n°2b
janvier
2004

Les cahiers de l'espace

Une production de la Direction de la Communication externe, de l'Éducation et des Affaires publiques, service Culture spatiale

Comètes
un rêve plus loin!
De Rosetta à nos origines

L'ECOLE DE L'ESPACE

Les Cahiers de l'espace

Le CNES au service des jeunes

La passion de l'espace se déclenche généralement très tôt et se cultive tout au long d'une vie. C'est pourquoi le CNES (Centre national d'études spatiales), à travers le département Education-Jeunesse, est un interlocuteur privilégié des jeunes et des éducateurs depuis 40 ans. Le champ de connaissances offert par la pratique de l'espace est très large, de la fabrication d'une fusée à eau à l'expérimentation scientifique dans l'espace en passant par l'océanographie à l'école ou la fabrication d'une nacelle de ballon stratosphérique. Du cycle 3 au lycée, le CNES propose des supports de pratique adaptés au cadre scolaire, favorisant l'approche expérimentale et l'apprentissage du travail en équipe. Tous les enseignants (de l'école au lycée) ont accès à diverses formations aux techniques spatiales et à l'utilisation des outils expérimentaux qui offrent de nombreuses possibilités d'expérimentation et de découverte de l'espace.

L'Ecole de l'espace : *les Mercredis de l'information*

Depuis mai 1999, le département Education-Jeunesse du CNES propose un cycle de conférences sur les thèmes spatiaux. Ces conférences sont principalement destinées aux enseignants (primaire, secondaire ou supérieur) mais sont ouvertes à tous les acteurs de la communauté éducative. Cette opération est aujourd'hui conduite en partenariat avec Météo-France et en collaboration avec l'Académie de Toulouse et la Cité de l'espace. L'objectif de ces conférences est d'apporter aux participants une information fiable et accessible sur des sujets scientifiques et techniques d'actualité. Les intervenants sont des chercheurs ou des ingénieurs directement impliqués dans les thèmes traités.
Les présentations sont très visuelles et laissent une place aux questions de l'auditoire. Aucune connaissance scientifique particulière n'est requise. Un dossier documentaire est remis sur place à chaque participant. Ces conférences ont lieu le mercredi après-midi, plusieurs fois par an.

Les Cahiers de l'espace

Réalisés à l'issue de chaque session (à compter de la 9e session), les *Cahiers de l'espace* sont des documents de référence sur les sujets abordés par l'*Ecole de l'espace.* Ils sont écrits sur la base des conférences, largement illustrés et accompagnés de références bibliographiques et Internet. Chaque *Cahier de l'espace* complète donc idéalement le dossier documentaire distribué en fin de session. Les *Cahiers* sont diffusés à tous les participants dans un délai de quelques mois après la conférence dont il font la synthèse. Ils sont également disponibles en téléchargement sur le site éducatif du CNES. N'hésitez pas à nous contacter pour compléter votre collection de *Cahiers de l'espace* !

Déjà paru :
N°1 : Ailleurs... La vie ! Possible ou probable ? (Septembre 2002)
N°2 : Comètes, un rêve plus loin (Janvier 2003)
N°3 : Spot 5 et Météosat : des yeux en orbite (Février 2003)
N°4 : Quitter la Terre demain :
lanceurs et propulsions du futur (Octobre 2003)

Document écrit par Sébastien Rouquette,
sur la base des conférences
des *Mercredis de l'information*.
Maquette :Atmosphère.
Document édité au service édition
du CNES, Toulouse.

**Une production de la Direction
de la Communication externe,
de l'Éducation et des Affaires Publiques,
département Education-Jeunesse,
Cnes, 18, av Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9.
www.cnes-edu.org**
**Contacts mission Rosetta :
Denis Moura, chef de projet Rosetta, Direction des systèmes orbitaux, CNES, denis.moura@cnes.fr
Francis Rocard, responsable de programme, Direction des programmes, CNES, francis.rocard@cnes.fr
Jean-Pierre Bibring, responsable scientifique, Institut d'Astrophysique Spatiale, bibring@ias.fr
Philippe Chauvin, Direction du Département Sciences de l'Univers : chauvin@mesiog.obspm.fr**

Image de couverture : Hale-Bopp au-dessus du halo lumineux de Toulouse. Crédits CNES, photo S. Rouquette.

