

Conception de la mission Cassini



Juillet 1997

Rédaction : Jebediah Kerman, Méduse Spatiale (Merlin)

Bureau de conception *Historique*

KONFIDENTIEL

Conception de la mission Cassini

Par Jebediah Kerman et Méduse Spatiale

Kerbal Rocket Science – Valentina Space Center

Bureau Historique

Le présent document est propriété intégrale de Kerbal Rocket Science. Sa diffusion, totale ou partielle, même dans le but de le parodier, et même dans le cadre privé, est absolument interdite et fera l'objet de poursuites judiciaires.

En vertu de l'accord signé le 17 octobre 1997 avec l'Agence spatiale Américaine, et dans le but de faciliter la collaboration entre les équipes, ce document, ainsi que l'ensemble de la documentation relative à Cassini, est rendu accessible.

K.R.A.K.E.N., président de KRS.
Le 17 octobre 1997.



Table des matières

| | |
|--|----|
| Préface..... | 3 |
| Introduction – Objectifs..... | 4 |
| I – Saturne, ses lunes, le voyage... Architecture de la mission..... | 5 |
| A. Une planète unique et fascinante | 5 |
| B. Un système riche et diversifié..... | 5 |
| C. L'accès au système Saturnien..... | 6 |
| II – L'orbiteur et de ses composants principaux | 7 |
| A. Les systèmes vitaux | 7 |
| A.1/ L'alimentation électrique..... | 7 |
| A.2/ La propulsion..... | 8 |
| A.3/ Le contrôle de l'attitude | 9 |
| A.4/ Les télécommunications..... | 10 |
| B. Les instruments scientifiques | 10 |
| C. Comparatif final et vues détaillées | 11 |
| III – L'atterrisseur embarqué pour toucher Titan | 12 |
| A. Conception générale et systèmes vitaux..... | 12 |
| A.1/ L'alimentation électrique..... | 13 |
| A.2/ Les protections..... | 13 |
| B. Les instruments scientifiques | 14 |
| C. Comparatif des atterrisseurs | 15 |
| IV – Un lanceur à la Hauteur..... | 16 |
| A. Cassini et le lanceur Titan IVB Centaur. | 16 |
| A.1/ L'étage Centaur T..... | 16 |
| A.2/ Le deuxième étage..... | 17 |
| A.3/ Le premier étage..... | 17 |
| A.4/ Les propulseurs d'appoint..... | 17 |
| B. Cassini et son lanceur..... | 18 |
| B.1/ L'étage supérieur..... | 18 |
| B.2/ Le deuxième étage du lanceur | 18 |
| B.3/ Le premier étage..... | 18 |
| C. Comparatif cote-à-cote | 19 |
| C.1/ L'étage supérieur | 19 |
| C.2/ Le deuxième étage..... | 20 |
| C.3/ Le premier étage | 20 |
| V – Plan de vol retenu, trajectoires prévues..... | 22 |
| A. Le décollage | 22 |
| B. Le voyage interplanétaire..... | 22 |

- C. Arrivée dans le système Saturnien23
- D. Evolution dans le système Saturnien 24
- E. Fin de mission.....24

Préface

La sonde Cassini, prévue pour exécuter la mission portant le même nom, permettra à KRS de démontrer ses capacités à mener à bien une mission spatiale d'envergure. En l'occurrence, il s'agit ici d'explorer Saturne et ses Lunes. Cela permettra également d'accroître considérablement nos connaissances relatives à cette partie du système solaire. Pour cela, KRS a pris la décision de baser la mission sur la mission Cassini-Huygens, développée par la NASA, qui devra remplir le même but. Un vrai travail de recherche a été mené par les équipes afin de reproduire au mieux la sonde des humains ainsi que son lanceur, avec les technologies dont elles disposent.

Une nouvelle fois depuis le succès de Kerbolo I.I, et depuis le succès de Kioneer II développée en coopération avec la NAKA, le travail des équipes de KRS est exemplaire en tous points et a permis la mise au point d'une sonde performante et conforme aux attentes du cahier des charges fixé, qui permettra à coup sûr de remplir à la perfection les attendus relatifs à la mission. Nous saluons ainsi particulièrement les employés au service d'information qui ont su nous procurer les documentations nécessaires à la conception. La planète Saturne et ses environs constituent une source inestimable de connaissances scientifiques qui nous sera rendue accessible par le succès de la mission.

A quelques mois du lancement prévu pour la sonde humaine et pour Cassini (une semaine après normalement), et alors que s'achève l'assemblage de l'appareil, ce document – dont l'accès n'est permis qu'aux seules équipes de KRS et dont la divulgation est formellement interdite conformément à la deuxième de couverture – s'ajoute à la riche documentation technique disponible et traitera du contexte et des aspects généraux de la conception de la mission, mis en parallèle avec les équivalents humains dont a été tirée l'inspiration.

Jebediah Kerman

Introduction – Objectifs

L'objectif de la mission Cassini sera l'étude de Saturne et de ses lunes. Il s'agit là d'une première pour Kerbal Rocket Science, tant la mission est ambitieuse. La mission suivra au maximum les objectifs de la version humaine, malgré des différences notables, particulièrement concernant les expériences scientifiques réalisées et les données analysées.

Ci-dessous, les objectifs principaux de Cassini. Des détails seront apportés dans la suite du document, concernant les attentes précises du cahier des charges, ainsi que les solutions retenues pour répondre à ces besoins.

- La charge utile se placera en orbite de Saturne afin de mener à bien sa mission et sera, après Cassini-Huygens, le deuxième objet artificiel à orbiter ce corps.
- La charge utile scientifique devra permettre une étude approfondie de Saturne et de ses lunes, en particulier la plus importante de celles-ci : Titan.
- Des photographies haute résolution de la planète et ses satellites seront prises et transmises à la Terre.
- Des données scientifiques seront collectées concernant :
 - Saturne, son influence dans le système, la composition de son atmosphère.
 - L'état de la surface - au moins partiellement - des principales lunes de Saturne, notamment Japet, Encelade.
 - Titan, en particulier son atmosphère, sa surface, sa composition, sa masse...
- Pour cela, il est primordial que la sonde puisse évoluer avec aisance dans le système Saturnien à travers plusieurs manœuvres pour se placer sur différentes trajectoires propices aux études demandées.
- En raison du plan de vol retenu, qui sera détaillé par la suite, la sonde pourra être amenée à collecter des données dites « supplémentaires » concernant des astres survolés pour profiter de leur assistance gravitationnelle. Cela constituera un élément de plus attestant de la supériorité de KRS dans le domaine de l'exploration spatiale, grâce à des appareils fiables et polyvalents.
- Enfin, la sonde *ainsi que tous les éléments embarqués* doivent être assemblés dans le plus grand respect des normes sanitaires, afin de ne pas nuire aux mondes explorés. La sonde doit pouvoir être détruite de manière sûre une fois sa mission terminée.

- Conformément aux exigences du gouvernement Kerbal relatives au secret scientifique, l'existence de la mission **ne sera révélée au grand public qu'une fois celle-ci terminée**. Avant cela, le tir effectué sera nommé « KasSat I I » et les seules informations communiquées traiteront d'un tir de satellite militaire secret en orbite géosynchrone. En cas d'échec – totalement improbable en raison de l'expérience de KRS – de la mission, celle-ci ne sera révélée qu'à la déclassification de l'ensemble de la documentation la concernant, soit 37 ans après son lancement.

A. Une planète unique et fascinante

Sixième planète du système solaire, Saturne est connue des humains et des Kerbals depuis la préhistoire. Dès l'antiquité, elle attirait la curiosité des scientifiques, aussi Ptolémée entreprit de l'observer, à l'œil nu, pour comprendre son mouvement. La planète tire son nom de la mythologie, à travers Saturne, l'équivalent Romain de Cronos, Titan fils d'Ouranos (le ciel) et de Gaïa (la Terre) et père des dieux Jupiter, Neptune et Pluton.

Les anneaux caractéristiques de la planète furent observés pour la première fois par Galilée à travers sa lunette astronomique en 1610, mais celle-ci était de diamètre trop faible pour qu'il puisse discerner les détails, et il n'a pas pu comprendre ce qu'il observait. C'est Christian Huygens qui, en 1659, observa les anneaux et découvrit leur nature. Huygens découvrit aussi Titan, la principale lune de Saturne et la première connue à cette époque.

Depuis la découverte de ces anneaux, ces derniers n'ont pas cessé de susciter la curiosité des astronomes. L'amélioration des instruments optiques a permis leur observation plus en détails, en particulier par l'humain Giovanni Domenico Cassini, qui fit la découverte en 1675 de ce que l'on appelle la division Cassini, l'espace séparant les anneaux en deux groupes.



Figure 1 - Photographie de Saturne depuis la Terre

Saturne est, au même titre que Jupiter Uranus et Neptune une géante gazeuse. Malgré la distance qui la sépare de la Terre, elle reste tout de même très lumineuse dans le ciel nocturne. De plus, étant la deuxième plus grande planète du système solaire, elle est très facile à observer. Ces éléments, en plus de sa beauté, en font une cible de choix pour tous les astronomes amateurs.

Jusqu'en 1979, avec le survol de la planète par la sonde Pioneer 11, les seules images disponibles de Saturne étaient prises sur Terre. Seulement les images renvoyées par la sonde étaient de mauvaise qualité et ne montraient que peu de détails. C'est donc en 1980 avec le survol par la sonde Voyager 1 que nous avons eu les premières images en haute définition de la planète. Dans les années avenir, avec la mise en orbite de Cassini, la planète pourra être observée bien plus en détails, grâce aux caméras haute résolution et aux appareils embarqués.

B. Un système riche et diversifié

Le système Saturnien est remarquable du fait de sa diversité et sa richesse, en particulier à travers les nombreuses lunes orbitant la géante gazeuse. A l'heure actuelle, nous avons la connaissance de 18 lunes orbitant Saturne. Nous espérons naturellement en découvrir des nouvelles à travers les observations de la sonde Cassini.

Parmi celles-ci, une a été découverte par Christian Huygens, et 4 par G. Cassini au XVIIème siècle.

- Titan

Première lune recensée de Saturne, découverte en 1655 par Christian Huygens, c'est le satellite naturel le plus important de la planète. Sa masse est estimée à environ $1.3452 \cdot 10^{23}$ kilogrammes, soit 0.4 fois la masse de Mercure, pour un diamètre de 5151 kilomètres soit 6% que plus que celui de Mercure. On sait depuis 1940 grâce aux travaux de Kuiper (basés sur des observations antérieures en partie) que Titan

possède une atmosphère *dense*. C'est une caractéristique qui n'est observée chez aucune autre lune du Système solaire. Sa densité et son opacité empêchèrent les sondes Pioneer 11 et Voyager de photographier son sol, les engins ne disposant pas des appareils nécessaires. On sait néanmoins grâce au survol de Pioneer que l'atmosphère de Titan est probablement très froide.

Une partie de ces interrogations concernant la surface et l'atmosphère de Titan sera levée grâce à l'emport d'un atterrisseur destiné entièrement à cette lune. Une partie lui sera consacrée, voir : Partie III, page 12

- Encelade

Autre satellite important, Encelade est néanmoins de petite taille, environ 7 fois plus petite que notre Lune. Ce sont les caractéristiques de sa surface qui en font une destination primordiale pour Cassini. En effet les photographies prises par Voyager 2 lors de son passage en 1981 dans le système saturnien ont révélé qu'à la différence de notre Lune, voire même d'autres satellites de Saturne, Encelade semble avoir montré une activité géologique récente, en témoigne la faible quantité d'impacts à la surface. L'étude par Cassini d'Encelade sera donc une étape majeure dans notre compréhension de cette lune, et nous espérons que cela nous permettra de comprendre les causes d'une activité géologique sur une lune si petite et froide.

