

# La chimie et l'espace

*Responsable dès les années 1980 des premiers projets de satellites d'observation de la Terre à l'Agence Spatiale Européenne (ESA<sup>1</sup>) avant de prendre la responsabilité des projets de satellites scientifiques, Jacques Louet a une longue expérience des enjeux et des défis des missions spatiales avec une vue d'ensemble expliquant où l'on va dans l'espace, et pour observer quoi. Il présente les apports de la chimie et des technologies qui sont associées à ces missions et, en retour, l'apport du spatial dans la compréhension des mécanismes chimiques en jeu, aussi bien autour de la Terre que dans le Système Solaire et l'Univers.*

## 1 Introduction : le décollage d'Ariane

### 1.1. L'enjeu du décollage avec Ariane 5

Le décollage se résume en une phrase : il faut lancer 780 tonnes pour en satelliser 10. Pour le lancement on dispose de trois propulseurs qui vont fournir au total 13 000 kN de poussée, sachant qu'il en faut déjà 7 800 pour vaincre l'apesanteur (**Figure 1**).

On utilise deux étages à poudre, qui fournissent chacun 6 000 kN de poussée, et un étage liquide vulcain (au centre), qui représente seulement un peu plus de 10 % de l'ensemble de la poussée.

On éjecte ainsi 2 tonnes/s de matière avec les étages à poudre, et 300 kg/s avec l'étage central.

Pour résumer : on part avec 780 tonnes, et au bout de 100 secondes, au moment de la séparation des boosters (on est alors à 80 km d'altitude), on a déjà perdu plus de 600 tonnes sur 780. Ces quelques chiffres permettent de comprendre le problème de la propulsion chimique.

### 1.2. L'éjection de masse

Pour pousser, il faut éjecter de la masse avec de la vitesse. Le problème est qu'avec une propulsion d'origine chimique traditionnelle, la vitesse de la masse éjectée est d'environ 3 000 m/s, et on ne sait

1. [www.esa.int/ESA](http://www.esa.int/ESA)

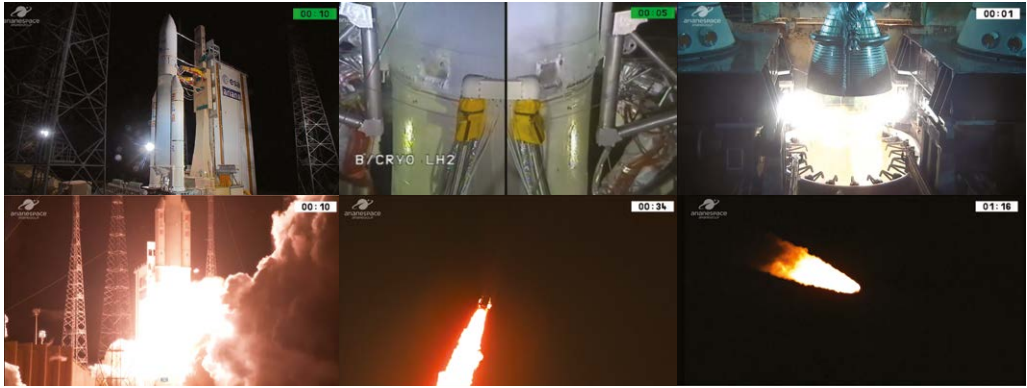


Figure 1

Au décollage, les deux boosters à poudre plus l'étage central cryogénique de la fusée Ariane 5 fournissent 13 000 kN de poussée.

Source : ArianeGroup.

pas vraiment faire mieux. On obtient 4 000 m/s avec un moteur cryogénique, mélange de dihydrogène et de dioxygène stockés à l'état liquide.

Donc pour obtenir une poussée de 10 kN ou plus, sachant que  $p = mv$  (poussée = masse éjectée par seconde x vitesse d'éjection), il faut éjecter énormément de masse, ce qui explique pourquoi en 100 s on a perdu 600 tonnes de matière

avec Ariane 5. De plus, il faut vaincre les forces de gravité : les forces appliquées à la fusée sont représentées sur la Figure 2.

### 1.3. Le lancement

La Figure 3 représente les différentes étapes du lancement : on voit la séparation des boosters (100 s après le décollage), on est alors avec la seule

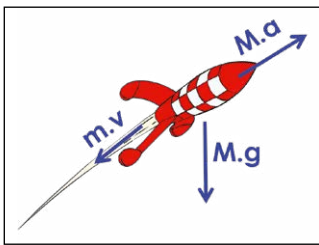


Figure 2

Représentation des forces subies par la fusée lors du décollage. L'attraction gravitationnelle est dirigée vers le bas, la poussée vers l'arrière et la quantité de mouvement vers l'avant.

$m$  = masse éjectée par seconde ;  
 $v$  = vitesse d'éjection en m/s ;  
 $m.v$  = la poussée en Newtons,  
 $a$  = l'accélération de la fusée de masse  $M$  ;  $Mg$  la force gravitationnelle.

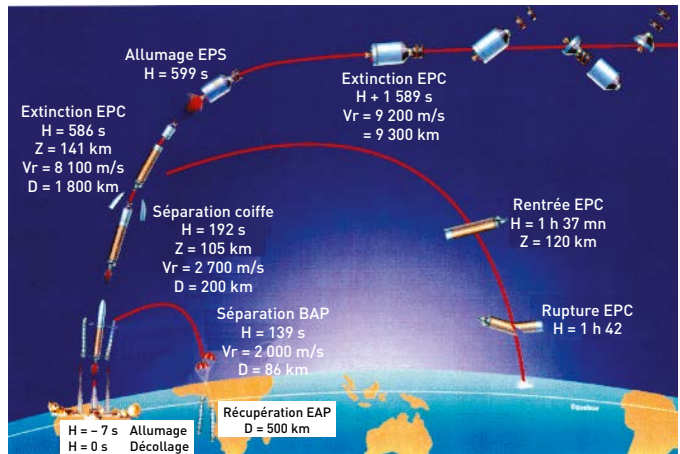


Figure 3

La séparation des étages est réalisée pour gagner en vitesse par éjection de masse, afin de se mettre en orbite.

Poussée au décollage : 13 000 kN (2 EAP+ Vulcain 2) ; masse au décollage : 780 tonnes ; capacité GTO : 10 000 Kg ; en lancement double : 6 300 kg + 3 000 kg.

Source : ArianeGroup.



**Figure 4**

Les moteurs RD qui composent le moteur de Soyuz sont des propulseurs classiques fonctionnant au kérosène et oxygène liquide.

Moteur RD 108/RD 107 : poussée : 829 kN au sol, 990 kN dans le vide ; poussée au décollage : 4146 kN [5 RD 108].

Source : NPO.

poussée de l'étage liquide principal, le vulcain 2. En fait, au bout de 580 secondes, après extinction et séparation de l'étage principal cryotechnique, il ne reste plus que 30 tonnes, correspondant à l'étage supérieur, qui est aussi un étage cryotechnique, et qui va pousser de 600 s jusqu'à environ 1 600 s, donc pendant 1 000 s, la charge utile pour sa mise en orbite. Ainsi pour Ariane, on sait mettre en orbite (orbite de transfert géostationnaire, « Geo Transfert Orbite », GTO<sup>2</sup>) 10 000 kg, souvent en lancement double car on a

2. GTO : une orbite de transfert géostationnaire est une orbite intermédiaire hautement elliptique qui permet ensuite de placer des satellites en orbite géostationnaire.

très peu de satellites qui font 10 tonnes.

#### 1.4. Les moteurs actuels

Deux exemples bien connus permettent d'illustrer la poussée : le moteur de Soyuz (**Figure 4**) et celui de son concurrent redoutable qui arrive sur le marché, le Falcon 9 de SpaceX (**Figure 5**). Ce sont pratiquement les mêmes moteurs, qui fournissent aux alentours de 900 kN de poussée avec comme carburant un mélange d'oxygène liquide et de kérosène. Le plus amusant, c'est que c'est exactement la technique du V2<sup>3</sup>, où l'on utilisait de l'éthanol et de l'oxygène liquide avec déjà une turbopompe à l'époque : il n'y a donc pas eu vraiment de progrès dans la propulsion chimique. Si l'on veut faire de l'exploration spatiale avec l'homme, il faut trouver un nouveau moyen de propulsion.

## 2 Les enjeux de la mise en orbite

### 2.1. Les lanceurs

Les **Figures 6** et **7** montrent deux lanceurs, aux géométries magnifiques. On les transporte à vide, on les remplit seulement après érection sur le site de lancement, ce qui n'est pas le cas d'Ariane parce que les boosters étant à l'état solide, il faut les intégrer, déjà pleins, verticalement. Dans le cas de Soyuz, c'est un cluster de cinq moteurs identiques (**Figure 6**), dans le cas de Falcon 9, c'est

3. V2 : missiles balistiques des années quarante.



**Figure 5**

Les moteurs Merlin qui propulsent le lanceur Falcon 9 sont également des propulseurs classiques fonctionnant au kérosène et oxygène liquide.

Source : SpaceX.

Moteur Merlin : poussée : 756 kN au sol, 934 kN dans le vide ; poussée au décollage : 6805 kN [9 moteurs Merlin].



**Figure 6**

Le moteur de Soyuz est composé de cinq moteurs RD. Ce lanceur est relativement léger (306 t) face à son concurrent Falcon 9 (538 t). Soyuz ST : poussée au décollage : 4 146 kN [5 RD 108] ; masse au décollage : 306 t ; capacité en GTO (Kourou) 3 100 kg.

Source : NPO.



Figure 7

Le lanceur Falcon 9 est composé de neuf moteurs Merlin. Il permet une poussée plus importante que le lanceur Soyouz. Space X Falcon 9FF : poussée au décollage : 6 805 kN (neuf moteurs Merlin) ; masse au décollage : 538 t ; capacité en GTO : 8 300 kg.

Source : SpaceX.

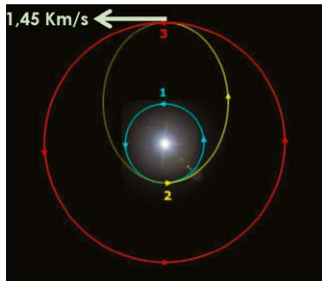


Figure 8

La mise en orbite géostationnaire s'effectue en trois temps : les étapes 1 et 2 (orbites bleue et jaune) sont atteintes grâce au lanceur, l'orbite en jaune est l'orbite de transfert géostationnaire (GTO), en rouge l'orbite de circularisation géostationnaire (GEO) obtenue par Delta v 1,45 Km/s, obtenu par un moteur d'apogée faisant partie de la charge utile.

Méthode classique : propulseur de 400 N, bipropellant UDMH/ $N_2O_4$  ; coût en masse : la masse en GEO est moins de 50 % de la masse en GTO.

un cluster de neuf moteurs identiques (Figure 7).