Cahier numéro 2b réédition du n°2 janvier 2003

Comètes : un rêve plus loin ! De Rosetta à nos origines

Introduction

Depuis l'avènement de l'ère spatiale, l'astronome et l'astrophysicien peuvent ne plus se contenter d'observer le ciel avec des instruments (parfois très puissants) installés sur Terre, mais à de très grandes distances des objets qu'ils étudient. Ils peuvent dorénavant envoyer des instruments ou des expériences très variés au voisinage des astres qui nous fascinent.

Nous pouvons même faire le constat suivant : pour que notre connaissance progresse encore, l'exploration du système solaire doit se poursuivre et faire preuve d'encore plus d'ambition et d'audace.

L'étude du système solaire, de sa formation et de son évolution, est une vaste tâche. Les processus qui ont amené à la formation de la Terre et à l'apparition de la vie sont encore obscurs et les théories actuelles sont souvent malmenées. Les spécialistes pensaient par exemple détenir une partie de la solution grâce à l'étude des autres planètes, rendue possible par l'envoi de sondes automatiques dès la fin des années 70. Mais c'était sans compter sur les dernières révélations faites par un groupe de chercheurs qui ont découverts d'autres systèmes stellaires, fondamentalement différents du nôtre, et qui sèment le trouble sur les scenarii de formation en vigueur (voir Cahier de l'espace numéro 1, «Ailleurs la vie... Possible ou probable ?»).

Nous ne possédons donc pas toutes les réponses à ces questions essentielles et pour fonder des hypothèses plus solides, il est nécessaire de remonter le temps et de chercher les premières pierres qui ont servi à l'élaboration de notre monde. Chose difficile si l'on considère que les planètes du système solaire ont été profondément modifiées au cours de leurs 4,5 milliards d'années de vie.

On sait aujourd'hui que les comètes portent le secret d'une partie de l'histoire du système solaire. Formées il y a 4,5 milliards d'années, elles sont considérées comme des reliquats de la matière primitive à partir de laquelle s'est formé le système solaire. Les comètes sont en quelques sorte une pierre de Rosette de l'histoire commune des planètes et du Soleil.

L'Europe a donc décidé d'envoyer une sonde enquêter sur les traces de la **nébuleuse primitive** qui a donné naissance au Soleil et à son cortège de planètes. Rosetta est une mission de rendez-vous entre une sonde spatiale et une comète. Après le report du lancement, en raison de l'échec d'Ariane 5 ESC-A survenu le 11 décembre 2002, une nouvelle comète a été choisie pour objectif : Churyumov-Gerasimenko (67P/C-G). Rosetta sera lancée entre le 26 février et le 17 mars par un lanceur Ariane 5 et rencontrera 67P/C-G dix ans plus tard. Son objectif est doublement ambitieux, sur le plan technique et scientifique. Jamais une telle rencontre n'a eu lieu. Pour la première fois dans l'histoire, une sonde se mettra en orbite autour d'une comète et qui plus est, larguera un atterrisseur à sa surface pour en étudier la structure et la composition. Le sol d'un noyau cométaire sera enfin dévoilé et peut être avec lui, une partie des secrets que détiennent les comètes.

Et pourquoi ne pas rêver qu'un jour, à défaut de pouvoir y poser un véhicule habité, nous ramènerons des échantillons de comète sur Terre, comme il y a 30 ans, nous avons ramené quelques pierres de Lune.

Sommaire

Comètes... le système solaire au congélateur !.....**p.4 à 11**
D'après la conférence
d'Annie-Chantal Levasseur-Regourd
(Université Paris VI et Service d'Aéronomie du CNRS)
Historique de la compréhension des comètes.
Bilan des études : de Halley à nos jours.
Les futures missions spatiales :
Stardust, Deep Impact, Rosetta etc.

Rosetta... un rêve plus loin !.....**p.12 à 22**
D'après la conférence de Denis Mouras (CNES)
La mission Rosetta : contexte, objectifs, trajectoire,
engins spatiaux, instrumentation et rôle du CNES.

Comètes... le système solaire au congélateur !

Rares et spectaculaires, les comètes terrorisaient périodiquement les terriens et intriguent toujours lors de leur passage dans le ciel. Pourtant, que d'inconnues sur nos origines peuvent être levées lorsqu'on se donne la peine de les étudier. Annie-Chantal Levasseur-Regourd nous éclaire sur cette discipline à la recherche des origines.