- Japet



Figure 2 - Japet par Voyager 2 (1981)

Découverte par G. Cassini, Japet est une lune de taille moyenne. L'astronome l'avait constaté, et les survols par les deux sondes Voyager l'ont confirmé, on observe une nette différence de coloration entre l'hémisphère 'gauche' et l'hémisphère 'droit' de Japet. La surface semble aussi très accidentée, à la différence de la surface très lisse et claire d'Encelade. Sur cette image de Japet prise par la sonde Voyager 2, on observe clairement la séparation entre les deux couleurs, et on remarque l'important contraste entre celles-ci. On remarque également l'abondance de cratères.

Cette différence de couleur entre les deux hémisphères amène des questions, notamment concernant la composition des sols, et les causes de cette séparation. Nous espérons que son survol par Cassini apportera un maximum de réponses à ces questions.

C. L'accès au système Saturnien

L'accès à Saturne depuis la Terre est compliqué en raison des coûts d'un « simple » transfert de Hohmann à destination de Saturne. En effet, la vitesse que la charge utile doit atteindre est trop élevée par rapport aux capacités du lanceur. Pour gagner cette vitesse manquante, la sonde aura recours à une Assistance Gravitationnelle. Elle partira en direction de Jupiter, et rentrera dans la sphère d'influence de celle-ci. Là, elle sera accélérée par la planète. Cette accélération sera d'autant plus forte que la planète est massive.

Après le survol, l'objet s'éloigne progressivement de la planète. Ainsi à l'issue de ce passage, Cassini ressortira rapidement de la sphère d'influence de Jupiter après avoir été ralentie progressivement en s'éloignant. A ce point de sortie sa vitesse a la même valeur dans le référentiel de Jupiter qu'à son entrée. Cependant, la trajectoire a bien été déviée, et la vitesse a bien été modifiée dans le référentiel héliocentrique. Cela permettra donc à Cassini de gagner la vitesse nécessaire pour atteindre Saturne. La trajectoire sera détaillée plus profondément dans la partie V, page 22.

II – L'orbiteur et de ses composants principaux

A. Les systèmes vitaux

L'essentiel de la masse de la sonde est représenté par ces systèmes qui lui permettent de fonctionner, les instruments scientifiques représentant une part bien moindre de celle-ci. Ils permettent l'alimentation, la propulsion, le contrôle, le maintien des communications...

A.1/ L'alimentation électrique

Comme chez son homologue humaine, l'alimentation de Cassini repose sur trois générateurs thermoélectriques à radio-isotopes, des générateurs électriques nucléaires embarqués. Le choix de ceux-ci est justifié en grande partie par le manque d'exposition solaire, d'abord à cause de la distance séparant Saturne du Soleil, mais aussi lorsque la sonde pourra passer du temps dans l'ombre d'un astre, ce qui neutraliserait les panneaux.

On peut calculer l'éclairement solaire dans les environs de Saturne :

Sur Terre, l'éclairement moyen est $F_T = 1360 \text{ W/m}^2$.

En utilisant $F = \frac{L_{\odot}}{4\pi D^2}$, où L_{\odot} est la puissance moyenne rayonnée par le soleil, et D la distance Soleil-Planète, on trouve :

$$L_{\odot} = F \cdot 4\pi D^2$$

Soit :

$$L_{\odot} = F_T \cdot 4\pi \cdot D_T^2 = 1360 \cdot 4\pi \cdot (1,4089 \cdot 10^{10*})^2 = 3,39 \cdot 10^{24} \text{ W}$$

Ainsi, dans le voisinage de Saturne, c'est-à-dire à une distance moyenne de $1,34 \cdot 10^{11} \text{ m}$ du soleil*, la puissance reçue est de :

$$F_{sat} = \frac{L_{\odot}}{4\pi D_{sat}^2} = \frac{3,39 \cdot 10^{24}}{4\pi (1,34 \cdot 10^{11})^2} = 15,02 \text{ W/m}^2$$

**Distances données dans le système métrique Kerbal*

Proche de Saturne, on aurait donc 1,1% de l'éclairement solaire sur Terre. Il serait alors extrêmement compliqué de baser l'alimentation sur des panneaux solaires, tant la puissance qu'ils pourront délivrer sera faible. Les générateurs thermoélectriques à radioisotopes sont donc la meilleure solution pour la sonde Cassini, car ils garantissent un fonctionnement constant qui ne dépend pas de la distance du Soleil.

Les trois générateurs fournissent chacun 0,8 ⚡/s, soit un total de 2,4 ⚡/s. Cela permet de répondre à la demande de l'ordinateur de bord, et d'assurer le fonctionnement correct des autres équipements.

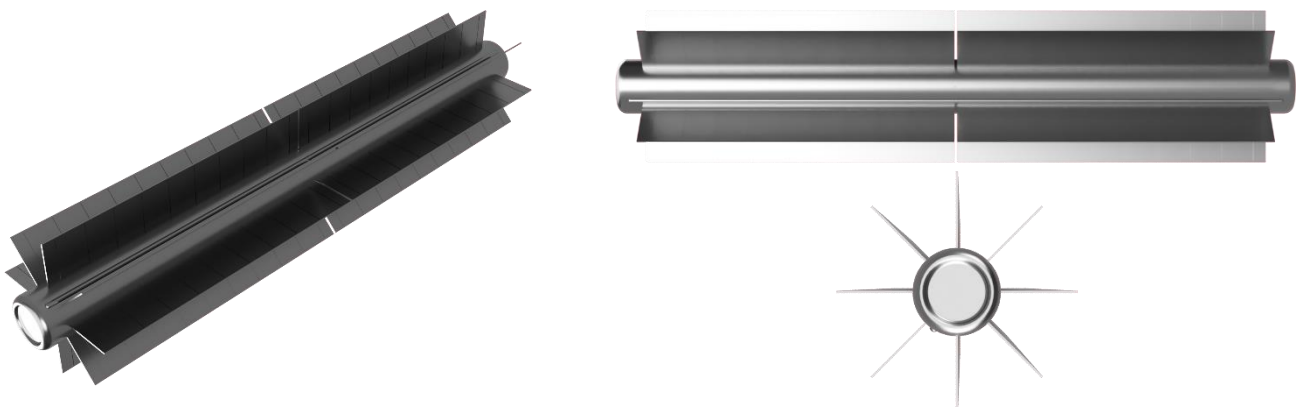


Figure 3 - Générateur thermoélectrique à radioisotopes

A.2/ La propulsion

La propulsion de notre sonde sera assurée par un système chimique comme c'est aussi le cas chez Cassini. Il comporte deux petits moteurs. Dans le cas d'une sonde non habitée, la durée de vol n'est pas un problème et l'absence de pesanteur facilite bien les choses. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser des moteurs développant une grande poussée. L'efficacité desdits moteurs sera privilégiée.

Les équipes de la NASA ont choisi l'utilisation de deux moteurs R-4D, développés par Macquardt. Ce sont ces moteurs qui étaient utilisés lors du programme Apollo pour assurer le contrôle de l'attitude du module lunaire ainsi que du module de service et de commande, ils étaient alors agencés par grappes de 4. Ils développent une poussée de 490 N chacun. Leur utilisation est justifiée par leur grande fiabilité, ainsi que leur simplicité. Ce sont en effet des moteurs hypergoliques, c'est-à-dire que les réactifs s'enflamment spontanément dès leur mise en contact. Cela garantit un fonctionnement sur le long terme avec de nombreuses mises à feu (qualité indispensable pour équiper une sonde spatiale de ce type).

Nous utiliserons deux moteurs 'Ant', brûlant du Liquid Fuel et de l'Oxidizer.

Voici un tableau comparatif des technologies utilisées par KRS et la NASA pour le système de propulsion des sondes.

| | Cassini | Kassini |
|--|---|-------------------------------------|
| Moteur | Macquardt R-D4 | LV-1 'Ant' |
| Carburants | Peroxyde d'azote / Méthylhydrazine | Liquid fuel / Oxidizer |
| Poussée unitaire | (2x) 490 N (vide) | (2x) 2 000 N (vide) |
| Impulsion spécifique | 312 s | 315 s |
| Rapport Poids/poussée total de l'orbiteur + atterrisseur | 0,017 | 0,05 |
| Utilisation | Un moteur principal Un moteur de secours | Deux moteurs utilisés simultanément |

Comparatif 1 - Le système de propulsion

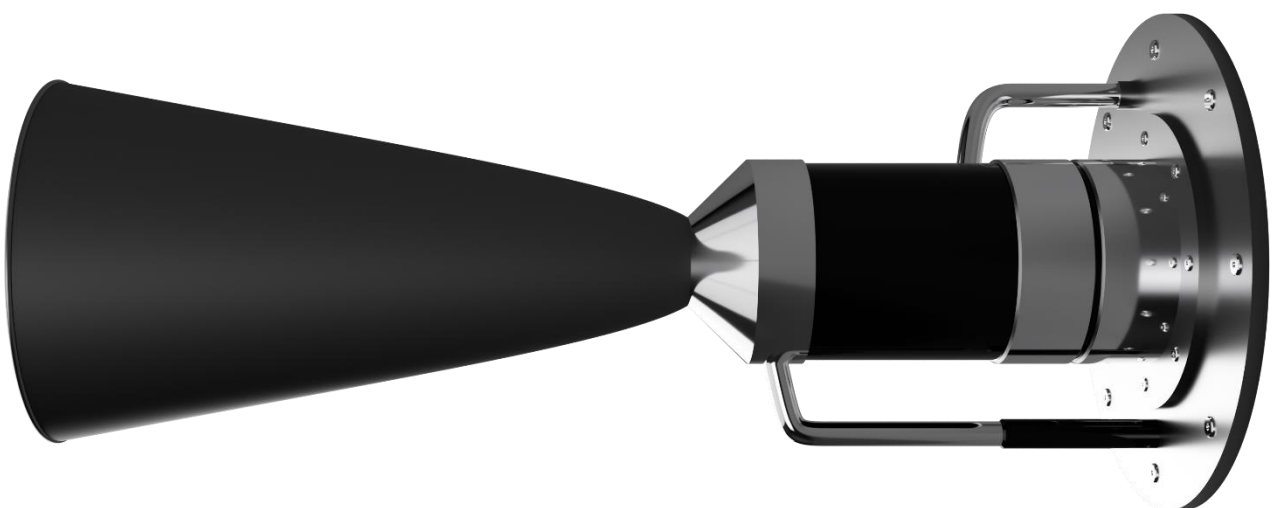


Figure 4 - Le LV-1 'Ant' qui équipe Kassini

Au décollage, avec les atterrisseurs, les deux sondes ont un Delta V d'environ 2 km/s, avec 2157 m/s pour Kassini.

A.3/ Le contrôle de l'attitude

Afin de répondre aux besoins de la mission, il est primordial d'avoir un contrôle total de l'orientation de Cassini. Dans leur fonctionnement certains appareils, et évidemment les caméras, nécessitent d'être orientés directement vers les objets célestes à observer. De plus il est important de pouvoir orienter parfaitement la sonde lors de la réalisation de manœuvres de précision, et lors des transmissions de données.

Le contrôle d'attitude est alors assuré par quatre roues à réaction, ainsi que 4 blocs de propulseurs RCS. Les roues à réaction sont utilisées en priorité, car elles ne consomment pas de carburant, mais les propulseurs peuvent être utilisés dans des cas particuliers, comme des défaillances du système des roues à réaction. Dans une mission de longue durée, un système de contrôle d'attitude électrique est la seule solution pour garantir un fonctionnement à long terme, ne reposant pas sur une ressource épuisable.

Par sécurité, il est interdit à l'ordinateur de bord de Cassini de faire fonctionner plus de trois roues à la fois, afin de limiter leur usure. Les technologies développées par KRS ont permis la mise au point de systèmes suffisamment fiables pour que les quatre roues à réaction soient utilisées en même temps par Cassini, et ainsi profiter du maximum de l'efficacité des composants.