## 2.2. L'orbite géostationnaire (GEO)

La plupart des lancements (80 %) sont réservés pour l'orbite géostationnaire (GEO) (Figure 8). Le lanceur ne délivre jamais ses charges utiles/satellites sur l'orbite géostationnaire, il les largue sur l'orbite de transfert (GTO) : 200 km au périégée et 36 000 km à l'apogée, où aura lieu la circularisation de l'orbite. On arrive avec 1,55 km/s à l'apogée, il faut alors passer à 3 km/s pour gagner l'orbite géostationnaire. Pour cela, il faut appliquer un Delta v.

## 2.3. Le Delta v

La méthode classique pour réaliser un delta v<sup>4</sup> consiste

4. Delta v : différence de vitesse entre celle nécessaire pour la circularisation et celle initiale.

à prendre un propulseur UDMH<sup>5</sup>/ $N_2O_4$  (hydrazine/ peroxyde d'azote) de 400 N (Figure 9), qui est le propulseur le plus classique, et l'ensemble de l'opération fait qu'il y a presque un facteur 2 entre la masse qui a été satellisée par le lanceur et celle qui est vraiment utile. Pour 6 tonnes mises en orbite par le lanceur, il n'y a plus que 3 tonnes de charge utile en GEO, tout le reste a servi à effectuer le delta v.

## 2.4. L'espoir du propulseur électrique

Une lueur d'espoir vient de la toute petite propulsion : la propulsion électrique a réalisés des progrès considérables depuis le début des années 2000, mais sur des puissances qui n'ont rien à voir avec celles d'un lanceur :

5. UDMH : la 1,1-diméthylhydrazine, composé chimique de formule  $H_2N-N(CH_3)_2$ .



Figure 9

La conception du propulseur de 400 N, bipropellant UDMH/ $N_2O_4$  ici en laboratoire. Il utilise l'énergie libérée par la réaction entre l'hydrazine et le peroxyde d'azote pour produire la poussée nécessaire à la circularisation en orbite géostationnaire (GEO) par Delta v de 1,45 Km/s.

Source : ArianeGroup.

on parle ici de 150 à 300 mN. Il y a cependant un avantage considérable à ces propulseurs électriques, qui est qu'on peut pousser pendant très longtemps. La technique consiste à utiliser du Xénon pour avoir des ions relativement lourds et faciles à manipuler au niveau de l'éjection par une cathode, une anode et une énergie électrique qui est fournie par les panneaux solaires (**Figure 10**). La vitesse d'éjection s'élève à 150 000 m/s, le produit masse éjectée x vitesse d'éjection est considérable, et c'est bien entendu ce qui produit la poussée.

#### 2.4.1. Exemples d'utilisations des propulseurs électriques

Les propulseurs électrique ont permis de belles aventures, dont Smart 1<sup>6</sup>, lancé en 2003 en propulsion électrique pour aller sur la Lune : Ariane

6. Smart1 : sonde spatiale de l'Agence spatiale européenne propulsée par un moteur ionique alimenté par des panneaux solaires. Sa mission s'est déroulée du 27 septembre 2003 au 3 septembre 2006.

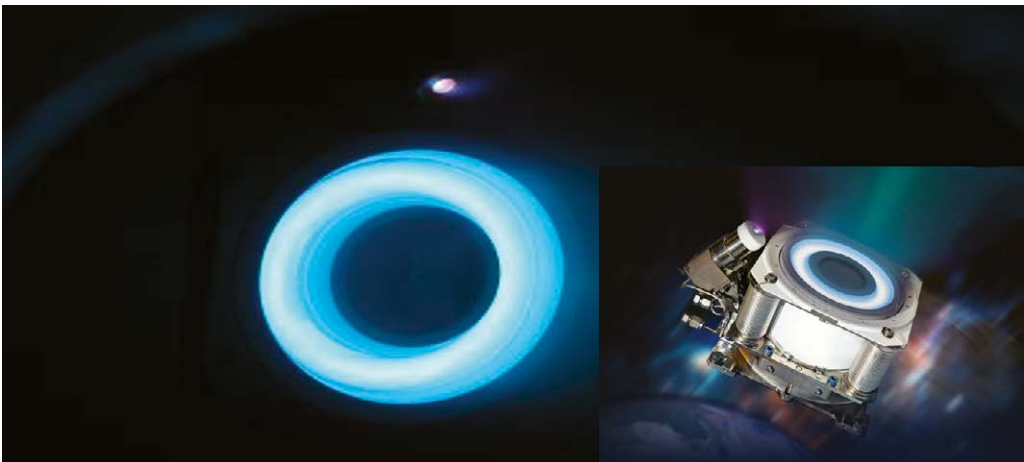
nous lance sur une orbite plus ou moins circulaire et de là en 18 mois, en poussant avec 130 mN en permanence, on est arrivés sur la Lune : c'était l'objectif de la mission.

Une autre mission que l'on a sauvée, qui était moins prévue, était la mission de satellite relais de communication Artemis sur Ariane 510, juste avant Envisat, où le 3<sup>e</sup> étage d'Ariane n'a pas fonctionné correctement. Il y avait un vice de design qui s'est révélé au cours de ce vol : au lieu d'être placé sur l'orbite GTO avec apogée à 36 000 km, le satellite s'est retrouvé sur une orbite d'apogée 17 000 km. Heureusement on avait des propulseurs électriques qui n'étaient pas du tout prévus pour atteindre l'orbite GEO, mais seulement pour tester la propulsion électrique dans la maintenance en position géostationnaire. On a quand même mis en action ces propulseurs et on a finalement réussi en treize mois à passer des 17 000 km à l'orbite géostationnaire, on a alors actionné le booster d'apogée

**Figure 10**

*Le réservoir de Xénon a permis deux belles aventures : propulser Smart-1 vers la Lune et récupérer Artémis. Le principe est d'éjecter des ions à très grande vitesse pour que la poussée ( $m \times v$ ) soit significative, avec une vitesse d'éjection proche de 150 000 m/s, on atteint une poussée de 130 mN à 320 mN.*

Source : Safran Group.





prévu pour la circularisation de l'orbite et on était en orbite GEO ! Un miracle donc, grâce à ces propulseurs électriques, qui nous ont permis de sauver la mission. Cela tombait bien puisque c'était le satellite relais à utiliser plus tard pour relayer les données d'observations, notamment d'Envisat. Ce n'était pas tout à fait nouveau car les américains avaient un peu d'avance sur nous, mais avec des propulseurs moins puissants.

En fait, on peut maintenant passer du GTO à une orbite circularisée GEO en utilisant quatre propulseurs électriques de 300 mN chacun, et donc en prenant notre temps, c'est-à-dire qu'au lieu de le faire en un boost, on atteint l'orbite géostationnaire en quatre ou cinq mois. Cela a été réalisé récemment avec le satellite Eutelsat 172B, et a permis de gagner 40 % de la masse.

Figure 11

*Le tout-électrique est plus lent à satelliser en GEO, mais plus léger que le tout-chimique, ce qui permet soit d'emporter une charge utile plus conséquente soit de réduire la masse du satellite et son coût de lancement.*

Source : Airbus.

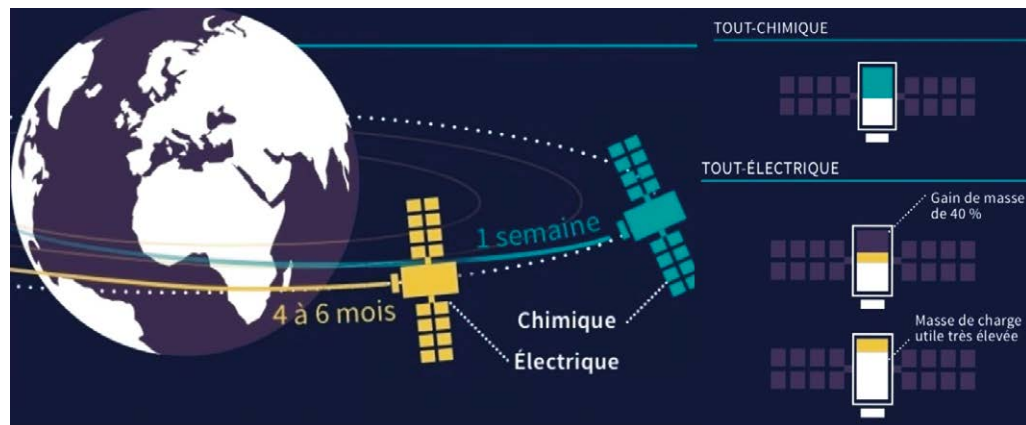
#### 2.4.2. Le gain des propulseurs électriques

Le coût du lancement étant proportionnel à la masse, on peut choisir de gagner ainsi en diminuant la masse au lancement (Figure 11). L'autre

choix est de profiter du gain de masse, au niveau de la propulsion, pour augmenter la charge utile. Avec la propulsion électrique, on passe certes quatre ou cinq mois pour réaliser la mise en orbite GEO, mais le satellite ayant une durée de vie de quinze ans, ce choix représente un gain considérable sur le coût global de la mission.

Sur ces satellites (Figure 12A), des petits propulseurs électriques sont installés en bout de bras spécifiques, deux propulseurs par bras. Sur le propulseur (Figure 12B) on aperçoit, sur le côté, un neutraliseur, qui a pour rôle d'éjecter des électrons afin de neutraliser le flux en ions positifs et éviter ainsi la formation de plasma<sup>7</sup>. Le propulseur est de petite dimension, soit 20 par 20 cm (Figure 12C), le bras du propulseur en

7. Plasma : c'est l'un des quatre principaux états de la matière, avec les états solide, liquide et gazeux. C'est un état désordonné, constitué de charges électriques libres dans un champ de force et ayant une durée de vie longue comparée aux temps caractéristiques des déplacements.



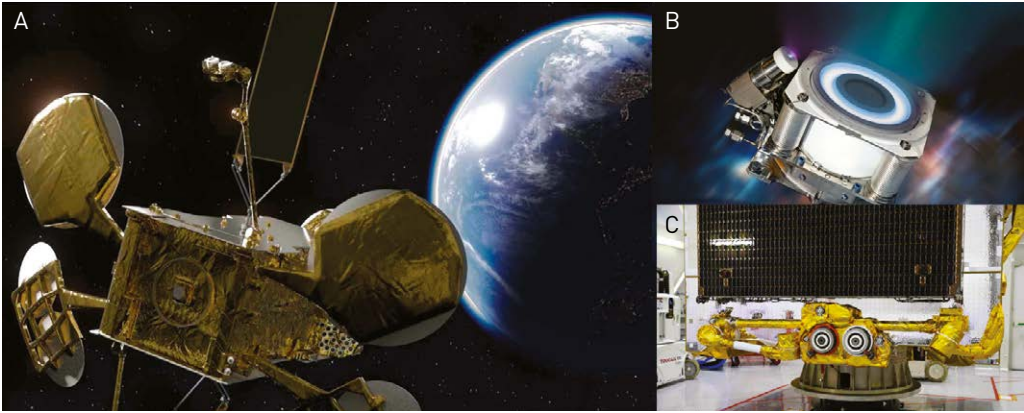


Figure 12

A) Le satellite Eutelsat 172 B dispose de petits propulseurs électriques en bout de bras ; B) détail sur le propulseur et son neutraliser ; C) les deux propulseurs en bout de bras, en position repliée pour le lancement.