La comète Hale-Bopp lors de son passage en 1997.

Les étoiles, les galaxies couvrent notre ciel nocturne. Mais le passant qui lève parfois les yeux au ciel semble moins les connaître que les astres majestueux et rares que sont les comètes. Logées aux confins du système solaire, où la lumière de notre étoile ne réussit pas à créer la moindre chaleur, certaines nous visitent périodiquement et disséminent leur matière le long de fabuleuses chevelures.

Des comètes... à Rosetta

Dans l'histoire des peuples, les comètes étaient (et sont parfois encore) craintes comme la foudre et annonciatrices de plaies et de malheurs. Dans toutes les civilisations on retrouve des légendes ou des récits liés au passage dans le ciel de ces astres chevelus (traduction littérale du grec Komêtês). Si les comètes ont été des compagnons éphémères de la Terre depuis la nuit des temps, les toutes premières traces attestées de leur passage au voisinage de notre planète pourraient être anciennes de près de 2500 ans et correspondraient à la première apparition de la comète de Halley. Le dessin le plus ancien pourrait être celui retrouvé dans un livre de soie datant du 4e siècle avant notre ère. A noter encore, le passage de la comète de Halley en 1066, à qui fut attribuée la défaite de Harold face aux normands lors de la bataille de Hastings, comme en témoigne la tapisserie de Bayeux (image 1.1). Dans le tableau «L'adoration des mages» peint par Giotto entre 1302 et 1305, c'est probablement encore la comète de Halley qui servit de modèle. Cette référence à l'ancien testament est l'une des rares évocations positives du passage d'une comète (image 1.2).

Image 11 - Extrait de la tapisserie de Bayeux sur laquelle apparaît la comète de Halley. Crédits Musée de la Tapisserie de Bayeux.

De tout temps également, ces astres fugaces ont malmené les astronomes, qui ont eu les pires difficultés à les décrire et à les présenter au monde comme de banals objets célestes, sans connotation prophétique ou apocalyptique. L'ignorance générale leur ayant valu par exemple d'être excommuniées par le pape Calixte III en 1456.

Les astronomes babyloniens et chinois étudiaient les comètes... essentiellement à des fins de prédictions astrales. Il faut d'ailleurs préciser qu'à cette époque, l'astrologie était «le nerf de la guerre» de l'astronomie (Sic !). En 1910, lors d'un passage assez populaire de la comète de Halley (toujours elle), des milliers de

citoyens, curieux ou inquiets, se pressèrent aux conférences données en l'occasion par l'éminent astronome Camille Flammarion. Les spécialistes avaient alors déjà percé quelques-uns uns des nombreux mystères entourant les comètes. Il était établi que ces astres ne supportent aucune comparaison avec les planètes. Peu denses, circulant sur des orbites très allongées et provenant des confins du système solaire, certains reviennent périodiquement à proximité de l'astre solaire. A la fin des années 70 les comètes étaient considérées comme des «boules de neige sale», constituées en grande partie d'eau, riches en composés carbonés et conservées au froid, à grande distance du Soleil. Les astronomes ne pouvaient pas en dire beaucoup plus quant aux caractéristiques de leur noyau, que se soit leur forme ou leur composition.
C'est avec l'avènement de l'exploration spatiale que le voile s'est en partie levé. Malgré leur petit nombre (moins de 10), les missions spatiales ont été déterminantes

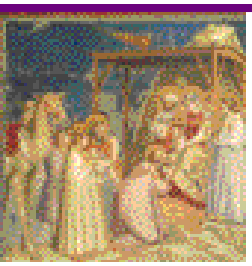


Image 1.2 - L'adoration des mages, peinte par Giotto entre 1302 et 1305. Crédits ESA, 1998.

pour l'étude «moderne» des comètes. En 1986, après les sondes soviétiques VEGA, la sonde européenne Giotto (image 1.3) révèle la première image du noyau de la comète de Halley (décidément !). Ces clichés époustouflants réalisés au cours d'un bref survol à moins de 600 km (la sonde et la comète se sont croisées à 250 000 km/h) montrent un noyau solide sur lequel existent des zones de dégazage, sortes de geysers de gaz et de poussières (image1.4).

Des poussières, de la glace... La vie ?