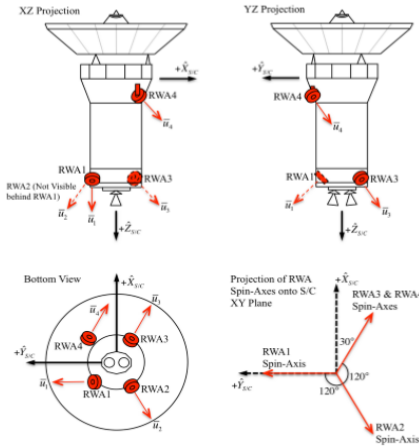


Figure 6 - Le positionnement des roues à réaction sur Cassini

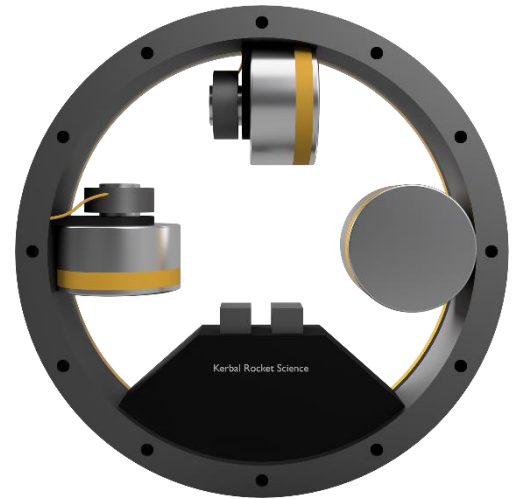


Figure 5 - Une roue à réaction de Cassini

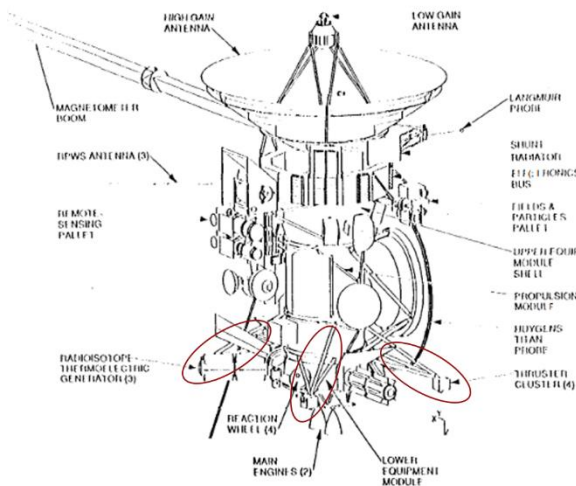


Figure 7 - Disposition des blocs de propulseurs de Cassini

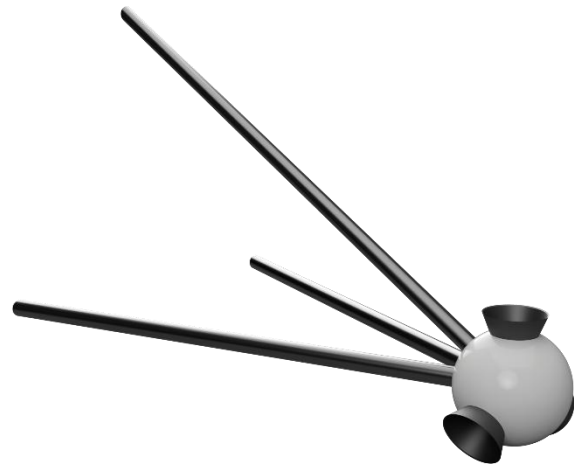


Figure 8 - Un bloc de propulseur de Cassini

| | Cassini | Kassini |
|---------------------------|---|--|
| Système principal | - 3 (+1) roues à réaction - 4 x 4 propulseurs | - 4 roues à réaction - 4 x 3 propulseurs |
| Carburant des propulseurs | Peroxyde d'Azote / Hydrazine | Monopropellant |
| Redondance | - 1 roue (à réaction) de secours - 4 propulseurs | - Pas de redondance - Propulseurs utilisés pour les corrections importantes |

Comparatif 2 - Le contrôle d'attitude

A.4/ Les télécommunications

Les communications entre les sondes et leurs centres de contrôle respectifs reposent dans les deux cas sur l'utilisation d'antennes haut gain. Elles utilisent également des antennes secondaires à faible gain. Les différences entre les trajectoires empruntées par les deux sondes entraînent d'importantes différences dans les contraintes auxquelles seront soumises les antennes. En effet – et comme cela sera détaillé dans la partie V, page 22 – la sonde de la NASA partira en premier lieu en direction de Vénus, où ses composants seront exposés à de fortes contraintes. L'antenne de 4 mètres de diamètre aura alors la tâche de protéger la sonde de celles-ci, utilisée comme pare-soleil. Dans le cas de la mission Cassini, la charge utile sera envoyée directement vers Jupiter. Les contraintes seront alors bien moindres, ce qui permet plus de flexibilité.

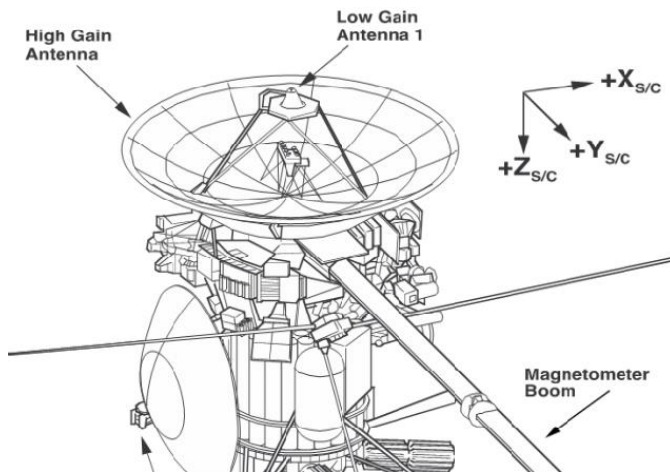


Figure 9 - Les antennes de Cassini

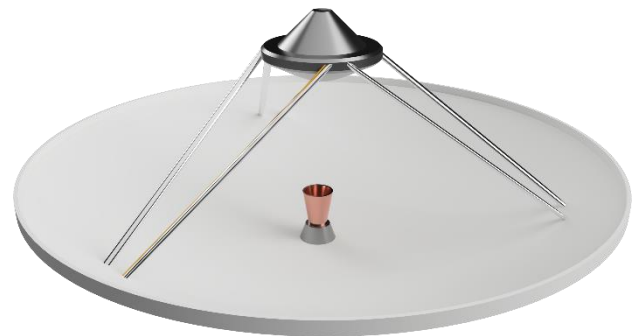


Figure 10 - Antenne grand gain de Cassini

| | Cassini | Kassini |
|-------------------|--|--|
| Système principal | - Antenne grand gain (- 2 antennes faible gain) | - Antenne grand gain (- 3 antennes faible gain) |
| Débit efficace | 36-116 kilobit/s | 11.5 Mit/s |
| Diamètre | 4 mètres | 3 mètres |

B. Les instruments scientifiques

Bien sûr, les sondes embarquent de nombreux instruments scientifiques permettant l'étude des différentes planètes visitées. C'est sur cet aspect qu'elles diffèrent le plus.

Nous dresserons ici la liste de ces équipements.

Sur Cassini, au nombre de douze.

- Deux caméras, une focale courte et une focale très longue (200 et 2000 millimètres), permettant des observations variées et détaillées.
- Un spectrographe fonctionnant en ultraviolet, destiné à l'étude des anneaux de Saturne et des atmosphères des corps rencontrés.
- Deux spectromètres, pour observer les anneaux, atmosphères, surfaces, et étudier leur composition et température.

Ces instruments permettant une observation à distance des corps visés, ils doivent être orientés convenablement durant leur utilisation. Cela sera permis par le système de contrôle d'attitude. La sonde dispose aussi d'instruments utilisés pour mener des observations dans son environnement direct.

- Un magnétomètre, placé à l'extrémité du bras de l'orbiteur.
- Un radar, capable de voir à travers les nuages de Titan pour en étudier la surface.
- Un autre spectromètre
- Un spectromètre de masse pour mieux connaître l'étendue de l'atmosphère de Saturne et Titan notamment.
- Et une expérience radio prévue pour une observation des anneaux et des atmosphères ainsi que des mesures du champ de gravité des corps visités.

Kassini, quant à elle, embarquera :

- Un module de stockage scientifique
- Un module Mystery Goo – Expérience mystérieuse et inconnue mais fort intéressante.
- Un accéléromètre, principalement dédié à la collecte de données de télémétrie
- Un appareil permettant des relevés de pression atmosphérique, pour le *grand final*.
- Le GRAVMAX negative gravioli detector, qui s'est amélioré depuis son échec lors d'une mission précédente, et fournira des données sur la gravité des corps visités.
- Le thermomètre 2HOT.
- Deux scanners de surface : Narrow band et Surface scanner.

C. Comparatif final et vues détaillées

Nous allons maintenant conclure cette partie consacrée aux deux sondes par un dernier comparatif global ainsi que par une série de vues détaillées de Kassini

| | Cassini | Kassini |
|------------|-------------------|-----------|
| Masse | 5 712 kg | 8 162 kg |
| Δv | Environ 2 000 m/s | 2 157 m/s |