Source : Airbus.

position repliée, configuration lancement.

### 3 L'orbite héliosynchrone et l'observation de la Terre

#### 3.1. L'orbite héliosynchrone

Rendons-nous maintenant sur l'orbite héliosynchrone<sup>8</sup>, qui est inclinée à 99 degrés, et qui est très utilisée pour l'observation de la Terre (Figure 13). La plupart des

8. Orbite héliosynchrone : une orbite géocentrique dont on choisit l'altitude et l'inclinaison de sorte que l'angle entre le plan d'orbite et la direction du Soleil demeure quasiment constant.

orbites de ces satellites sont entre 700 et 800 km d'altitude et, avec un peu plus de quatorze orbites par jour, on peut couvrir la Terre avec un maillage qui dépend de la fauchée de l'instrument considéré et de la latitude de l'observation. En général, on choisit une orbite dont le nœud descendant est à 10 h 30, parce que c'est l'heure où nous avons les meilleures illuminations, notamment pour l'instrumentation optique. Cette orbite offre 66 minutes de jour, 33 de nuit : le jour, on en profite pour recharger les batteries, la nuit on opère avec les batteries, et on réalise cela plus de quatorze fois par jours.

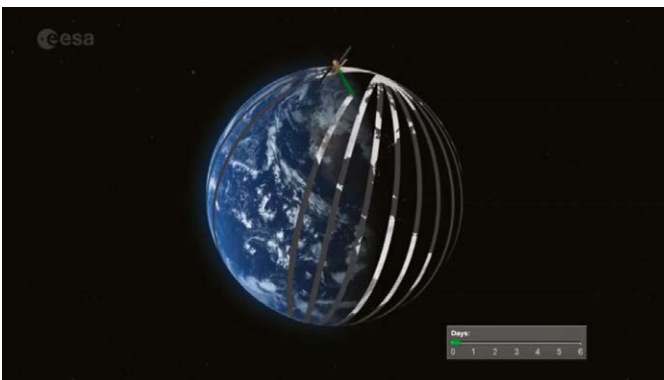


Figure 13

L'orbite héliosynchrone permet une observation optimale de la Terre. Elle est représentée ici avec ses différentes trajectoires.

Source : ESA.

### 3.2. Le projet Envisat

Le projet Envisat, un satellite de la taille d'un bus, 8 tonnes, 25 kW, a coûté 2 milliards d'euros, un gigantesque projet qui a succédé aux missions pré-curseurs ERS<sup>9</sup> (ERS-1, ERS-2). ERS, au moment de l'approbation du programme au début des années 1980, était un grand saut dans l'inconnu avec des instruments très novateurs sans pratiquement d'expériences préalables. Des choix audacieux qui se sont révélés heureusement très judicieux. On avait, à l'époque, réalisé notamment le développement d'un instrument qui s'est avéré fantastique : un radar à ouverture de synthèse (*Figure 14*), une grande antenne de 1,30 m par 10 m de long. ERS-1 possédait un

certain nombre d'autres senseurs qui sont devenus des musts : un radar altimètre de précision centimétrique pour observer les océans et les masses glaciaires, notamment des pôles, un diffusiomètre pour la mesure des vents et un imageur infrarouge pour mesurer précisément la température des océans.

Au moment de décider du programme Envisat, au début des années 1990, le problème fut que l'observation de la Terre ayant tellement le vent en poupe, tous voulaient avoir leurs instruments favoris à bord, ce qui allait conduire à un monstre. Le monstre, nous l'avons coupé en deux : ce qui est associé à la météo a été placé sur MetOp<sup>10</sup>, tandis

**Figure 14**

*Le satellite Envisat, dédié à l'observation de l'environnement, embarquant une panoplie complexe de dix instruments optique et radar.*

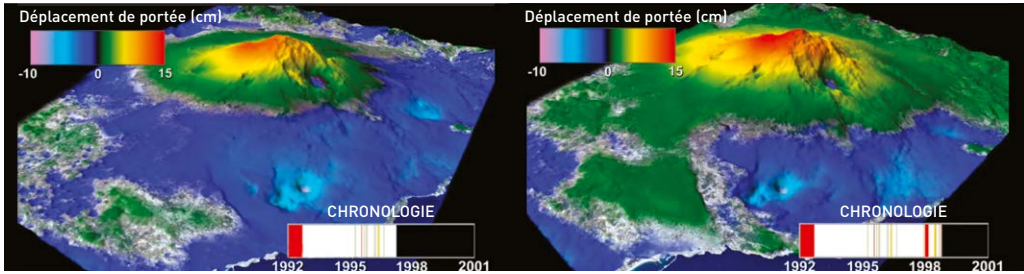
Source : ESA.

9. ERS (European Remote-Sensing) : famille de deux satellites d'observation de la Terre développée par l'Agence spatiale européenne, ERS-1 et ERS-2.

10. MetOp : famille de trois satellites météorologiques placés en orbite polaire héliosynchrone et développés conjointement par l'Agence spatiale européenne et EUMETSAT.







qu'on avait sur Envisat tout de même encore dix instruments, dont un radar imageur à ouverture de synthèse de nouvelle génération, un radar altimètre, deux instruments optiques imageurs pour les océans et les zones côtières, et surtout trois instruments novateurs, complexes et de grand potentiel pour l'observation de l'atmosphère.

#### *Quelques résultats des instruments embarqués*

Non seulement le radar à ouverture synthétique offre des images précises et de haute résolution de jour comme de nuit, indépendamment de la couverture nuageuse, mais il permet de réaliser de l'interférométrie par superposition d'images prises à des instants différents en conservant et comparant la phase des signaux reçus sur chaque observation. Cette technique interférométrique, découverte durant l'exploitation des missions ERS et améliorée sur Envisat, permet d'observer des variations millimétriques de terrain entre deux observations.

La **Figure 15** donne l'exemple de l'Etna : les radars d'ERS et d'Envisat ont permis d'observer des mouvements de quelques centimètres au cours du temps. On peut dire

que la zone de l'Etna respire : l'ensemble de la zone monte et descend avec des amplitudes variables.

L'interférométrie radar a de multiples applications : visualiser l'impact précis des tremblements de terre, visualiser avec précision des mouvements de terrain de toute nature, grands ou infimes. Autre exemple, si on prend le métro à Paris, on peut y suivre toute la construction d'une ligne rien qu'en observant dans le temps les immeubles situés au-dessus de la ligne, ils ont bougé de 2 à 4 mm.

Avec des instruments spécifiques, on peut trouver tous les composants qui sont dans l'atmosphère, soit dans la colonne totale intégrée entre le satellite et la Terre, soit en observant le limbe<sup>11</sup> pour scanner toutes les couches de l'atmosphère. Le principe de mesure est simple car dans l'atmosphère, qui est notre base, les gaz ont des lignes d'absorption spécifiques<sup>12</sup>,

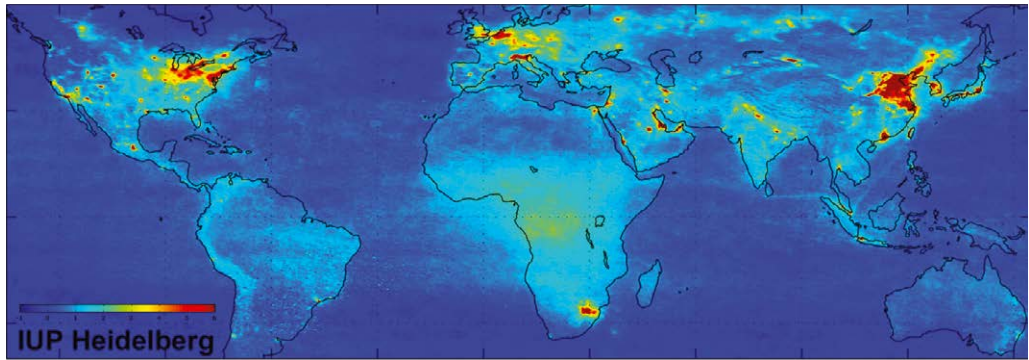
11. Limbe : bord du disque d'un astre.

12. Ligne d'absorption : correspond à l'absorption du rayonnement électromagnétique à une longueur d'onde spécifique. Le motif de ces lignes est caractéristique d'atomes ou de molécules spécifiques dans le trajet du rayonnement.

**Figure 15**

*L'Etna se déplace au fil du temps, des allers-retours d'amplitude variable précisément caractérisés par interférométrie radar, comme une respiration.*

Source : ESA.



**Figure 16**

La densité de dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) dans l'atmosphère est particulièrement forte dans les pays les plus riches tels que les États-Unis, l'Europe, ou très industrialisés comme la Chine.

Source : IUP Heidelberg.

qui sont des signatures nous permettant de les identifier facilement : on observe le spectre<sup>13</sup>, chaque ligne d'absorption et sa profondeur d'absorption caractérise ce gaz et sa densité, en fait chaque gaz est caractérisé par plusieurs lignes d'absorption spécifiques.

La densité du dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$  peut être visualisée sur la **Figure 16**, et en particulier au-dessus de la Chine (**Figure 17**)

13. Spectre d'absorption : spectre obtenu par le passage d'une onde électromagnétique (la lumière en particulier) à travers un milieu transparent ou semi-transparent, dans lequel l'absorption affaiblit, voire élimine les contributions de certaines longueurs d'onde, ce qui conduit à des raies caractéristiques.

et au-dessus de l'Europe (**Figure 18**).

On peut aussi suivre l'évolution du méthane ( $\text{CH}_4$ ) (**Figure 19**) et du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) (**Figure 20**).

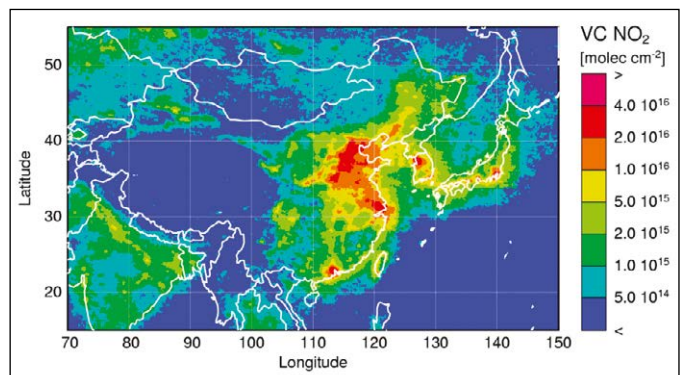
L'un des objectifs majeurs d'Envisat était d'attirer toute la communauté des utilisateurs, déjà motivés par les missions ERS1 et 2, en leur offrant des services très efficaces comme l'engagement de leur fournir des produits/mesures géophysiques trois heures après la prise des données par Envisat. On a utilisé Artemis<sup>14</sup> comme data relais,

14. Artemis<sup>14</sup> : satellite relais de télécommunications expérimental de l'Agence Spatiale Européenne conçu en collaboration avec le Japon et lancé en 2001.