D'où viennent les comètes, si elles ne sont pas des manifestations divines annonciatrices de cataclysmes et diffusant des gaz toxiques ? Combien sont-elles ?
A son origine (il y a 4,6 milliards d'années), la nébuleuse protosolaire était majoritairement constituée d'hydrogène, d'hélium, de glaces (volatiles) et de **silicates** (matériaux réfractaires). Lorsque notre protoétoile, le Soleil, s'allume sous l'effet d'une condensation et d'un chauffage de la nébuleuse, les composés volatils ne résistent pas aux conditions de température qui règnent au centre du vaste nuage (environ 15 milliards de kilomètres de diamètre). La température y est d'autant plus forte que la distance au Soleil diminue. Les éléments composant la nébuleuse (H, He, C, N, O) s'associent en molécules. Sous forme gazeuse à proximité du Soleil, elles sont à l'état de glace à grande distance (eau -H_2O-, méthane -CH_4-, ammoniac -NH_3-, dioxyde de carbone -CO_2-...). A moins de 450 millions de kilomètres, seuls les silicates et les métaux se trouvent à l'état solide. Ils donneront naissance aux planètes telluriques. A plus grande distance, les éléments légers contribuent à la formation de planètes peu denses et volumineuses. Ce n'est qu'à la périphérie de ce système, à plus de 10 unités astronomiques du Soleil (l'unité astronomique ou «ua» est définie comme la distance moyenne Terre-Soleil), qu'ont pu subsister glaces et poussières formées à l'origine du système solaire (voir encadré «distances moyennes au Soleil...»). Elles se sont peu à peu agrégées en cométésimales de quelques dizaines de mètres, puis en noyaux de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Au-delà de 100 ua, la concentration de matière n'était pas suffisante pour permettre l'agglomération de noyaux cométaires. Depuis cette époque,

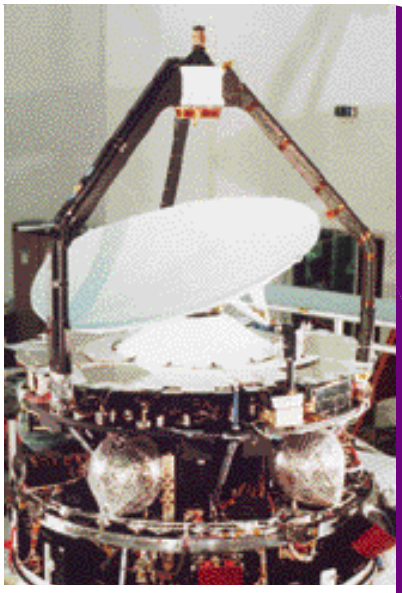
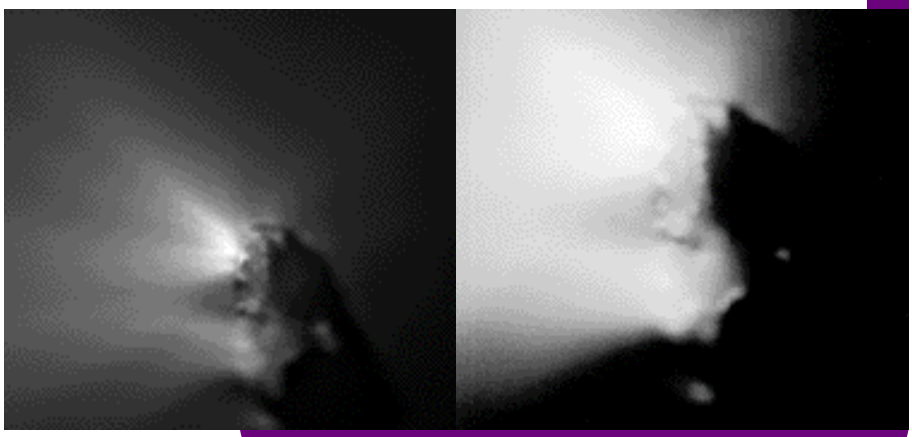


Image 1.3 - La sonde Giotto en cours d'intégration. Crédits ESA, 2000.

les comètes sont restées figées, conservant la mémoire des premiers instants du système solaire.
Il existe deux grands réservoirs de comètes (image 1.5). Les noyaux formés entre 30 et 100 ua constituent le premier d'entre eux : la «Ceinture de Kuiper», du nom de celui qui en a proposé l'idée dans les années 50. Il dessine un anneau dans le plan de l'écliptique (le plan orbital de la Terre), à une distance du Soleil de 30 à 100 ua. Il pourrait contenir plusieurs millions d'objets de diamètre variable, parfois supérieur à 10 km. Les noyaux formés entre 10 et 30 ua ont été fortement per-

Image 1.4 - Une image du noyau de la comète de Halley réalisée par la sonde Giotto en 1986. Crédits ESA, 2001



Distance moyenne du soleil à...