Comparatif 3 - Rapide comparatif final

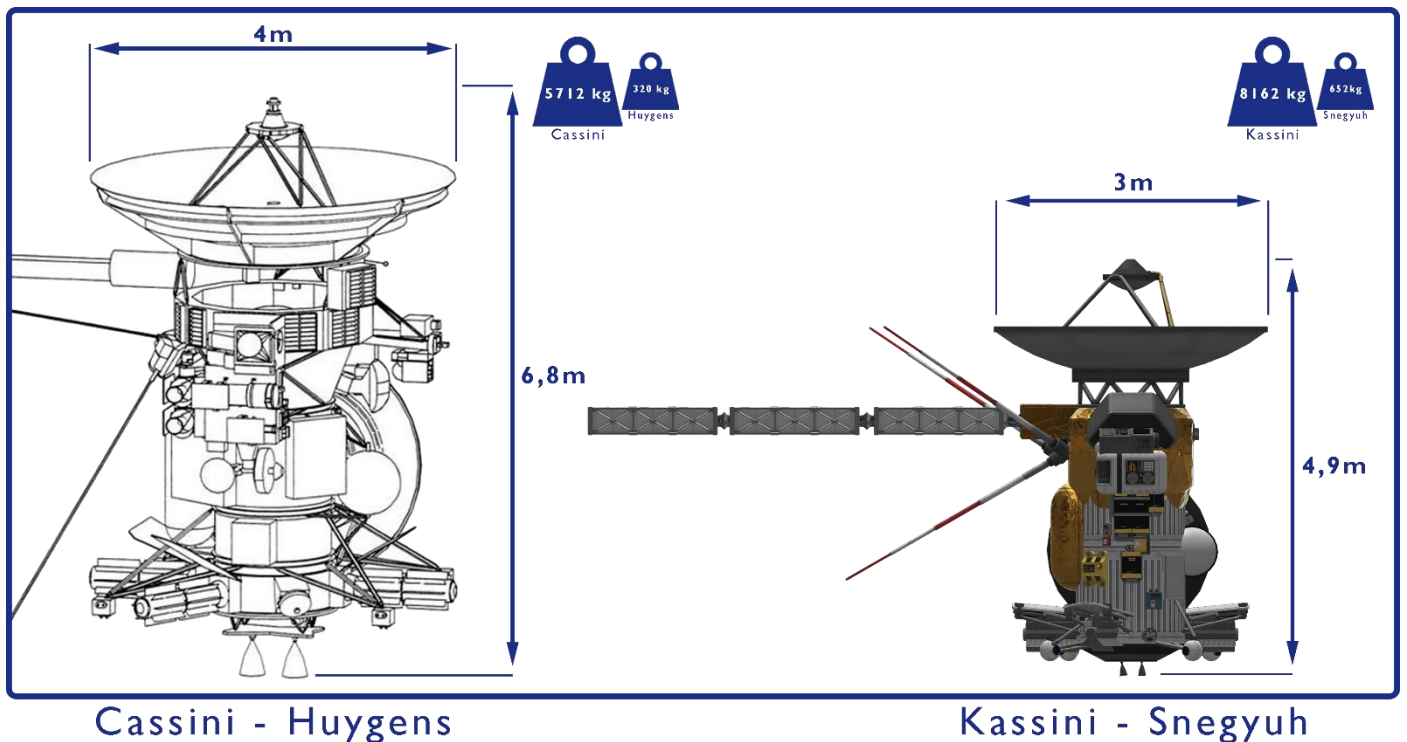


Figure 11 - Comparatif de taille des deux orbiteurs

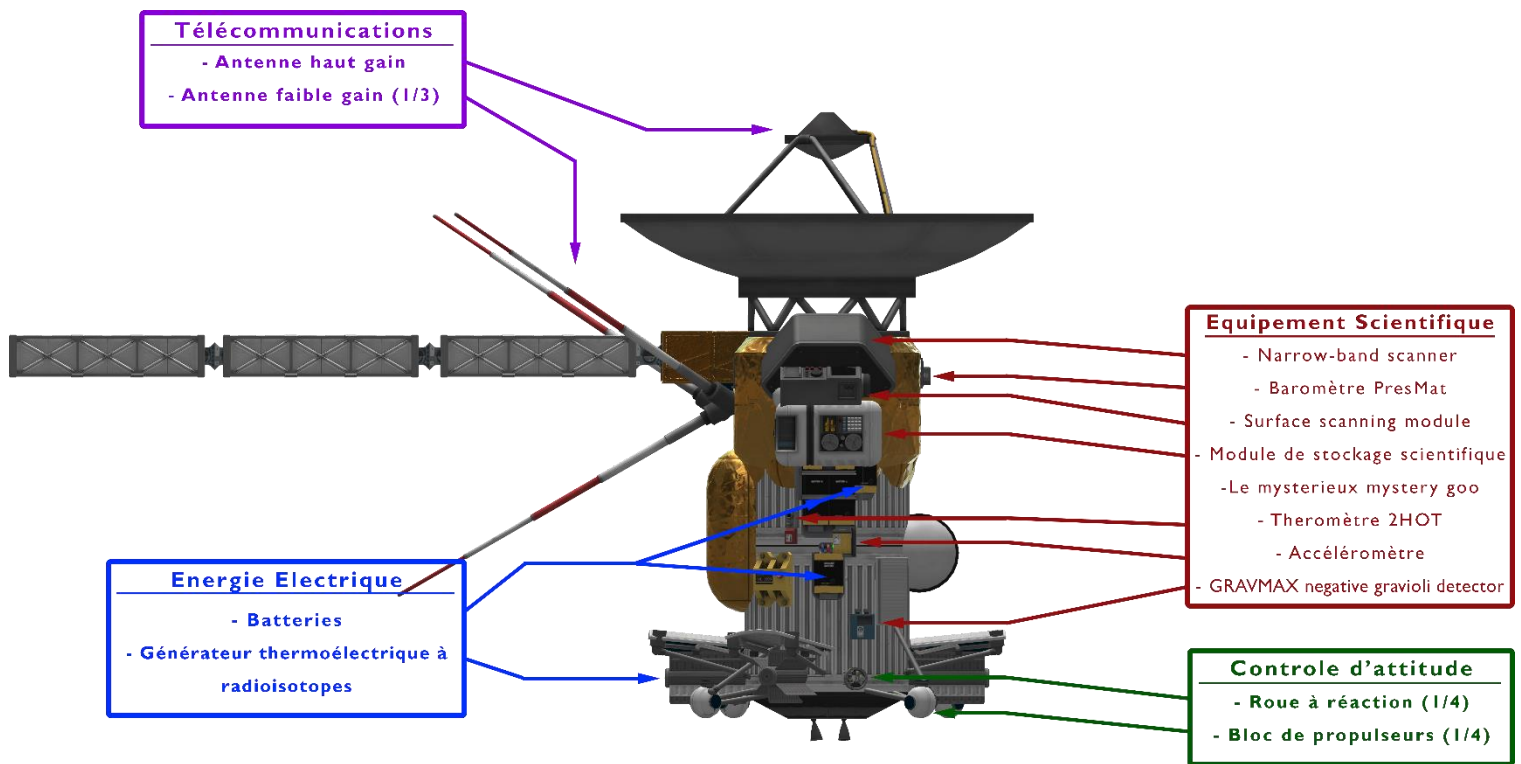


Figure 12 - Les instruments scientifiques de Cassini

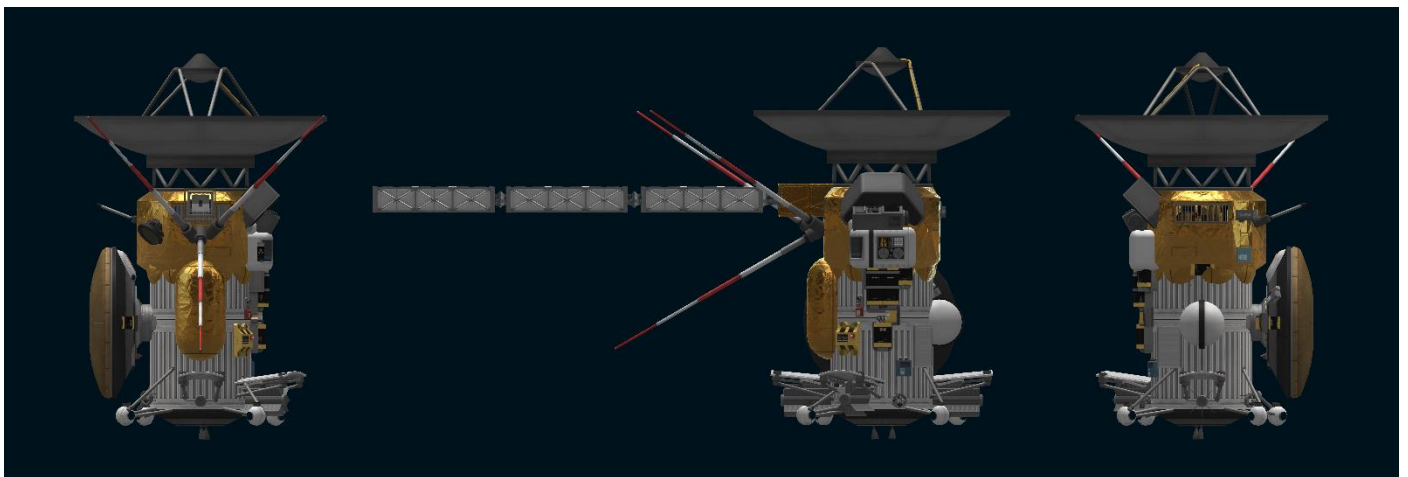


Figure 13 - Différentes vues de Cassini

III – L'atterrisseur embarqué pour toucher Titan

Comme cela a pu être évoqué précédemment, les orbiteurs seront accompagnés de petits atterrisseurs, destinés à atteindre le sol de Titan pour en faire une étude poussée directement sur place. Avec Cassini, le vaisseau Huygens mis au point et contrôlé par l'Agence Spatiale Européenne. Cassini emportera dans son voyage l'atterrisseur Sneguh, nommé par la Dakitess Corporation qui n'a malheureusement pas pu prendre part au projet plus profondément.

A. Conception générale et systèmes vitaux

Les contraintes que devront subir les atterrisseurs seront plus importantes que celles subies par les orbiteurs, tant les milieux qu'ils traverseront sont hostiles et diversifiés. C'est pourquoi leur conception était si ambitieuse, et pourquoi leur succès sera un triomphe pour les équipes qui les ont conçus. Ils ne disposent d'aucun système de propulsion.

A.1/ L'alimentation électrique

Les atterrisseurs ne disposeront d'aucun moyen de production d'énergie électrique, et reposeront donc uniquement sur des batteries. Sans système de propulsion, ils ne peuvent pas faire de correction de trajectoire. C'est pourquoi l'orbiteur les transportant devra se mettre sur une trajectoire de collision avec Titan avant la séparation. Cette manœuvre est dangereuse et potentiellement coûteuse en carburant, elle doit donc être effectuée assez tôt pour permettre à aux orbiteurs respectifs d'éviter la lune. Les batteries doivent alors assumer l'alimentation de l'atterrisseur durant les jours de trajet seul en autonomie. Dans le cas de Sneguyh, il disposera d'un mois d'autonomie à compter de la séparation, afin de fonctionner durant le transit, et sur place. Il pourrait alors fonctionner à la surface durant quelques jours, la séparation étant prévue 21 jours avant l'impact. Huygens quant à lui est pensé pour durer au moins trois minutes, dans l'idéal environ une demi-heure, après le contact au sol.

A.2/ Les protections

Nous n'avons actuellement que peu d'informations concernant l'atmosphère de Titan mais nous la savons dense. Cela rend possible un atterrissage sous parachutes, bien plus sûr et bien moins coûteux qu'une descente propulsée vers la surface. Huygens et son jumeau sont donc chacun équipés de parachutes, toutefois leur nombre et leur séquence d'ouverture est différente chez les deux engins.

Huygens embarque au total trois parachutes qui fonctionneront à tour de rôle. Le premier est le plus petit, et est nommé parachute *pilote*. Il remplira deux fonctions : Il détachera la partie supérieure de la protection thermique de l'atterrisseur, et extraira le parachute principal, bien plus grand. Celui-ci freinera la sonde durant sa descente, puis sera largué lorsque l'atmosphère se fera plus dense. En effet, il risquerait de ralentir trop Huygens, de rendre la chute trop longue et ainsi vider les batteries avant l'atterrissage. Le parachute secondaire est donc plus petit, pour l'amener au sol avec une vitesse d'environ 5 à 6 m/s.

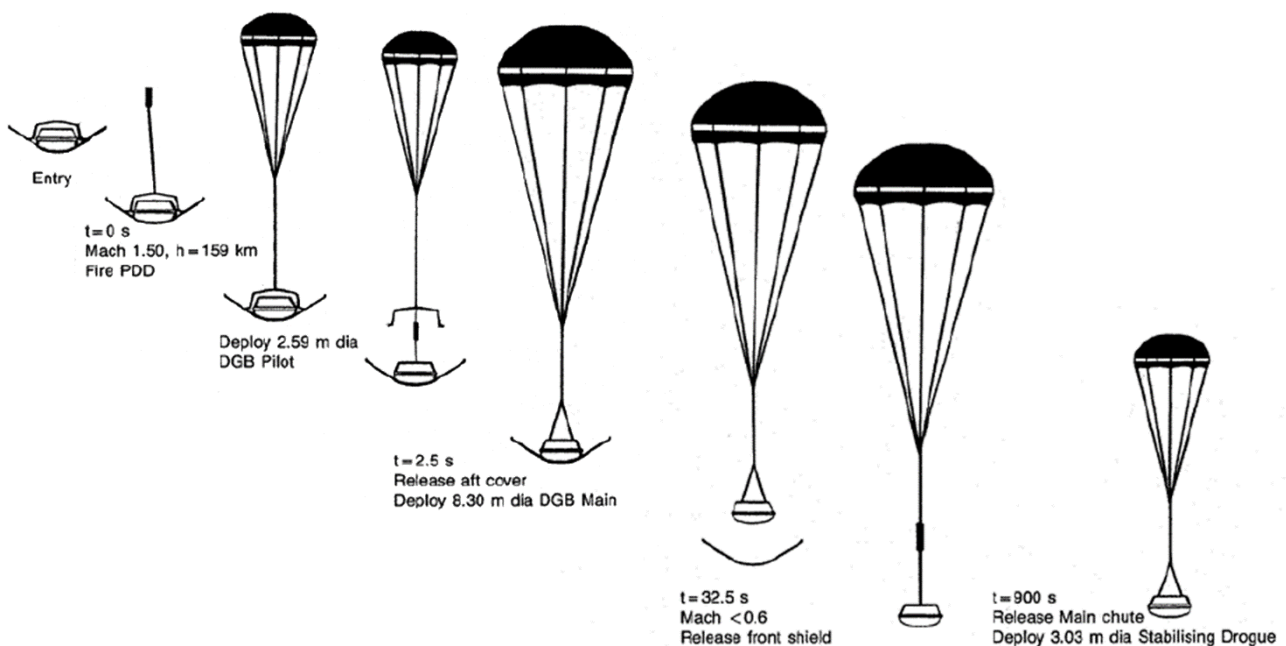


Figure 14 - Séquence d'ouverture des parachutes de Huygens

Dans le cas de Sneguyh, la simplicité primera : Il sera équipé d'un seul parachute polyvalent, qui s'ouvrira sans l'aide d'un parachute pilote. Cela offre un gain d'espace et de masse qui facilite la conception ainsi que les manœuvres exécutées par Kassini.