**Figure 17**

La concentration en dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) au-dessus de la Chine est plus forte dans les grandes villes situées à l'Est.

Source : ESA.



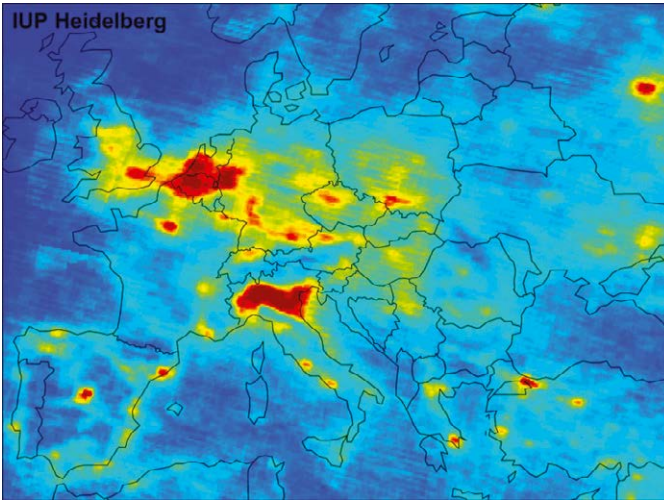


Figure 18

La concentration en dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) au-dessus de l'Europe est plus forte dans les pays côtiers de la Mer du Nord et l'Italie du Nord.

Source : ESA.

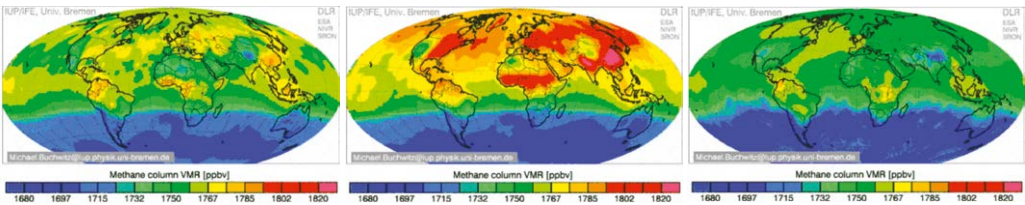
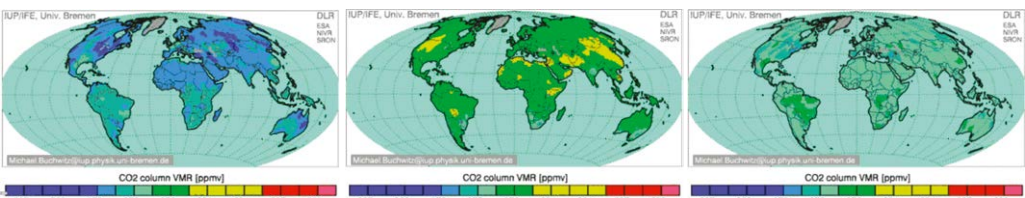


Figure 19

La quantité de méthane ( $\text{CH}_4$ ) passe chaque année par un pic de concentration pour ensuite diminuer au fil du temps.

Source : ESA.



et la station de Kiruna qui permettait de récupérer dix orbites par jour. On avait développé tout le traitement de nos informations pour fournir les produits aux utilisateurs et notamment permettre l'assimilation de nos données atmosphériques dans les modèles météo en temps réel. Cela a bien fonctionné sur les dix ans d'opération d'Envisat,

ce qui nous a apporté plus de 40 000 publications scientifiques avec cette mission : un succès mondial et inédit.

### 3.3. Le projet COPERNICUS

Après dix ans de fonctionnement d'Envisat, une énorme inquiétude portait sur la continuité de tous ces services aux utilisateurs. Cette

Figure 20

Mesure de la quantité de dioxyde de carbone. La concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère est la plus forte globalement dans l'hémisphère Nord.

Source : ESA.

continuité est enfin venue d'une volonté de l'Agence spatiale européenne combinée avec celle de la Commission Européenne, avec le fameux projet Copernicus qui a vu le jour et qui a été mené d'une main de maître.

En fait, il n'y avait pas de difficultés à produire les instruments, tout était maîtrisé, le problème était d'obtenir les fonds et de faire des satellites dédiés : il ne s'agissait pas de reproduire l'aventure d'Envisat à 8 tonnes et dix instruments. Le programme est finalement parti avec des satellites de 1 à 2 tonnes, l'Agence spatiale a mis les premiers 2 milliards d'euros pour lancer la fabrication des premiers satellites, la Commission en a mis un peu plus de 5 pour à la fois les satellites et leurs services.

En 2014-2016, deux satellites (Sentinel 1A et 1B) emportant le fameux radar à ouverture de synthèse ont été lancés, suivis de deux satellites (Sentinel 2A et 2B) embarquant de l'instrumentation optique multi-spectrale à haute résolution, notamment pour l'agriculture et d'autres domaines. Puis le Sentinel 3A,

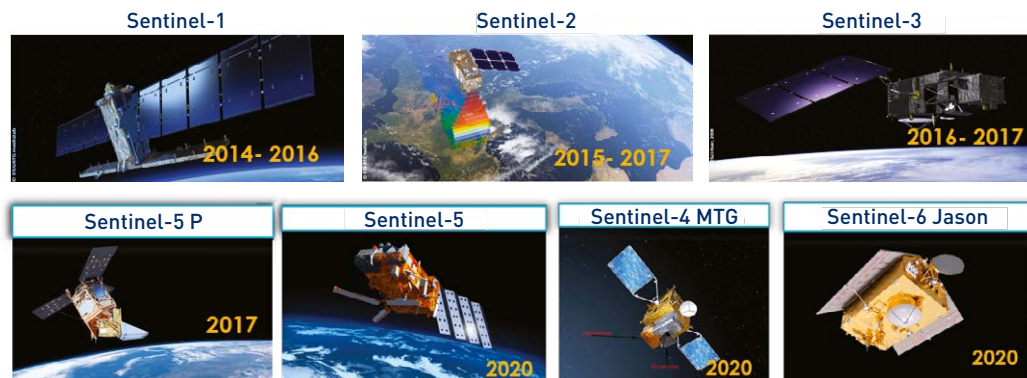
un satellite pour l'observation des océans et zones côtières avec un radar altimètre<sup>15</sup>, un instrument optique multi-spectral à 2-300 mètres de résolution et un instrument optique infrarouge pour la mesure des températures des océans. Le programme Copernicus approuvé inclut Sentinel 3B, les instrumentations de Sentinel 4 et 5 devant être embarqués sur les satellites d'EUMETSAT, MetOp et MTG (MétéoSat 3<sup>e</sup> génération) en 2020, et, pour de l'altimétrie très précise, Sentinel 6, le successeur de la mission franco-américaine Jason (**Figure 21**).

La seconde phase du programme Copernicus est en discussion entre l'ESA et la Commission Européenne. Ce qui est très important c'est l'accès gratuit aux données et aux services opérationnels fournis par des organismes qui ont été sélectionnés sur des appels d'offre, ceci pour permettre l'éclosion, le

**Figure 21**

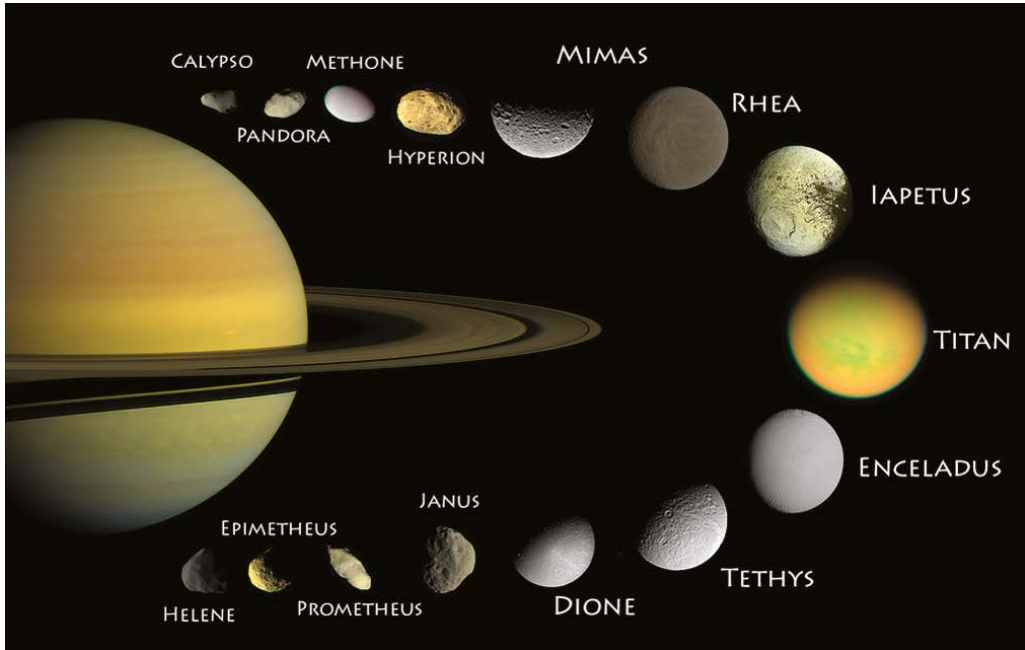
*Les différents satellites Sentinel lancés entre 2014 à 2017 et les projets de satellites de 2020, embarquant des instruments de mesures à la pointe de la technologie*

Source : ESA.



15. Radar Altimètre : instrument de mesure permettant de déterminer avec une précision centimétrique la distance verticale entre un point et la surface de référence survolée.





développement et la pérennité des nombreuses sociétés de service aux utilisateurs qui bénéficient de ce programme. Citons dans les entités fournissant un service opérationnel l'ECMWF<sup>16</sup>, qui est en fait le centre météo pour l'ensemble de l'Europe, situé à Reading (Royaume-Uni) et qui fournit des services très polyvalents : données sur l'atmosphère, les océans, les vents, etc., le tout de façon continue en prévisions et en mesures pour études climatologiques.

Les six thèmes de Copernicus sont : l'atmosphère, le milieu marin, les terres et l'agriculture, le changement climatique, les désastres (feux, inondations, tremblements de terre) et la sécurité.

16. ECMWF : Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme.

### 3.4. La mission Cassini et Huygens : cap vers Saturne et ses satellites

Partons à présent vers les missions planétaires. L'une des planètes que l'on vient d'explorer est Saturne avec la grande mission Cassini-Huygens (Figure 22). L'Europe avait décidé d'aller se poser sur un satellite très intéressant, Titan, avec son atmosphère de méthane.

