une durée cumulée de 580 s et imprimer à l'étage orbital transportant une masse maximale un incrément de vitesse de 305 m/s. Ils devraient supporter 1 000 démarrages et cumuler une durée totale de fonctionnement de 15 h réparties sur 10 ans (environ 100 missions).

La *commande d'attitude* de l'orbiteur (ainsi que les manœuvres fines lors des changements d'orbite et des rendez-vous) est assurée par 44 propulseurs orbitaux (RCS, *Reaction Control System*) comprenant 38 petits moteurs principaux (de 3 870 N chacun) et 6 moteurs verniers (111 N chacun) répartis en trois modules (un à l'avant et deux à l'arrière de l'orbiteur).

Cabine de pilotage.

La partie avant de l'orbiteur renferme la *cabine de pilotage* qui s'ouvre sur l'extérieur par 8 fenêtres en verre spécial. Elle est pressurisée (on y évolue sans scaphandre et l'air respiré est semblable à celui de l'atmosphère terrestre) et peut abriter jusqu'à 7 personnes (un équipage de 4 astronautes : 1 commandant de bord, 1 pilote et 2 spécialistes de la mission et de 1 à 3 spécialistes de la charge utile, pas nécessairement astronautes professionnels) et même 10 personnes (en cas de sauvetage). L'espace vital total est de 71 m³. La cabine comprend trois niveaux :

- *le niveau supérieur* qui comprend le poste de pilotage conçu pour 4 personnes dont 2 postes tournés vers l'avant pour le pilote et le copilote.
- *le niveau intermédiaire* qui constitue la zone de vie et de détente (couchettes, cuisine, sanitaires, douche, sièges des passagers,...). C'est ici que débouche le sas donnant accès au compartiment charge utile.
- *le niveau inférieur* où sont installés les systèmes permettant la création et le maintien de l'atmosphère de la cabine (température, humidité, élimination des odeurs,...).

C'est dans cette cabine que sont rassemblés tous les éléments nécessaires au pilotage de la Navette et au contrôle de ses divers systèmes de bord.

A l'exception des opérations de rendez-vous avec un satellite déjà sur orbite, *le vol de l'orbiteur peut se dérouler de façon entièrement automatique* suivant un plan de vol préétabli : cinq ordinateurs de grande puissance (dont un de secours) contribuent à cette prouesse. Néanmoins l'équipage peut, à tout moment, reprendre les commandes pour un pilotage manuel. Le rôle

fondamental joué par les ordinateurs à bord de l'orbiteur a fait dire à certains que la réussite du programme Shuttle était avant tout celui de l'informatique.

L'énergie électrique de bord est fournie par trois piles à combustibles. Elles délivrent du courant continu sous une tension de 27,5 à 32 V et peuvent débiter une puissance minimale de 2 kW, une puissance constante de 7 kW et pendant 15 minutes, toutes les 3 heures, une puissance de crête de 12 kW.

La soute.

Egalement appelée *compartiment charge utile*, la soute occupe la partie médiane du fuselage de l'orbiteur (longueur $\simeq$ 18,3 m ; diamètre $\simeq$ 4,6 m ; volume $\simeq$ 340 m³ ; on y logerait un autocar de 50 places). Elle ouvre sur le vide par deux grandes portes. Elle peut recevoir de volumineuses charges utiles (au maximum 29,5 t au décollage). Elle comprend un (et plus tard, peut-être, un second) *bras de manipulation*, long de 15,2 m, pour l'extraction ou la récupération des charges utiles. Des caméras et des projecteurs en facilitent l'utilisation.

A une de ses extrémités peut être installé le MMU (*Manned Maneuvering Unit*), engin conçu pour les activités à l'extérieur de l'orbiteur, autrement dit la sortie et le transport individuel dans l'espace. Il convient d'y associer le système de survie, le EMU (*Extravehicular Mobility Unit*). Les occasions de l'utiliser seront nombreuses : inspection de l'orbiteur, contrôle et réparation des satellites sur orbite, assemblage de grandes structures, sauvetage (pour rejoindre un orbiteur de secours,...), extraction ou récupération de grands satellites,...

Cinq orbiteurs opérationnels.

C'est en 1976 que le premier orbiteur (OV 101), *Enterprise*, a vu le jour. Il n'appartient pas à la flotte opérationnelle. Les vols actuels se font avec le second exemplaire (OV 102), *Columbia* et le troisième exemplaire : *Challenger* (OV 099). Deux autres orbiteurs sont attendus : *Discovery* (OV 103 ; premier vol en juin 1984) et *Atlantis* (OV 104 ; premier vol à la fin de 1985). La fabrication d'un cinquième orbiteur opérationnel, bien qu'envisagée, n'a pas encore été décidée. Chacun de ses orbiteurs devrait supporter une centaine de vols.

Les noms de baptême des quatre premiers orbiteurs opérationnels ont été choisis parmi ceux donnés jadis à des navires célèbres. Par exemple, le nom de *Columbia* fut porté par une frégate lancée en 1836, un des premiers vaisseaux de la marine américaine ayant réussi à faire le tour du monde. C'était également le nom du module de commande d'Apollo-11 (1969). *Challenger*,

également vaisseau de la Navy, fit de 1872 à 1876 une exploration prolongée des océans Atlantique et Pacifique. Lors du programme Apollo, son nom fut donné au module lunaire de Apollo-17.

Pour le *lancement* des orbiteurs, plus de 150 sites ont été considérés, 80 étudiés en détail et deux retenus (en avril 1972) : le premier en Floride, à *Cap Canaveral* (pour le lancement vers les orbites peu inclinées sur l'équateur ; $i < 57^\circ$; le lancement ayant lieu dans le secteur (NE/SE), le second en Californie, à la base de l'US Air Force de *Vandenberg*, à 230 km à l'ouest de Los Angeles (pour le lancement vers des orbites très inclinées sur l'équateur ; $56^\circ < i < 104^\circ$, essentiellement des orbites polaires ou héliosynchrones, les lancements se faisant dans le secteur SE/SO).