Pour se protéger lors de la rentrée atmosphérique, Huygens et Snegyuh portent des boucliers thermiques. La NASA a choisi une protection englobant entièrement son atterrisseur, découpée en deux parties. Elles sont conçues dans la région de Bordeaux (en France, chez les humains), et doivent pouvoir résister à des températures extrêmes. C'est la partie basse qui est placée en avant lors de la rentrée pour freiner la chute du vaisseau et encaisser pour lui l'essentiel des contraintes thermiques liées à la rentrée.

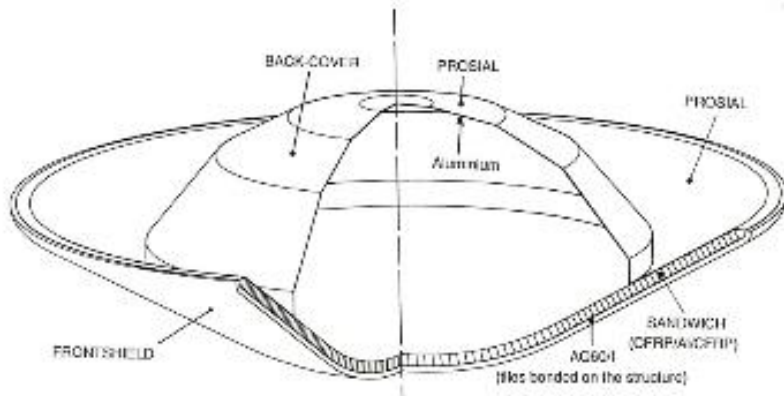


Figure 15 - Le bouclier thermique de Huygens

Ces deux parties sont éjectées l'une après l'autre au cours de la descente vers le sol à mesure que la vitesse chute : D'abord la partie supérieure pour libérer les parachutes, puis la partie basse lorsqu'elle est inutile, pour alléger l'atterrisseur.

Snegyuh a un bouclier inférieur. La partie supérieure de sa structure ne nécessite pas de protections supplémentaires car les matériaux développés par KRS sont suffisamment performants pour résister aux contraintes, plus faibles à cet endroit qu'en dessous de la capsule autonome.

Le bouclier thermique est ablatif, c'est-à-dire qu'il est conçu pour se sublimer lors de la montée en température et ainsi limiter l'échauffement de Snegyuh. Cependant, la densité du bouclier en ablatif est importante et c'est elle qui lui donne sa capacité à résister à des rentrées plus ou moins violentes. Dans le cas de Snegyuh, il a été estimé que nous pouvions abaisser la quantité de matériaux au minimum, c'est-à-dire à 67.5 unités, ou 68 kilogrammes. Cela permet un gain important de légèreté, et donc un gain non négligeable de Δv pour Cassini.

B. Les instruments scientifiques

L'intérêt scientifique d'une expédition automatique sur le sol de Titan est énorme, aussi les deux atterrisseurs sont chargés en équipement scientifique de pointe. Comme dans le cas des orbiteurs, les instruments embarqués diffèrent beaucoup, mais nourrissent le même but commun : Etudier en détail le plus important de satellite de Saturne et comprendre son atmosphère et sa surface.

Du côté de Huygens :

- Huygens Atmospheric Structure Instrument (HASI) – Utilisé pour faire des mesures de tous les paramètres propres à l'atmosphère de Titan (Densité, composition, vents ...)
- Le Doppler Wind Experiment (DWE) – Pour faire des mesures relatives aux vents sur Huygens, et participer aux mesures de vitesses de Huygens.
- Descent Imager Radiometer (DISR)
- Gas Chromatograph Mass Spectrometer (GCMS) – Un spectromètre de masse utilisé pour analyser les gaz dans l'atmosphères de Titan.
- Aerosol Collector and Pyrolyser (ACP)– Piège des microparticules en suspension dans l'atmosphère avec un filtre pour les analyser.
- Surface Science Package (SSP) – Un groupement d'expériences prévues pour la surface de Titan.

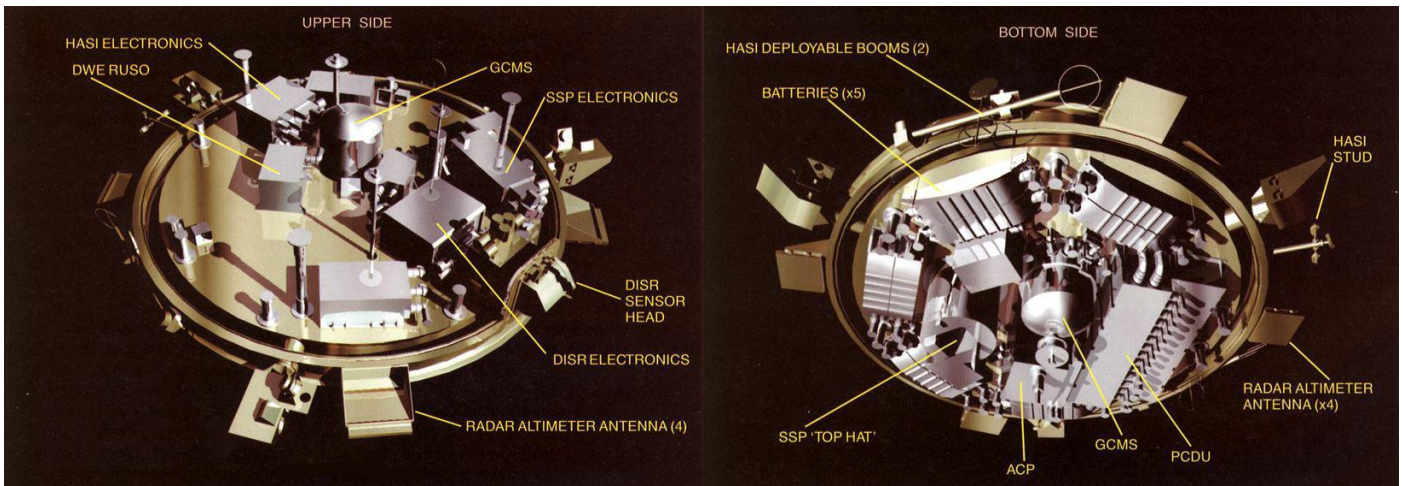


Figure 16 - Position des équipements sur Huygens

Sneguyh embarque :

- Le thermomètre 2HOT
- Un accéléromètre
- Un baromètre PresMat

C. Comparatif des atterrisseurs

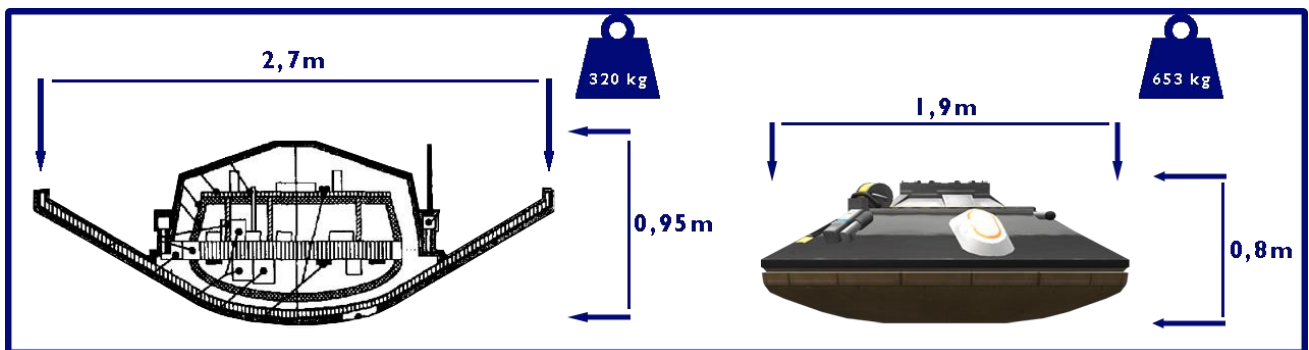


Figure 18 - Comparatif visuels des deux atterrisseurs

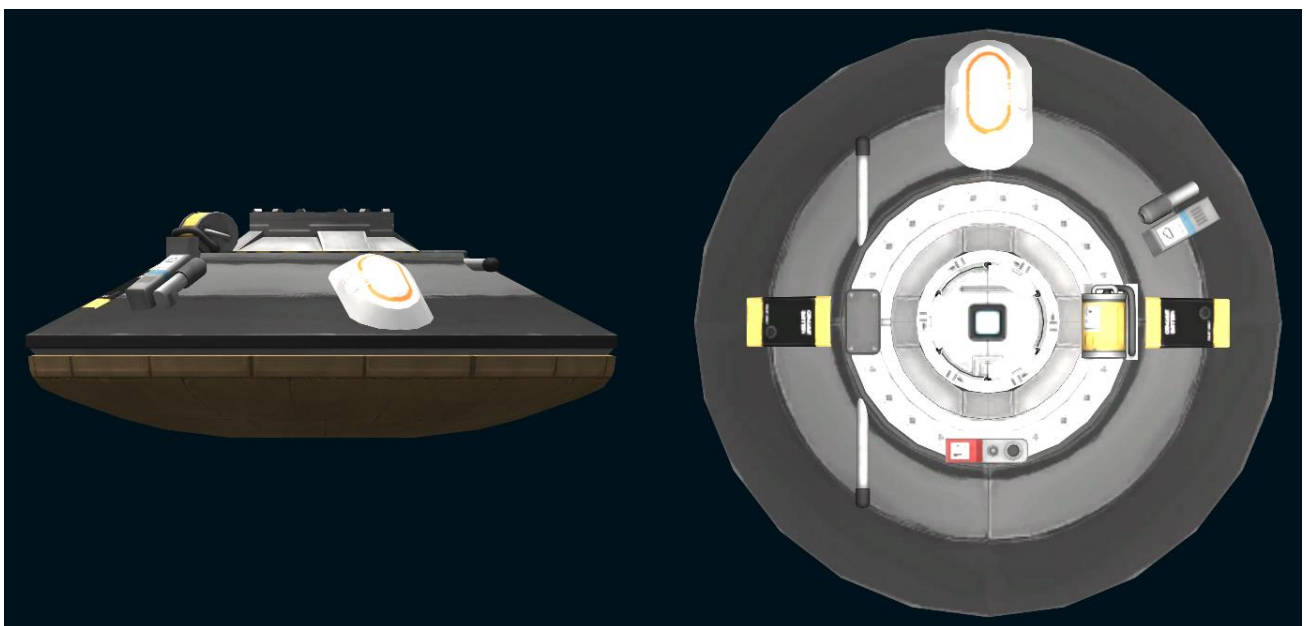


Figure 17 - Différentes vues de Sneguyh

IV – Un lanceur à la Hauteur

Nous nous concentrerons ici sur les lanceurs amenés à propulser les deux sondes dans les premiers instants de leurs missions respectives. Pour plus de simplicité, nous traiterons tour à tour les deux lanceurs avant de faire un comparatif cote à cote.