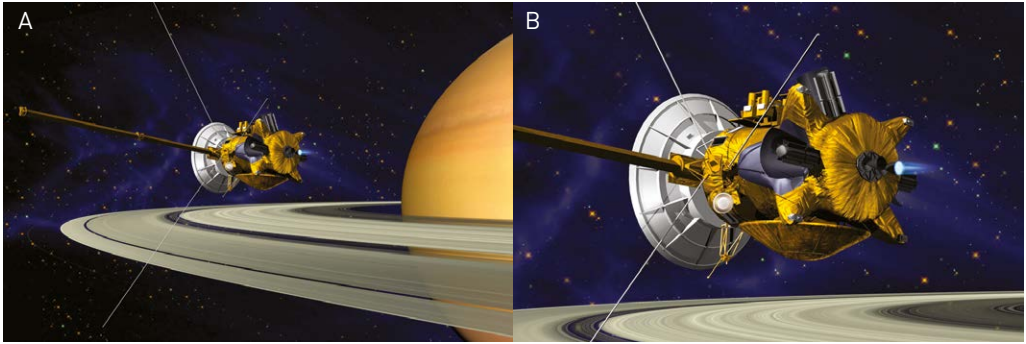
La sonde Cassini-Huygens (Figure 23A), partie en 1997, est arrivée en 2004 à proximité de Saturne : c'est long car il faut faire du billard interplanétaire pour arriver jusque Saturne, qui est à dix fois la distance Terre-Soleil (10 UA<sup>17</sup>), si bien qu'un signal venant de ce satellite de Saturne met 90 min pour nous arriver. On a donc intérêt

17. UA : unité astronomique [150 millions de kilomètres].

Figure 22

Saturne et de ses satellites ; celui auquel on s'intéresse particulièrement est Titan, avec son atmosphère de méthane.

Source : NASA/JPL.



**Figure 23**

A) La sonde Cassini-Huygens a été envoyée en direction de Saturne, équipée de réacteurs thermonucléaires (RTGs) (zoom : B).  
Source : NASA/JPL.

à tout programmer à bord. La chose très intéressante est qu'à 10 fois la distance Terre-Soleil, on ne peut plus utiliser de panneaux solaires. À cinq fois la distance Terre-Soleil, la puissance est 25 fois plus faible (inverse du carré de la distance), ce qui peut fonctionner pour des missions jusqu'à Jupiter, mais pour Saturne, la seule solution c'est d'avoir des réacteurs thermonucléaires : les fameux RTGs (**Figure 23B**).

#### 3.4.1. Les RTGs

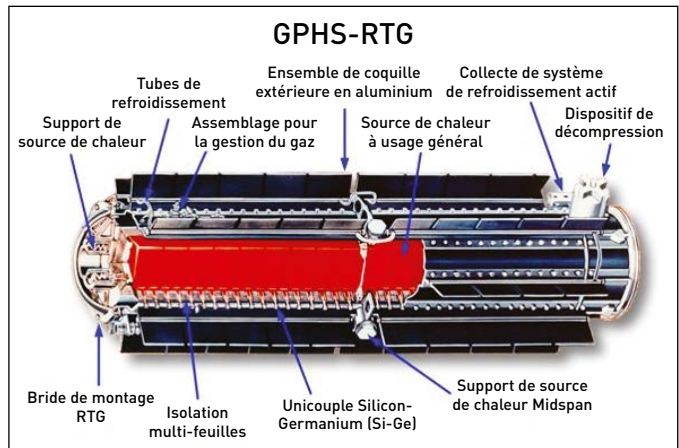
Quatre RTGs étaient embarqués, chacun délivrant 300 W de puissance électrique grâce à un processus un peu particulier : c'est une source de plutonium sous la forme de

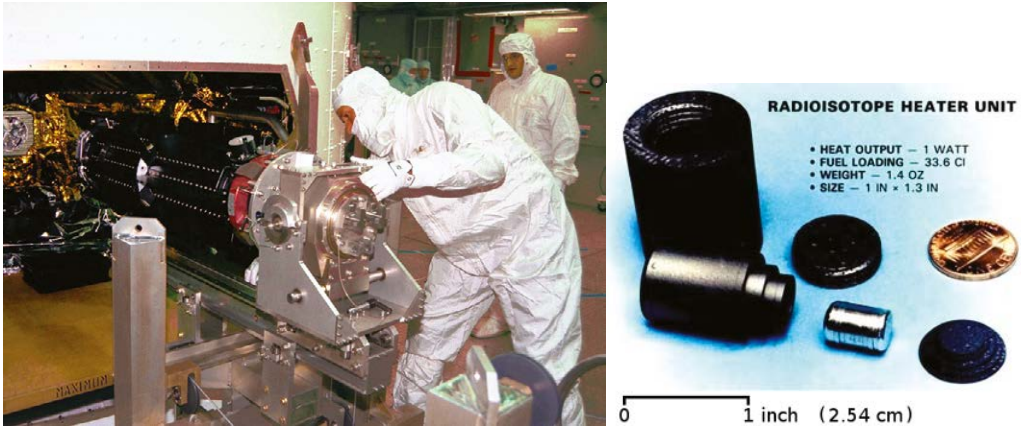
dioxyde de plutonium (partie rouge, **Figure 24**), et l'énergie est produite par des thermocouples silicium/germanium qui couplent la chaleur dégagée par le plutonium avec l'espace froid. Pour un thermocouple, le rendement est très mauvais, de l'ordre de 10 % à peine, ce qui permet tout de même d'obtenir 300 W. Cette technique a permis de réaliser plus de vingt-quatre missions aux États-Unis depuis les années 1960 pour aller très loin dans l'espace.

La NASA n'a pas le droit de manipuler ces appareillages, qui sont délicats et sont fournis par le Department of Energy (DOE), qui les intègre directement sur le satellite

**Figure 24**

L'énergie des RTGs est produite par des thermocouples silicium/germanium placés entre la source chaude et l'espace extérieur très froid ; aucune pièce n'est en mouvement.  
Source : NASA.





(Figure 25). Il existe en effet un risque de désintégration de cette partie avec retombée sur Terre durant toute la séquence de lancement, du décollage jusqu'à la mise en orbite, mais il n'y a aucun autre moyen pour réaliser des missions planétaires que d'utiliser le RTG.

D'autre part, notre satellite est dans un environnement très froid (on est à  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), on a très peu d'énergie, et le moyen efficace pour chauffer est d'embarquer des radioisotopes<sup>18</sup> tous petits qui sont chargés avec du plutonium 238 (sur Cassini, il y en avait 82 unités, sur Huygens 35). L'avantage de ces sources est qu'elles ont une très longue durée de vie : on perd 0,8 % par an, on a cinquante ans d'autonomie, c'est très robuste, et cela ne peut pas tomber en

18. Radioisotope : un radionucléide est un nucléide radioactif, c'est-à-dire qui est instable et peut donc se décomposer en émettant un rayonnement. Un radioisotope est un isotope radioactif. On appelle isotopes les nucléides partageant le même nombre de protons, mais ayant un nombre de neutrons différent.

panne : pas de pièce mécanique, tout comme pour les RTGs.

#### 3.4.2. Une difficulté : le bouclier thermique

Pour Huygens, le bouclier thermique (Figure 26A) était un élément critique. Il faut descendre dans une atmosphère qui est à dominante méthane, il y a aussi de l'argon, et différents gaz dont on ne sait pas prévoir la densité ; on émet des hypothèses à partir de ce que l'on sait et on prend des marges en conséquence. La construction du bouclier thermique a été confiée à EDS Aquitaine (Figure 26B). Les plus gros flux sont subis par le bouclier avant constitué de 200 tuiles. Réalisées avec une fibre de silice dans une matrice de résine phénolique, ces tuiles absorbent le flux thermique par abrasion, il faut donc avoir suffisamment de couches pour qu'on passe tout le freinage sans arriver à l'âme qui est derrière. Le couvercle arrière fabriqué en prosial subit des flux beaucoup moins importants.

Figure 25

Les RTGs sont fournis par le DOE (US Department of Energy). Plus de vingt missions ont volé avec des RTGs depuis 1961. Cassini emporte aussi des Radioisotope Heater units (RHUs), petites unités générant 1 W de chauffage localisé : 82 unités sur Cassini, 35 unités sur Huygens.

Source : NASA/JPL.

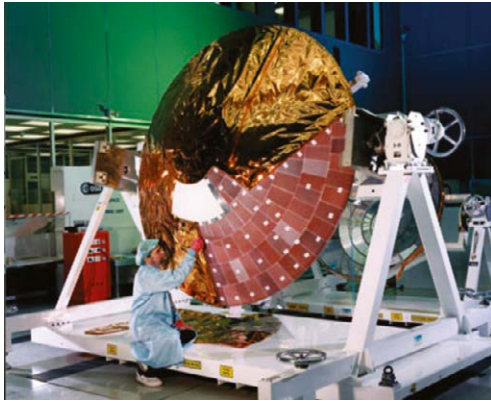
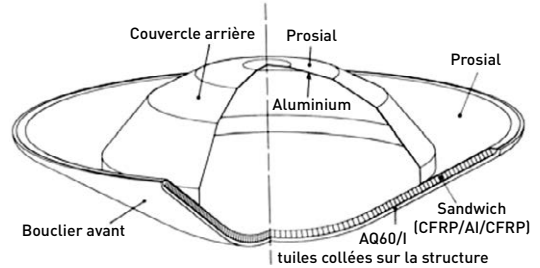


Figure 26

A) Le bouclier thermique permet de supporter le flux thermique accumulé lors de l'entrée et la descente de la sonde Huygens dans l'atmosphère de Titan, par abrasion ; B) représentation du bouclier thermique, le bouclier avant est composé de 200 tuiles de fibres de silice dans une matrice de résine phénolique qui va recevoir le plus grand flux thermique lors de l'entrée dans l'atmosphère, et le couvercle arrière composé de prosial.

Source : ESA.



De nombreux tests ont été effectués pour qualifier ce bouclier : on a  $1 \text{ MW/m}^2$  de flux thermique et une onde de choc à l'avant qui est à  $8\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le problème est qu'après avoir lancé la sonde, Cassini est passée entre-temps près de Titan, nous fournissant des données plus précises concernant son atmosphère, données qui n'étaient pas tout à fait celles qu'on avait prévues. Après correction au vu de ces nouvelles mesures, les marges prises à l'origine du design furent érodées de façon

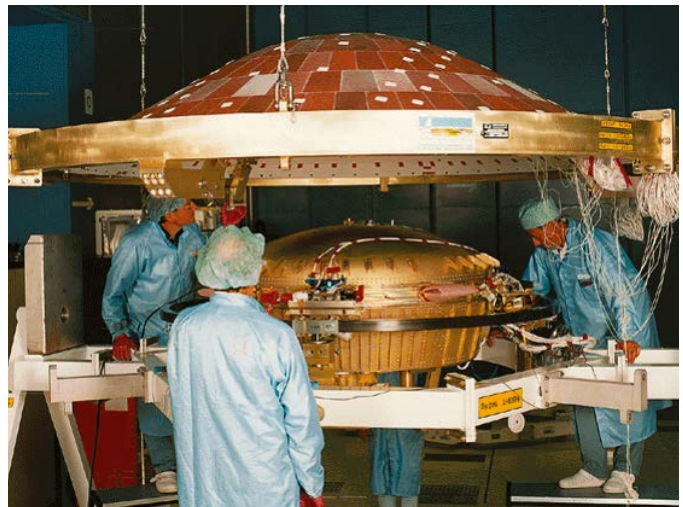
significative mais restèrent suffisamment positives pour confirmer et engager sereinement la descente.