A. Cassini et le lanceur Titan IVB Centaur.

A.1/ L'étage Centaur T

Avec plus de 120 vols sur différents lanceurs aujourd'hui (1997) pour toutes ses variantes, l'étage supérieur Centaur a traversé l'histoire de l'exploration spatiale et a encore un avenir certain.

En service depuis 1965, cet étage cryogénique qui a propulsé de nombreuses charges utiles est très apprécié pour sa grande fiabilité et son efficacité certaine. Il tire son efficacité de son mode de propulsion performant, et précurseur à l'époque de son développement, mais également de sa construction robuste et légère, qui assure donc en plus une sécurité non négligeable.

A l'origine, c'est un Centaur-G qui devait être utilisé comme dernier étage pour lancer Cassini. Cette version à deux moteurs de Centaur aurait dû remplir le projet *Shuttle-Centaur*, dont le but était de profiter de la capacité d'emport, du volume disponible ainsi que des faibles coûts présumés de la Navette Spatiale pour emporter des couples Centaur-Sonde vers le système solaire. Elle a été développée en même temps que Centaur G prime, une version plus grande avec plus de carburant. Cependant, à la suite du dramatique accident de la navette spatiale Challenger le 28 janvier 1986, le projet est abandonné, jugé trop dangereux par rapport aux nouvelles exigences de la NASA en matière de sécurité lors des vols habités.

Les efforts de développement faits pour Centaur-G prime sont réinvestis, et une version nommée Centaur T est mise au point pour équiper Titan IV. Cassini devrait être propulsée par cet étage.

Il est équipé de deux moteurs RL-10, fonctionnant avec de l'Oxygène liquide et de l'Hydrogène liquide. Son rôle dans la mission de Cassini est de réaliser l'insertion en orbite de la sonde ainsi que son éjection vers Vénus.

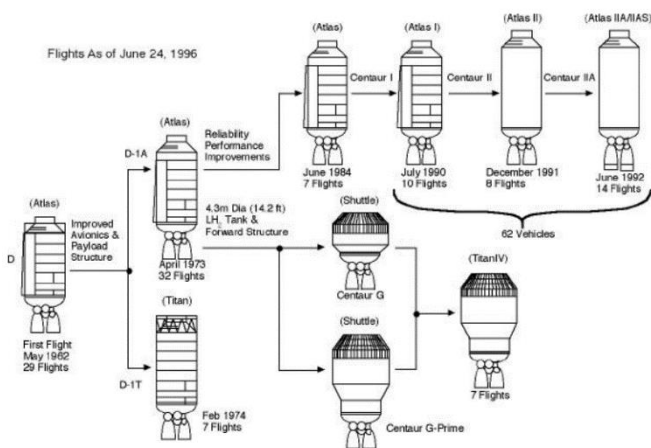


Figure 19 - Evolution de famille Centaur

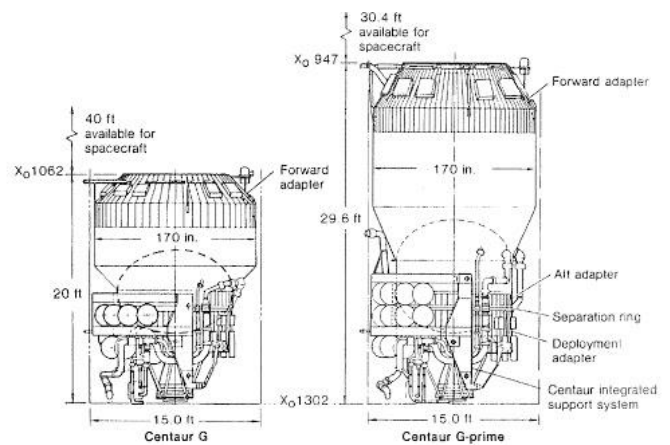


Figure 20 - Centaur G et G prime



Figure 21 - Centaur T

A.2/ Le deuxième étage

Le deuxième étage de Titan IV est allumé après la séparation du premier étage et continue d'accélérer l'ensemble Centaur-Cassini, pendant 224 secondes et jusqu'à une altitude de 203 kilomètres environ, où le Centaur est mis à feu pour l'insertion en orbite basse. Il est propulsé par un moteur LR91 de Aerojet. Il utilise de l'Aerozine 50 et du peroxyde d'Azote.

A.3/ Le premier étage

Pour soulever l'importante masse de Cassini et des deux étages supérieurs, Titan IV a recours à un premier étage puissant, utilisant un moteur LR87 qui fonctionne avec les mêmes ergols que le deuxième étage. Il fonctionne pendant une durée de 164 secondes, et devrait, dans le cas de Cassini, se couper à une altitude approximant les 162 kilomètres. Il retombera alors dans l'océan atlantique.



Figure 22 - Premier Etage de Titan IV avec ses deux propulseurs d'appoint

A.4/ Les propulseurs d'appoint

Au nombre de 2, et plus grands en hauteur et en diamètre que le premier étage lui-même, ce sont



Figure 23 - Une Titan IV complète

ces boosters à carburant solide qui fournissent plus de 85% de la poussée au décollage. Ils brûlent pendant 127 secondes après leur allumage et ne peuvent être stoppés. Les propulseurs solides sont d'excellentes solution pour assister un premier étage en raison de la puissance qu'ils sont capables de délivrer, tout en étant bien plus simples à concevoir que des moteurs à ergols liquides. En effet, les boosters de la navette spatiale – les plus puissants mis au point à ce jour – délivrent chacun presque deux fois la poussée d'un moteur F-1, qui équipait la Saturne V.

Cependant, un compromis doit être fait. Cette très forte poussée à de relativement faibles couts s'accompagne d'une faible modularité de la poussée, d'une impossibilité d'être éteints avant la consommation totale des ergols et d'une faible efficacité par rapport aux moteurs à ergols liquide. En effet, leur impulsion spécifique est souvent faible.

B. Kassini et son lanceur

Le lanceur construit pour Kassini est inspiré de la Titan IV, son fonctionnement étant toutefois adapté à la charge utile qu'il transporte.

B.1/ L'étage supérieur

Le dernier étage du lanceur sera un étage à deux moteurs inspiré du Centaur T. A la différence de ce dernier, et comme cela sera détaillé en partie V, il ne sera utilisé que pour l'éjection depuis l'orbite basse. Il dispose de 2048 m/s de Δ_v , nécessaire pour réaliser le transfert depuis l'orbite basse terrestre vers Jupiter. Ses moteurs sont deux moteurs LV-145 'Swivel', qui proposent une impulsion spécifique correcte pour une bonne poussée. La poussée est orientable afin de contrôler l'attitude de l'étage pendant ses manœuvres.

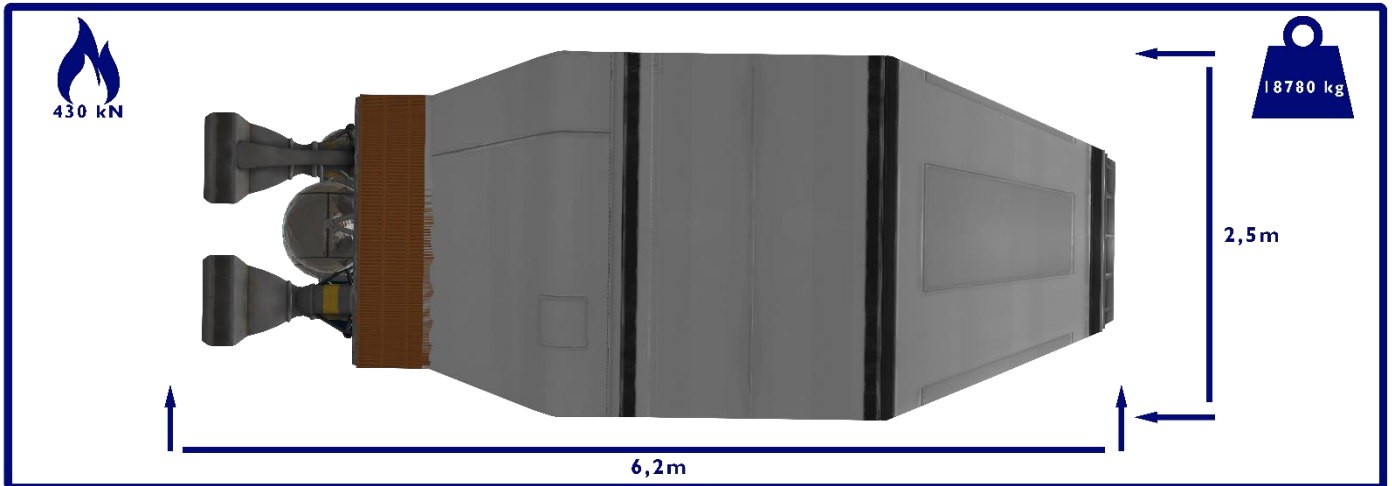


Figure 24 - L'étage supérieur du lanceur

B.2/ Le deuxième étage du lanceur

Le deuxième étage de la fusée prendra le relai du premier étage lors de l'ascension vers l'orbite avec deux phases de poussées, la deuxième réalisant l'insertion en orbite basse. Il utilise un moteur RE-15 'Skipper'.

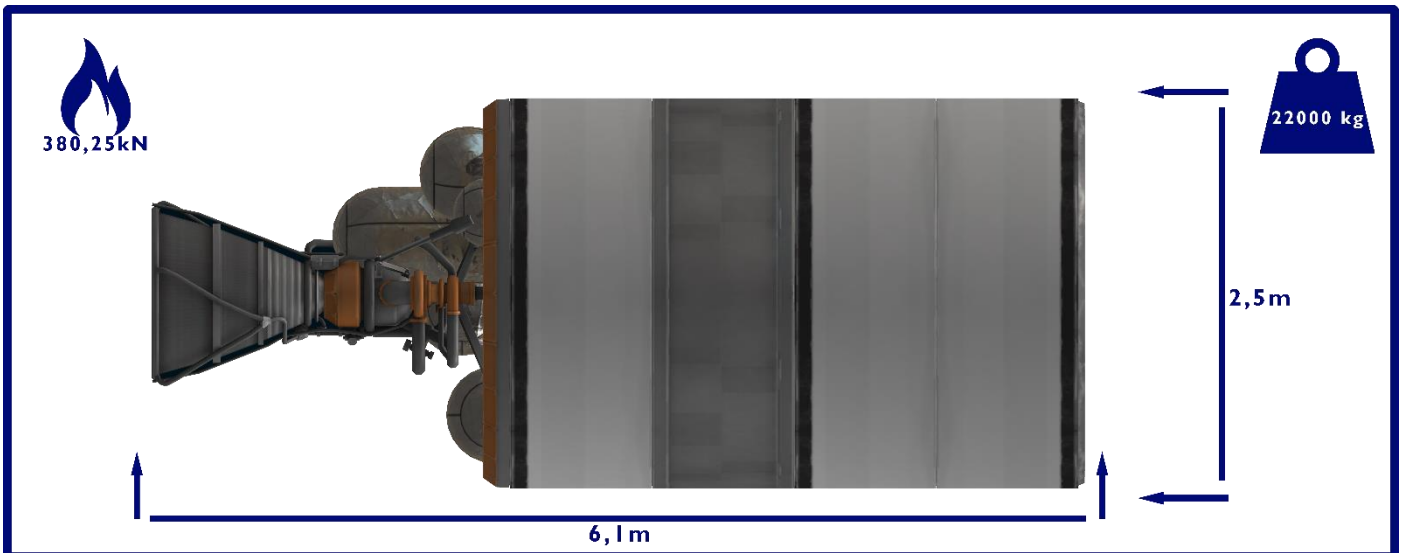


Figure 25 - Le deuxième étage du lanceur

B.3/ Le premier étage

Le premier étage est constitué comme celui de Titan IV, avec un corps principal à deux moteurs, assisté par deux grands propulseurs latéraux. Le premier étage est assez puissant et est équipé de deux KS-25 'Vector' dont la puissance a été bridée. Ces moteurs sont extrêmement performants, grâce à leur très

forte poussée couplée à une excellente ISP pour une utilisation atmosphérique, et un fort débattement possible pour les tuyères pour contrôler le lanceur.