Le bouclier avant de protection thermique mesure 2,7 mètres de diamètre (Figure 27), avec la partie intéressante qui est au centre : la charge utile avec son électronique de contrôle et les instruments. La Figure 28 montre notre plateforme avec toutes les expériences embarquées (une dizaine). On voit sur la vue éclatée (Figure 29) la partie frontale et la partie arrière qui vont s'éjecter de la charge utile au centre.

Figure 27

Le bouclier thermique au-dessus du module charge utile de la sonde Huygens contient toute l'électronique de contrôle et les instruments.

Source : ESA.





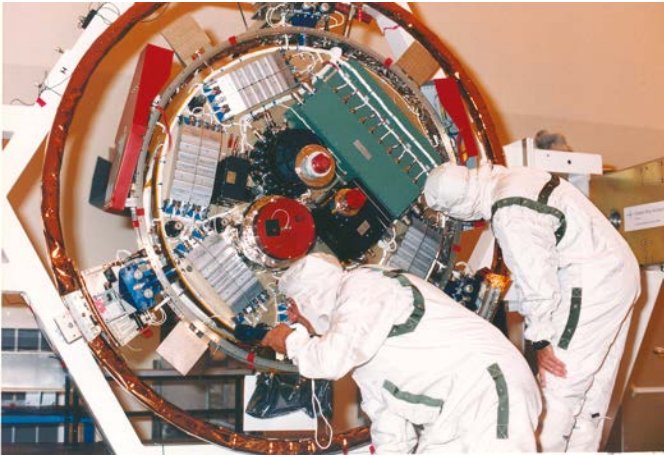


Figure 28

Vue sur la charge utile arrimée au couvercle arrière de protection.  
Source : ESA.

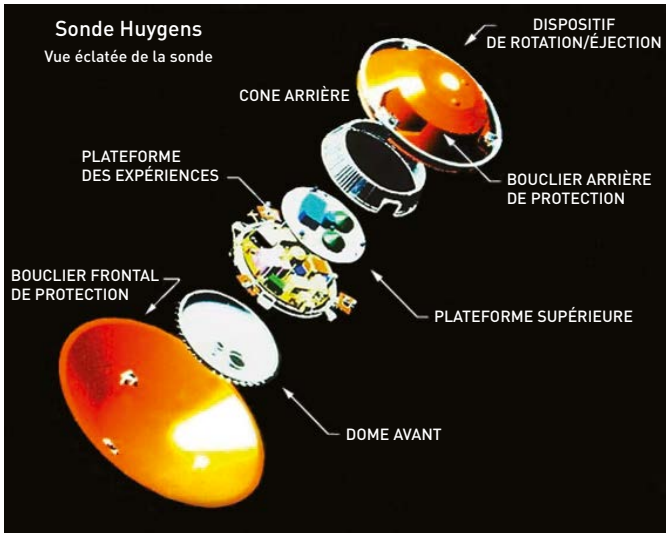
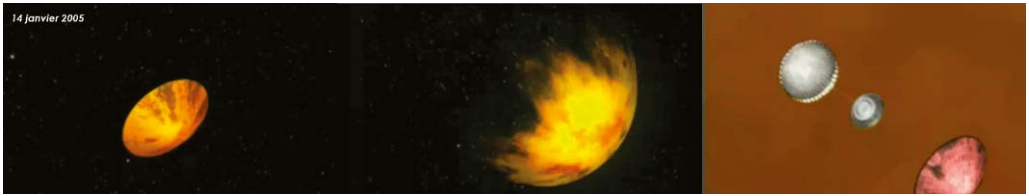


Figure 29

La plateforme charge utile de Huygens est située au centre, protégée par un bouclier à l'avant et un couvercle à l'arrière de la sonde.  
Source : ESA.

La **Figure 30** montre notre descente. On voit le brunissage des tuiles dû aux flux thermiques. On a un jeu de trois parachutes qui s'ouvrent en séquence : ouverture du premier parachute, on a encore l'intégrité de l'ensemble, puis on éjecte le bouclier avant, puis le second parachute se déploie, on est encore en réduction d'altitude, nos instruments n'opèrent pas, on se retrouve avec notre nacelle, son électronique de contrôle et ses instruments.

Puis un troisième parachute va s'ouvrir : notre radar altimètre s'est mis en route aux alentours de 20 km d'altitude comme prévu. La phase d'observation scientifique commence alors, le troisième parachute assurant de par son design la rotation régulière de la charge utile autour de l'axe de descente pour permettre une observation panoramique de l'environnement par les instruments optiques et atmosphériques. Après s'être posé, Huygens a



**Figure 30**

Lors de la descente de la sonde Huygens le 14 janvier 2005, le bouclier avant de la sonde brunit par effet thermique puis la sonde déploie ses trois parachutes pour atterrir en douceur.

Source : ESA.



**Figure 31**

A) Cette image panoramique de Titan a été réalisée par assemblage d'images prises par la sonde Huygens faisant un tour sur elle-même aux alentours de 9 km d'altitude ; B) succession de trois photos de Titan prises à 8,4 et 1 km de haut en bas. Le sol est particulièrement accidenté ; C) dernière image prise par la sonde arrivée au sol, qui est parsemé de roches.

Source : ESA.

encore fonctionné pendant près de 200 min. On avait peur de se poser sur un lac de méthane, une température de moins de 100 K tout de même, mais dans une zone relativement dure.

### 3.4.3. Les images de la descente

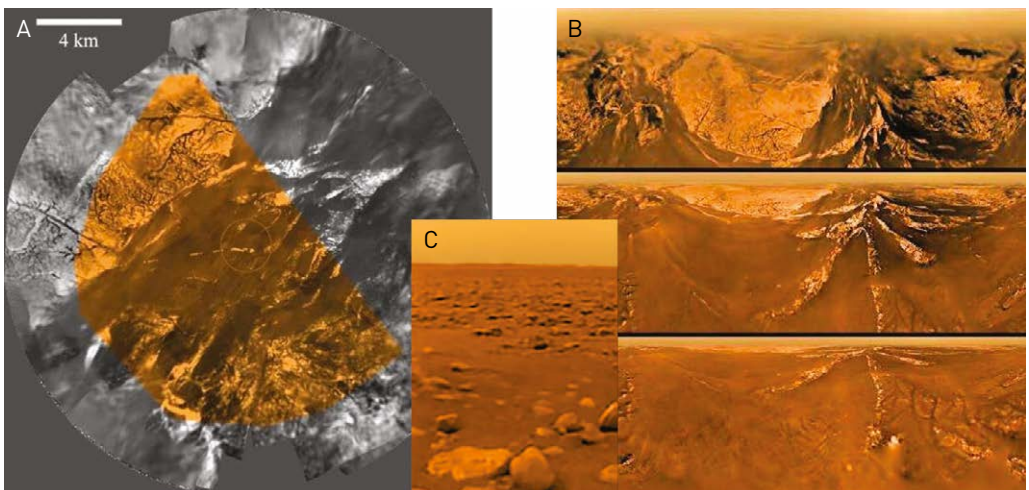
La **Figure 31A** montre une image panoramique de la descente.

### 3.5. La mission Rosetta

Rosetta est une mission de l'ESA, lancée par Ariane 5 début 2004, pour

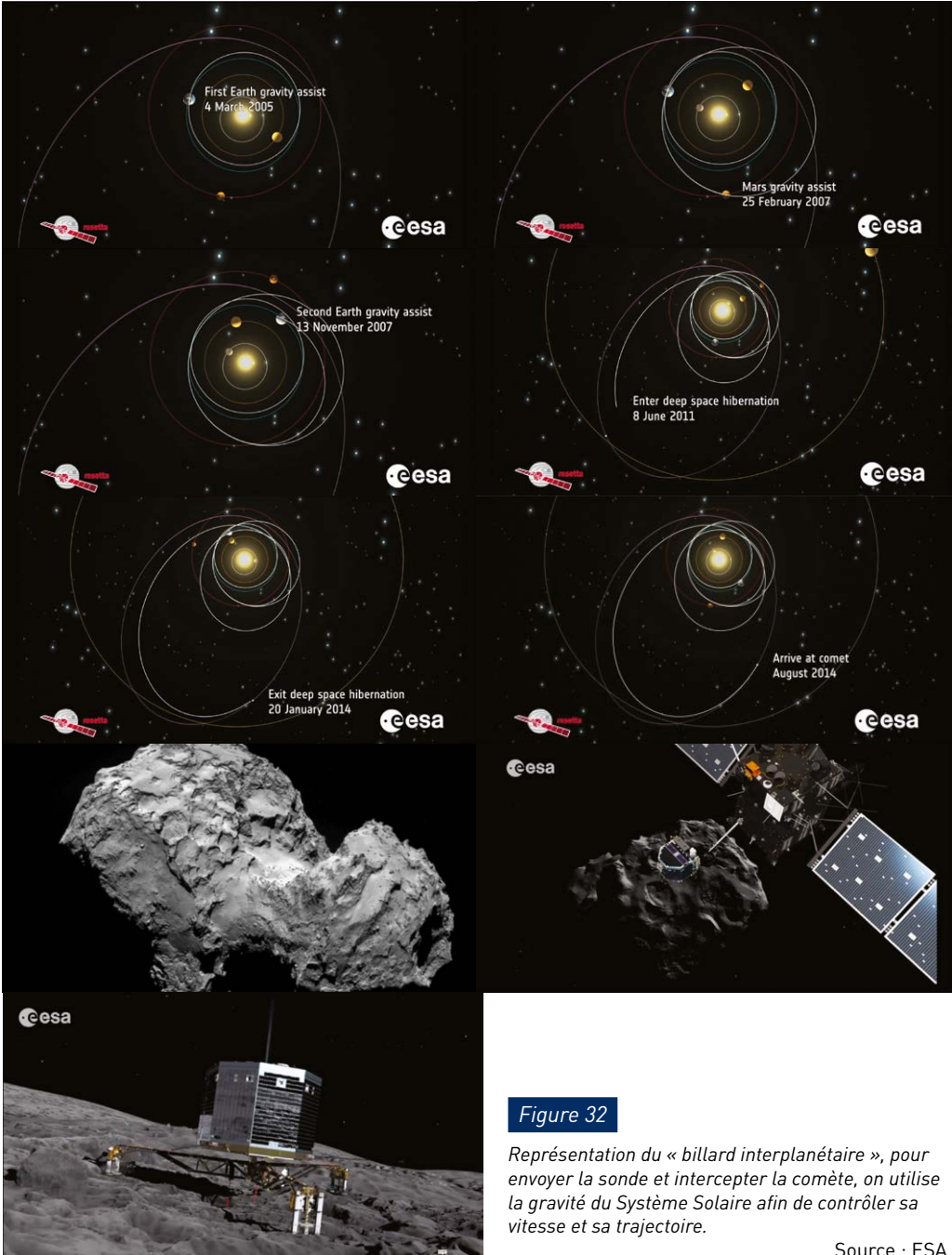
un rendez-vous avec une comète périodique du Système Solaire nommée, du nom de ses découvreurs, Tchuriyomov-Gerasimenko. Comme pour le voyage de Cassini-Huygens, il faut faire du billard interplanétaire qui prend du temps pour atteindre la comète : on lance en 2004 et l'on arrive en 2014 à proximité de la comète.

Au départ on connaît en fait très peu de la comète, les images que l'on avait étant des images à 8-9 pixels, on avait juste une idée du fait qu'elle



mesurait un peu moins de 10 km de long, mais aucune idée de sa densité, ce qui a suscité de grosses discussions : est-ce de la glace ?

Une espèce d'éponge ? On ne connaissait pas trop, alors que c'était très important, notamment pour l'atterrisseur Philae qui risquait



**Figure 32**

Représentation du « billard interplanétaire », pour envoyer la sonde et intercepter la comète, on utilise la gravité du Système Solaire afin de contrôler sa vitesse et sa trajectoire.

Source : ESA.

de rebondir à la surface et même repartir en orbite du fait de la très faible gravité et du réglage des ressorts des bras de l'atterrisseur.

Pour atteindre la comète en l'approchant par l'arrière à un peu plus de 3,5 UA (Unité Astronomique) en approche du Soleil, on a donc fait du billard avec la Terre et Mars, et on approche la comète par l'arrière (*Figure 32*).

La *Figure 33A* montre la comète telle qu'elle nous apparaît quand on l'approche. On tourne autour et on largue Philae, le fameux petit robot de 100 kg qui descend sur la comète (*Figure 33B*). Philae n'a pas de système de propulsion. La gravité d'une comète est dérisoire, ce qui implique que Rosetta orbite à la vitesse d'une bicyclette à 10 km au-dessus. On largue notre atterrisseur, avec une petite vitesse initiale pour la descente, on ne sait pas trop s'il va s'accrocher avec ses harpons ou s'il ne va pas rebondir, le risque est qu'il reparte en orbite. En fait, il est équipé de petits bras, qui, au moment de l'atterrissage, fléchissent sous le poids et la vitesse, et déclenchent des harpons qui vont essayer de s'accrocher dans la comète,

puis une rétrofusée<sup>19</sup> devait pousser en même temps, mais on savait qu'elle ne fonctionnait plus... Ce fut acrobatique car on a rebondi deux fois avant de se poser un peu de travers, un bras en l'air, ce qui va poser un problème notamment pour la recharge des panneaux solaires du fait des ombres portées par tout le relief aux alentours.

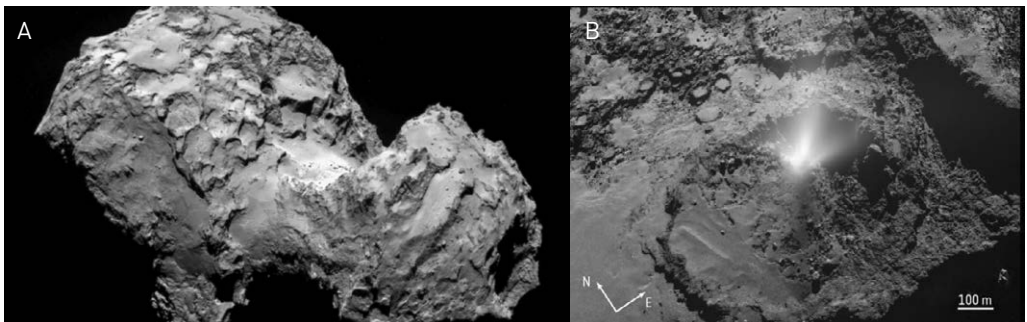
On est restés très longtemps sur cette comète : on était à 3 UA à l'arrivée ; passant à pratiquement 1 UA, la sonde orbitale Rosetta a fonctionné encore pour un an de plus, bien plus longtemps que prévu, ce qui nous a permis d'observer l'évolution de cette comète. On y a découvert de nombreuses évolutions : des failles sont apparues, des traces de gaz, des éjections de gaz. On a pu observer la queue de comète, qui correspond à l'éjection de matière quand on passe près du Soleil, on a vu que la comète était fendue, et on a pu étudier des matériaux qui nous manquaient, qui sont à l'origine du Système Solaire. Ce sont vraiment les

**Figure 33**

*A) La comète sur laquelle a été larguée Philae présente une forme très tourmentée ; l'éjection de gaz sur la comète est due à une faille apparente ; B) la découverte de gaz sur la comète a été une surprise pour la communauté scientifique.*

Source : ESA.

19. Rétrofusée : moteur de fusée utilisé pour fournir une poussée opposée au sens de mouvement d'un véhicule spatial, causant ainsi sa décélération.





ingrédients de base au tout début de la formation du Système Solaire.

Philae et Rosetta ont parfaitement rempli leur mission, fournissant une moisson de données bien au-delà de ce qui était attendu, grâce notamment à la survie bien après le passage au plus près du Soleil.

### 3.6. Les points de Lagrange pour observer la Terre et le Soleil

En 1772, l'astronome Joseph Louis Lagrange a démontré qu'il y avait un certain nombre de points d'équilibre où l'on pouvait conserver une géométrie constante par rapport à la Terre tout au long de l'année avec des points très intéressants dont certains sont stables, d'autres pseudo-stables que l'on a baptisés points de Lagrange. Les deux points les plus intéressants sont L1 et L2 (Figure 34) : L1 et L2 sont à 1,5 millions de kilomètres de la Terre, L1 situé entre le Soleil et la Terre, L2 à l'opposé, ce qui nous permet

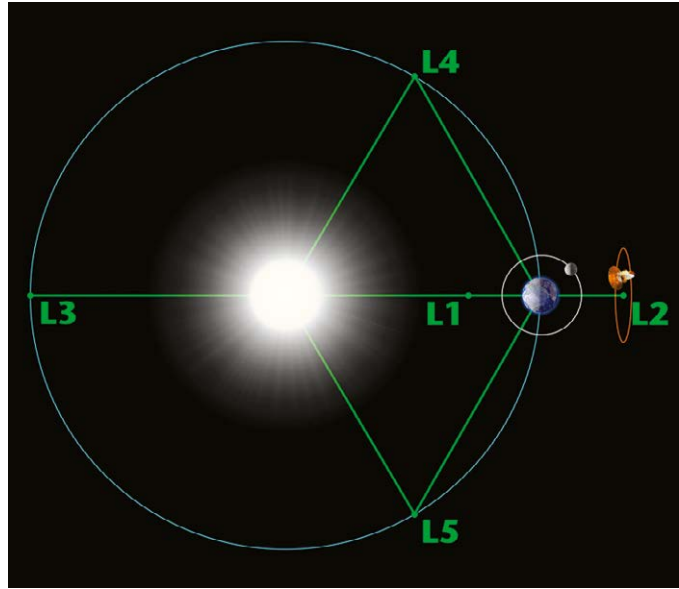


Figure 34

Les points de Lagrange (décrits par Joseph Louis Lagrange en 1772), numérotés de L1 à L5, sont des points remarquables en astronomie. Situés à 1,5 millions de kilomètres de la Terre, L1 et L2 sont les points les plus intéressants : L1 pour observer le Soleil et L2 pour observer l'Univers.

d'avoir des communications permanentes avec la Terre tout en regardant l'Univers froid.

Pour observer le Soleil en continu, on se met en L1 (Figure 35) et on fait de la météo solaire. L'étude de l'activité solaire est très importante car elle a des impacts dans de nombreux domaines d'activités sur Terre : impact

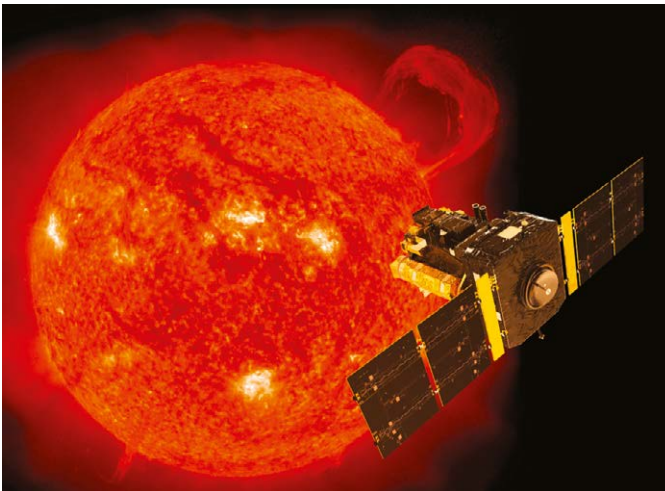


Figure 35

Le point L1 permet d'étudier la météo solaire, très importante pour l'explication de nombreux phénomènes, notamment terrestres. Ici le satellite SOHO de l'ESA, exploité en collaboration avec la NASA depuis plus de vingt ans déjà.

Source : ESA.

sur les télécommunications, radiations, le climat, etc.

L2 est ce que les anglais appellent un « vintage point », c'est le point idéal pour observer l'Univers. On peut citer quatre grandes missions spatiales (**Figures 36**), dont trois émanent de l'Agence Spatiale Européenne, qui ont choisi L2 comme point d'observation : les deux missions d'astronomie spatiale Herschel et Planck lancées en 2009 ; Gaïa lancé en 2013 pour l'observation des étoiles (cartographie de plus d'un milliard et demi d'étoiles) ; JWST, prévu pour un lancement en 2020 par Ariane 5, est le futur grand observatoire spatial qui va succéder à Hubble. JWST est une mission sous leadership de la NASA, en coopération avec l'ESA qui fournit deux des quatre instruments de cette mission, et l'agence spatiale canadienne qui fournit le quatrième instrument.