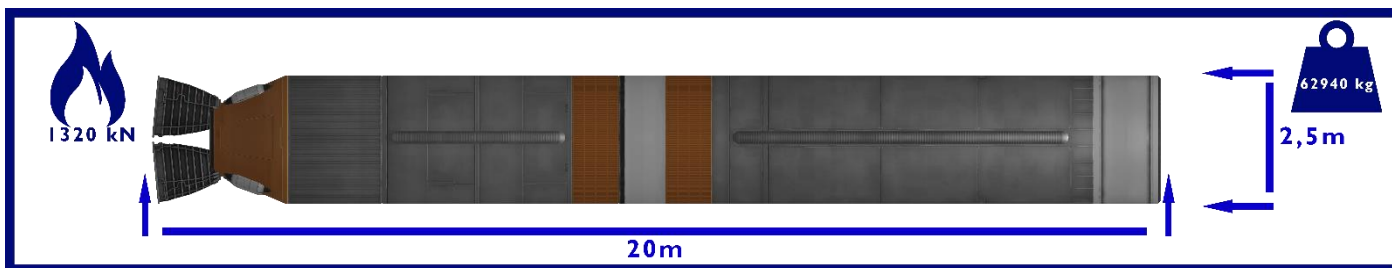


Figure 26 - Le corps principal du premier étage

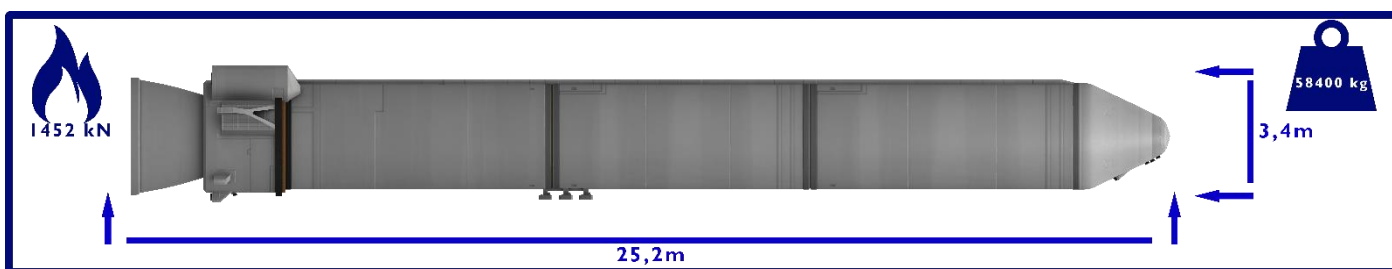


Figure 27 - Un booster latéral

C. Comparatif cote-à-cote

Maintenant que l'architecture des lanceurs est évoquée, comparons les deux, étage par étage. Nous concluons avec une vue détaillée des deux lanceurs. Cela permet de comprendre le travail qui a été fait par les équipes de KRS et les points qui les ont inspirés.

C.1/ L'étage supérieur

| | Centaur T | Etage Supérieur |
|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Dimensions (Hauteur x diamètre) | 8,9 x 4m | 6,2 x 2,5m |
| Masse totale (initiale) (kg) | 23 880 | 18 780 |
| Masse de carburant (kg) | 20 950 | 13 320 |
| Moteurs | 2 x Pratt & Whitney RL-10-A-3 | 2 x LV-T45 'Swivel' |
| Ergols | Hydrogène Liquide / Oxygène Liquide | Liquid Fuel / Oxidizer |
| Orientables ? | Oui | Oui (3°) |
| Impulsion spécifique | 444s (vac) | 320s (vac) |
| Durée de fonctionnement | 600s | 97s |
| Poussée (vac) | 146,9 kN (total) | 430 kN (total) |

Comparatif 4 - Le Centaur comparé à l'étage supérieur de notre lanceur



Figure 28 - Comparatif de taille des deux étages supérieurs

C.2/ Le deuxième étage

| | Titan IV S2 | Deuxième étage |
|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Dimensions (Hauteur x diamètre) | 9,97 x 3,04m | 6 x 2,5m |
| Masse totale (initiale) (kg) | 39 500 | 22 000 |
| Masse de carburant (kg) | 35 000 | 16 800 |
| Moteur | 1 x Aerojet LR91-AJ-11 | 1 x RE-15 'Skipper' |
| Ergols | Aerozine 50 / Peroxyde d'Azote | Liquid Fuel / Oxidizer |
| Orientable ? | Oui | Oui (2°) |
| Impulsion spécifique | 316s (vac) | 320s (vac) |
| Durée de fonctionnement | 224s | 138s |
| Poussée (vac) | 470 kN | 380,25 kN |

Comparatif 5 - Les deuxièmes étages

C.3/ Le premier étage

| | Titan IV S1 | Premier étage |
|---|--------------------------------|------------------------|
| Dimensions corps principal (Hauteur x diamètre) | 26,37 x 3,04m | 20 x 2,5m |
| Dimensions Boosters (Hauteur x diamètre) | 34,2 x 3,2m | 25,2 x 3m |
| Masse totale corps (initiale) (kg) | 163 000 | 62 940 |
| Masse de carburant corps (kg) | 155 000 | 45 710 |
| Masse totale booster (1/2) (kg) | 349 510 | 58 400 |
| Masse de carburant booster (1/2) (kg) | 312 460 | 37 200 |
| Moteur | 2 x LR87-Aj-11 | 2 x KS-25 'Vector' |
| Ergols | Aerozine 50 / Peroxyde d'Azote | Liquid Fuel / Oxidizer |
| Orientable ? | Oui | Oui (10,5°) |
| Impulsion spécifique | 302s (vac) | 315s (vac) |
| Durée de fonctionnement | 189s | 106s |
| Poussée (vac) | 2451 kN (total) | 1320 kN (total) |
| Moteur | 2 x Solid Rocket Motor | 2 x S2-33 'Clydesdale' |
| Ergols | HTPB | Solid fuel |
| Orientable ? | / | Oui (1°) |
| Impulsion spécifique | 259s (sl) | 210s (sl) |
| Durée de fonctionnement | 140s | 58s |
| Poussée (vac) | 7560 kN (chaque) | 1452 kN (chaque) |

Comparatif 6 - Les premiers étages et boosters latéraux

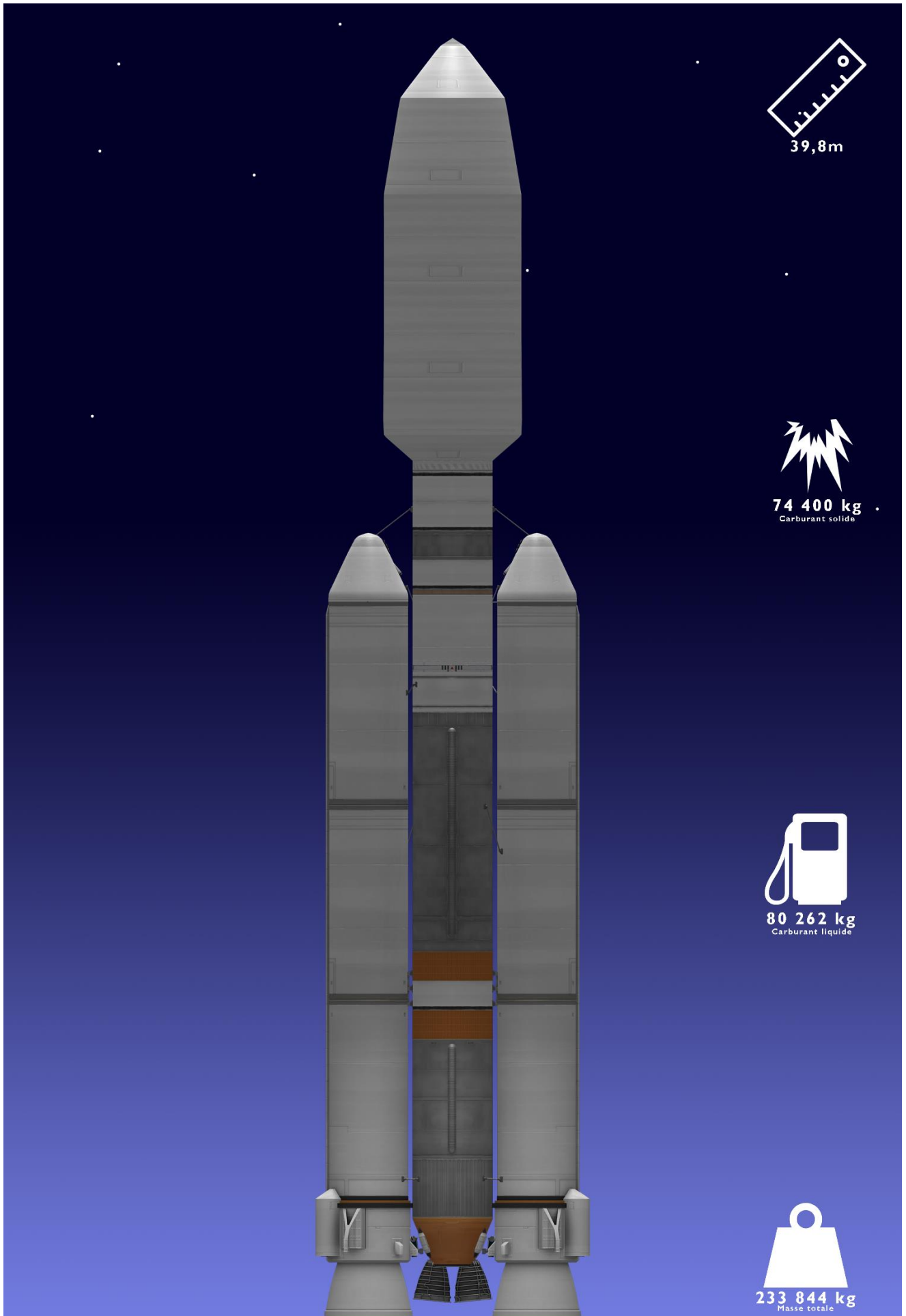


Figure 29 - Le lanceur de Cassini, récapitulatif

V – Plan de vol retenu, trajectoires prévues

A. Le décollage

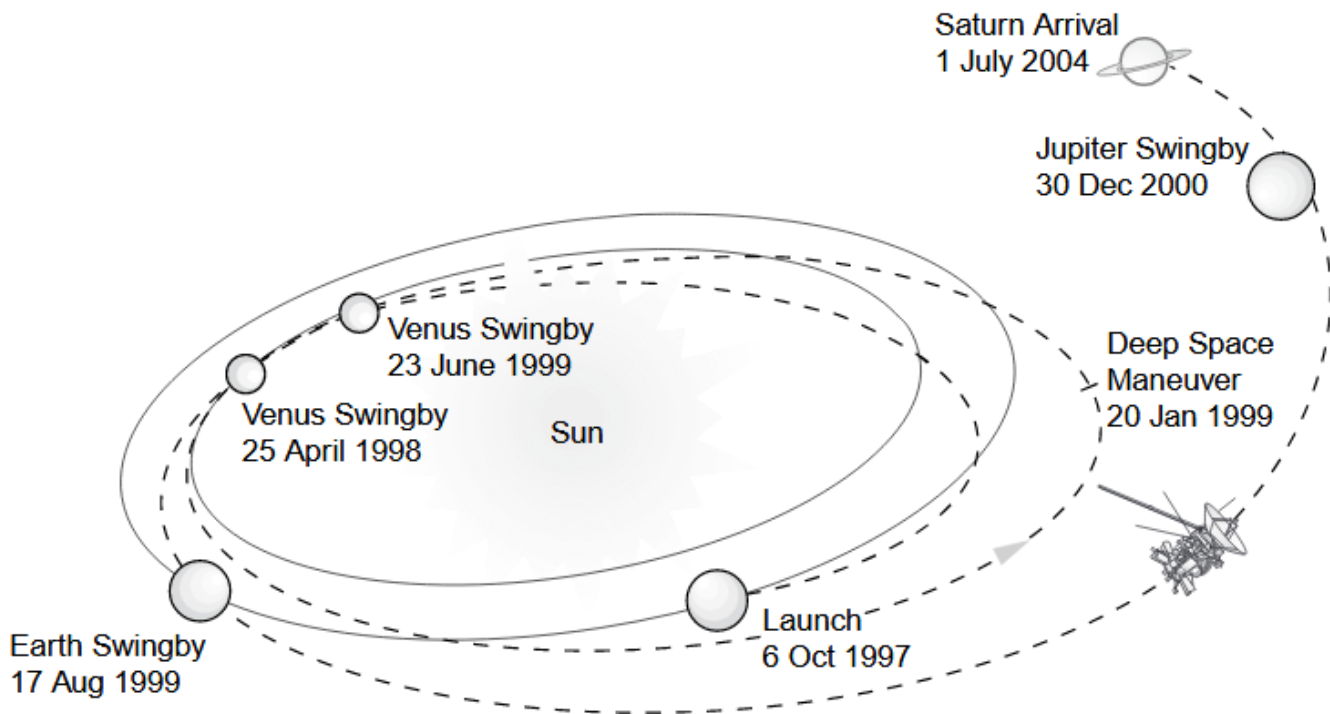
Les deux sondes emprunteront des chemins bien différents pour atteindre Saturne.

Cassini sera amenée par l'étage Centaur sur une orbite de parking, avec un périhélie à 170 km et une apogée à 445 km, pour une inclinaison comprise entre 28,6 et 31,6 degrés. Après cela, le Centaur sera allumé à nouveau pour injecter la sonde sur une trajectoire interplanétaire, avant de se séparer.

Kassini quant à elle sera injectée en orbite par le deuxième étage du lanceur. Nous visons une orbite circulaire de 200 kilomètres, pour une inclinaison d'environ 28,6 degrés. Là, le dernier étage sera utilisé pour éjecter la sonde sur une trajectoire interplanétaire.

B. Le voyage interplanétaire

Durant son voyage, Cassini utilisera quatre assistances gravitationnelles pour rejoindre Saturne : Vénus, Vénus, la Terre, et Jupiter. Cela lui permettra de gagner énormément de vitesse que le lanceur ne pouvait pas lui fournir. Elle exécutera plusieurs manœuvres pour corriger sa trajectoire et ajuster ses survols, afin de bénéficier au mieux de l'assistance de ces astres.



Interplanetary Trajectory

Figure 30 - Trajectoire Interplanétaire de Cassini - Huygens

Cassini partira directement vers Jupiter depuis l'orbite basse terrestre. Une manœuvre sera exécutée pour corriger la trajectoire lors de l'Assistance gravitationnelle. Elle pourra être complétée par une deuxième manœuvre bien plus courte. Après l'assistance, une dernière manœuvre permettra d'obtenir la trajectoire souhaitée lors de la rencontre avec Saturne

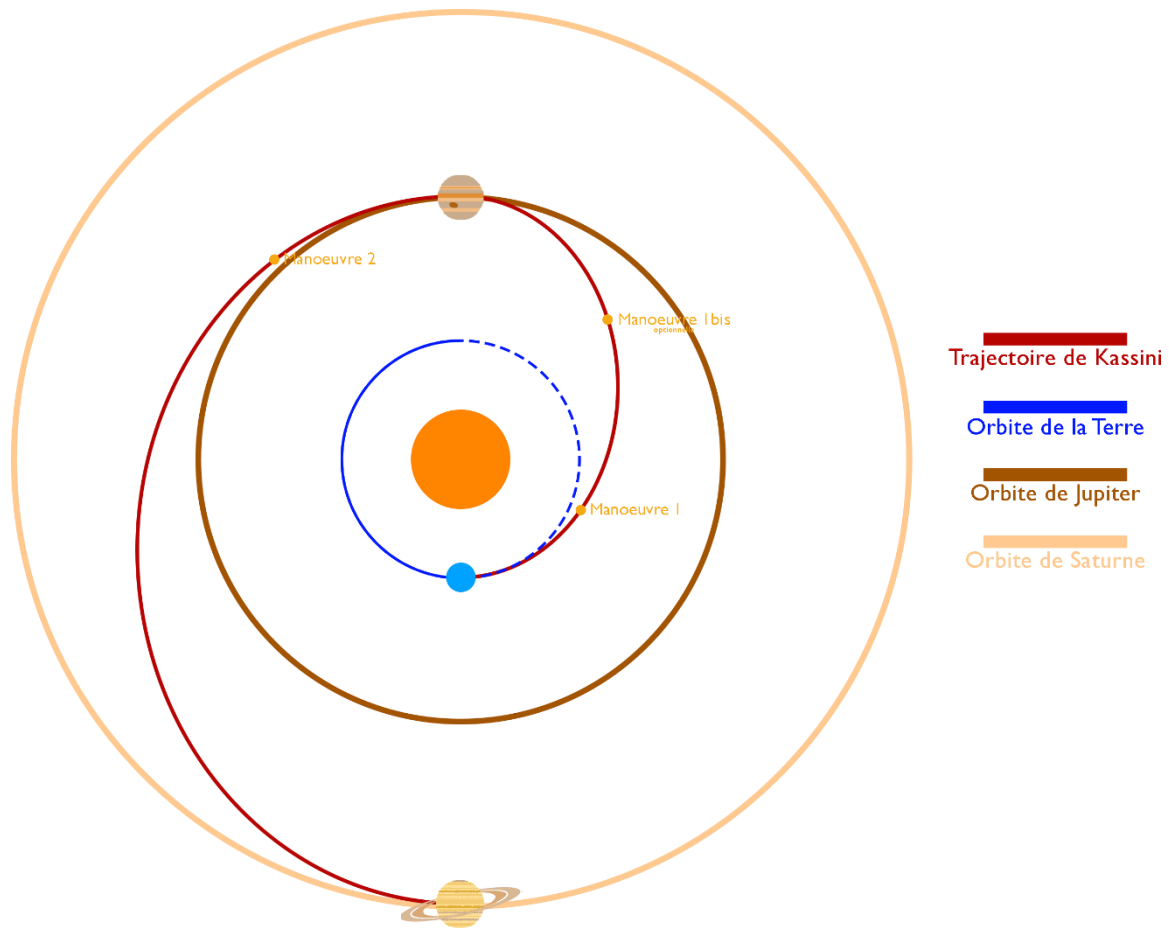


Figure 31 - Trajectoire interplanétaire de Cassini

C. Arrivée dans le système Saturnien

A son arrivée dans le système saturnien, Cassini survolera le satellite Phœbé puis plongera entre les anneaux de Saturne et effectuera un passage à très basse altitude au-dessus des nuages de la géante gazeuse. Durant ce survol, elle passera à moins de 20 000 km du sommet des nuages de Saturne. Elle se placera en sur une orbite très fortement elliptique, avec un périapside à 18 000 kilomètres des nuages et une apoapside à 9 millions de kilomètres, pour une inclinaison visée de 11,5° environ.

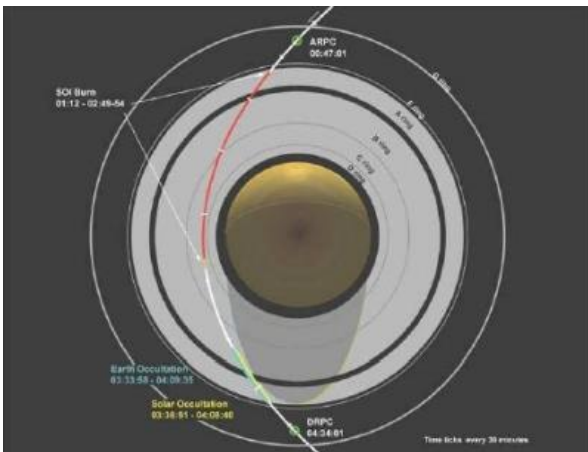


Figure 32 - Arrivée de Cassini dans les environs de Saturne

Kassini arrivera dans les environs de Saturne et passera elle aussi très proche des nuages. Elle allumera ses moteurs au plus près de la planète pour s'injecter en orbite, avant de traverser les anneaux. Sa première orbite visée aura un périapside d'environ 2700 kilomètres (attention, les distances sont à multiplier par 10,61 pour avoir l'équivalent

dans le système humain !) et une apoapside vers 980 000 kilomètres, pour une inclinaison très forte, environ 100 degrés. En raison de cette forte inclinaison, Cassini ne survolera aucune lune lors de son entrée dans le système.

D. Evolution dans le système Saturnien

Une fois dans le système de Saturne, Cassini exécutera énormément de modifications de trajectoire pour réaliser de multiples survols des lunes de la planète. Elle commencera par deux survols de Titan, le deuxième étant effectué à très basse altitude afin d'observer en détail l'atmosphère et la surface. A l'issue de ce survol, Cassini se placera sur une trajectoire de collision avec Titan pour relâcher Huygens, avant d'effectuer une autre manœuvre pour éviter l'impact. Durant la rentrée et après l'atterrissage de Huygens, Cassini effectuera un troisième survol, durant lequel elle servira de relai aux données transmises par l'atterrisseur. Durant toute la suite de sa mission, Cassini fera de très nombreux survols de Titan, ainsi que d'autres Lunes majeures telles que Japet, Encelade, Mimas, Rhéa... Au total, l'orbiteur approchera plus de cent fois Titan, car c'est l'objectif principal de la mission autour de Saturne, et aussi car la forte masse du satellite permettra à la sonde de profiter d'autant d'assistances gravitationnelles pour modifier sa trajectoire. Elle mènera une étude approfondie de toutes les lunes survolées, ainsi que de Saturne et de ses anneaux.

Cassini débutera son exploration en réalisant une première manœuvre la plaçant sur une trajectoire d'impact avec Titan. Puis elle relâchera Huygens, et fera sa manœuvre d'évitement. Durant la rentrée atmosphérique, elle relaiera les données de l'atterrisseur et réalisera une première observation de Titan. Ce premier passage modifiera la trajectoire de l'orbiteur. Elle fera ensuite deux autres survols pour monter petit à petit son apogée et modifier son inclinaison orbitale. Une manœuvre lui permettra alors d'atteindre Japet pour la survoler. Cassini fera alors deux nouveaux survols de Titan pour se freiner et faire redescendre son apogée, avant de partir vers les autres lunes. Dans l'ordre, elle passera par Encelade, Téthys, Dioné, Rhéa, et Mimas.

E. Fin de mission

Avant son lancement, la fin de mission de Cassini n'est pas encore décidée. Les options envisagées sont à l'heure actuelle : Un plongeon dans l'atmosphère de Saturne, un déplacement vers une orbite stable, un départ vers l'orbite héliocentrique, voire vers Jupiter, etc. L'intérêt est d'éviter toute contamination biologique des lunes sur lesquelles on espère découvrir de la vie. Si l'option de la rentrée atmosphérique est choisie, Cassini utilisera Titan pour remonter progressivement l'inclinaison de son orbite et plonger en direction du pôle nord de la géante.

Dans le cas de Cassini, nous avons choisi de réaliser après plusieurs corrections de trajectoire une rentrée atmosphérique qui détruira la sonde et donnera l'occasion de collecter quelques précieuses données supplémentaires.