### Les télescopes Herschel et Gaïa

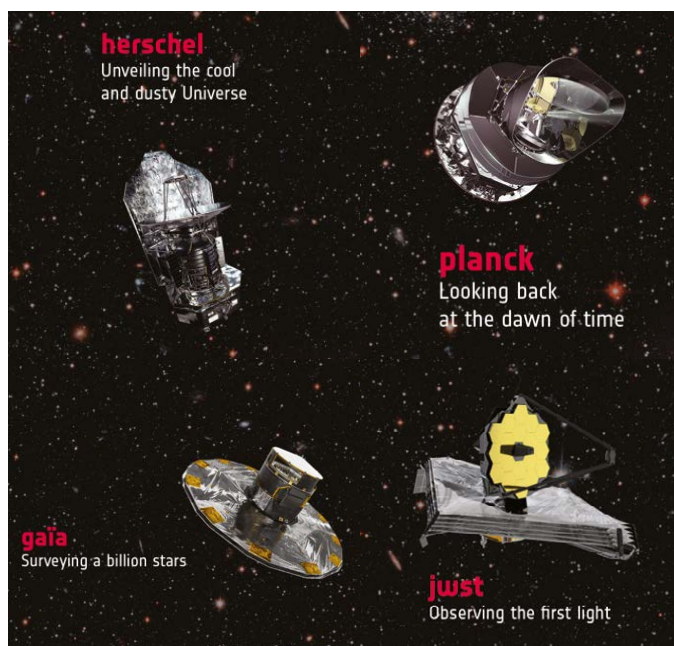
Le télescope d'Herschel mesure 3,50 m ; il a été construit en silicium carbide, une technologie française révolutionnaire qui a été développée par Boostec à Pau, sous contrôle d'Airbus Toulouse. Pour réaliser ce télescope, on réalise douze pétales (**Figure 37**), on les soude, on métallise, puis on polit le miroir (**Figure 38**). On a obtenu une précision de surface de polissage de 3 microns pour environ 1 mm d'épaisseur de la métallisation. Cette précision était nécessaire pour remplir les exigences de performance du télescope (**Figure 39**).

Avec le silicium carbide, le gain de poids est considérable, 300 kg pour le télescope d'Herschel contre près de 1500 kg pour une technologie traditionnelle comme celle utilisée pour le miroir d'Hubble. La rigidité

**Figures 36**

Les télescopes Herschel, Planck, Gaïa et JWST, qui sont/seront utilisés pour observer l'univers depuis le point de Lagrange L2. Chaque télescope a son rôle particulier.

Source : ESA.

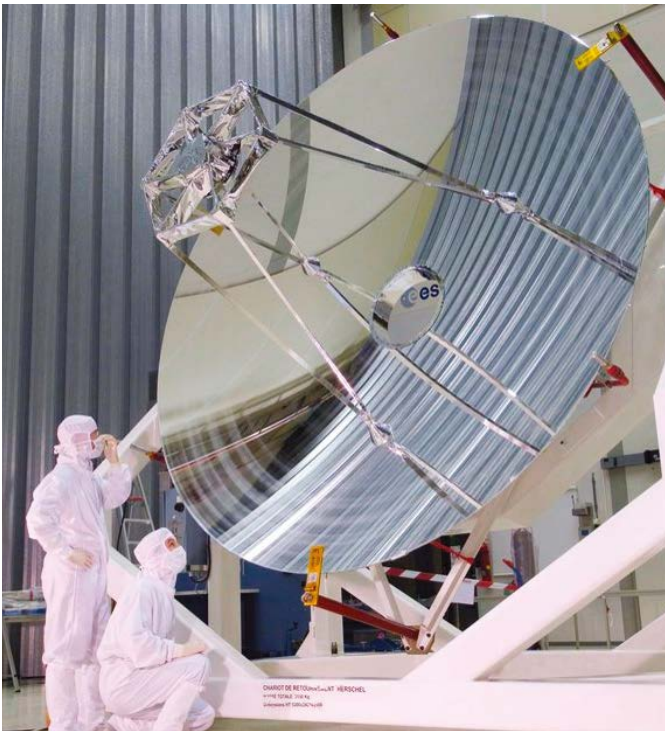




**Figures 37**

Le télescope Herschel est constitué de douze pétales qui sont fabriqués en silicium carbide par Boostec sous l'égide d'Airbus Toulouse.

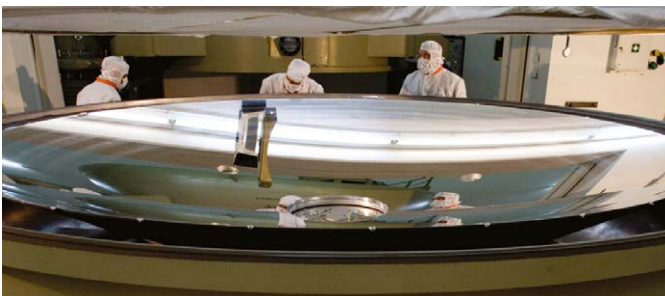
Source : ESA/Airbus/ Boostec.



**Figure 38**

Le télescope Herschel finalisé, après assemblage des douze pétales, métallisation et polissage de surface.

Source : ESA.



**Figure 39**

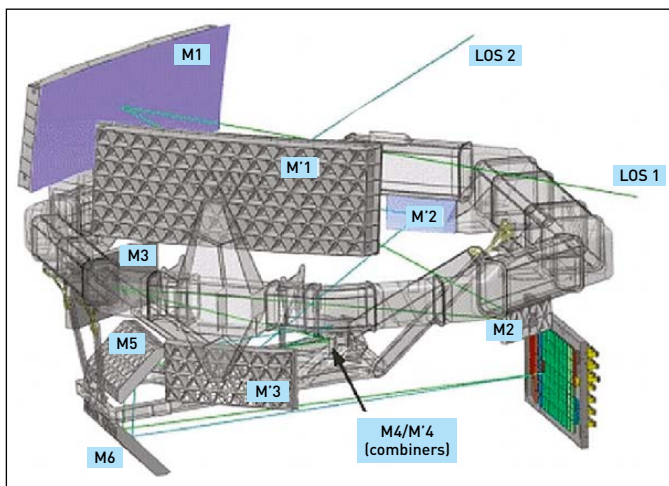
On constitue une couche de métal d'environ 1 mm d'épaisseur et on polit la surface avec une précision de 3 microns, nécessaires pour assurer les performances des instruments embarqués.

Source : ESA.

**Figure 40**

Le tore du télescope Gaïa, fabriqué en silicium carbide, mesure plus de 3 m.

Source : Airbus.



est remarquable et le coefficient d'expansion très faible permettant son utilisation et la prédiction précise de ses performances aux températures d'opération dans l'espace de l'ordre de 80 Kelvin.

Gaïa a également été conçue en silicium carbide avec un tore faisant plus de 3 mètres de diamètre (**Figure 40**) et deux miroirs d'environ 1,50 m de long par plus de 50 cm de large (**Figure 41**).

#### 4 L'observation et la chimie

Illustrons l'observation de la chimie de l'espace

avec une image obtenue à 6 000 années-lumière grâce au télescope Herschel, où l'on voit des nuages moléculaires (**Figure 42**). On observe des filaments qui correspondent à la formation d'étoiles : une véritable nurserie d'étoiles ! De tels systèmes, avec des naissances et des morts d'étoiles qui sont des processus courts, sur mille ans environ, présentent un grand intérêt pour les astronomes qui peuvent ainsi les observer durant cette phase dynamique, par opposition avec la partie stable de la vie d'une étoile, qui dure de l'ordre de 10 milliards d'années et

**Figures 41**

Les grands miroirs de Gaïa doivent avoir une précision de finition de surface de 10 nm, ce qui est encore plus exigeant que pour le télescope Herschel. Cette précision est directement en rapport avec les longueurs d'ondes d'opération des instruments : sur la mission Herschel on observe dans des longueurs d'ondes submillimétriques alors que sur Gaïa on observe dans le spectre visible.

Source : ESA/Airbus.







présente donc peu d'intérêt du fait de sa stabilité à long terme.

### Le télescope spatial JWST

Le nouveau télescope spatial JWST (**Figure 43**) est le plus gros projet scientifique de la NASA ; ce projet spatial a déjà coûté plus de 9 milliards de dollars à la NASA pour plus de quinze ans de développement. C'est le successeur du télescope spatial Hubble avec des performances bien supérieures à celles de son prédécesseur, complémentaire des meilleurs télescopes terrestres jusqu'à 2,5 microns et bien

supérieur à tous aux plus grandes longueurs d'onde.

JWST embarque trois instruments principaux dans le plan focal (deux fournis par l'Europe et le troisième par les américains) et une caméra secondaire fournie par le Canada.

La vue d'artiste sur la **Figure 43** montre la composition du satellite avec, sous le grand écran solaire (constitué d'une isolation thermique multicouche de la taille d'un terrain de tennis une fois déployé), la plateforme de servitude regardant vers la Terre et le Soleil, incluant les panneaux solaires et l'antenne de télécommunication pour relayer

**Figure 42**

*Le nuage moléculaire pris par le télescope Herschel révèle la présence d'une nurserie d'étoiles, ce qui est extrêmement intéressant pour les scientifiques de par sa dynamique.*

Source : ESA.



**Figure 43**

*Vue d'artiste du satellite JWST avec, sous le bouclier thermique solaire, le module de service tourné vers la Terre et le Soleil et au-dessus, regardant vers l'espace froid, le télescope et, derrière, la tour supportant le télescope et abritant toute l'instrumentation.*

Source : NASA/GSFC.

**Figure 44**

*Le miroir primaire du télescope de JWST, 6,5 mètres de diamètre, est composé de dix-huit miroirs en béryllium qui peuvent être contrôlés/orientés individuellement en orbite pour assurer la parfaite focalisation du télescope.*

Source : NASA/Desiree Stover.



les données d'observation du télescope. Protégés du Soleil par l'écran solaire, on aperçoit le télescope de 6,5 mètres de diamètre, constitué de 18 miroirs, et, derrière, la tour contenant toute l'instrumentation optique avec certains détecteurs refroidis jusqu'à 7 Kelvin par un compresseur cryogénique à l'hélium pour assurer leurs performances notamment dans l'infrarouge moyen.

Ce télescope est composé de dix-huit miroirs (**Figure 44**) qui sont contrôlables dans les six dimensions,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\rho$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  : la focalisation du télescope est totalement contrôlable.

Rendez-vous au printemps 2020 pour le lancement de ce joyau de l'astronomie spatiale qui sera lancé depuis Kourou par Ariane 5, une victoire de l'Europe chèrement acquise auprès des autorités américaines !

## **L'aventure spatiale, une belle synergie entre le spatial et la chimie !**

Comme nous avons pu le constater à travers ces exemples, la chimie est partout dans l'activité spatiale, aussi bien dans l'accès à l'espace par la propulsion des lanceurs, la fabrication des satellites et des sondes spatiales que dans l'observation et la compréhension de la chimie de l'atmosphère de la Terre, les mécanismes chimiques en œuvre dans le Système Solaire et dans l'Univers. Une très belle histoire de synergie entre la chimie et le spatial qui ne peut que se perpétuer pour leur bénéfice mutuel.