Mercure : 0,4 ua
Vénus : 0,7 ua
La Terre : 1 ua ou 150 millions de kilomètres
Mars : 1,5 ua
Ceinture d'astéroïdes :2-3 ua
Jupiter : 5,2 ua
Saturne : 9,6 ua
Uranus : 19,2 ua
Neptune : 30,1 ua
Pluton :39,4 ua
Ceinture de Kuiper : de 30 à 100 ua
Nuage de Oort : de 20 000 à 100 000 ua

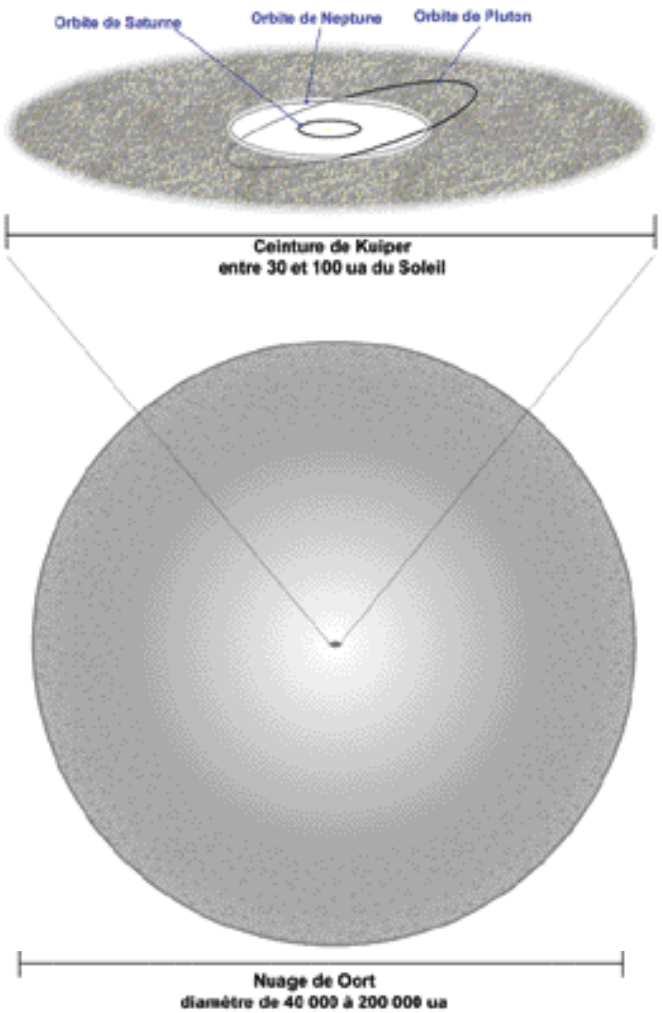


Image 1.5 - Les deux grands réservoirs de comètes.
La «Ceinture de Kuiper» dessine un anneau dans le plan de l'écliptique entre 30 et 100 ua. Le «nuage de Oort» forme une coquille entre 20 000 et 100 000 ua.
Crédits CNES, illustration S. Rouquette.

turbés, en particulier par la présence des planètes géantes. Certains ont été éjectés aux confins du système solaire, à plus de 20 000 ua (d'après l'estimation des distances à l'aphélie de certaines comètes), pour constituer le second réservoir de comètes, une gigantesque coquille sphérique appelée «nuage de Oort» (Oort était le premier astronome à en suggérer l'existence). Ce ne sont pas moins de 10 milliards de noyaux cométaires qui pourraient s'y cacher. Ceux-ci sont trop petits pour être détectables directement. Ce réservoir est «estimé» seulement. En fait, il serait certainement visible de l'extérieur du système solaire. Ce qui explique d'ailleurs que les astronomes s'intéressent aussi aux autres systèmes stellaires pour comprendre la formation du nôtre.

Durant les 500 premiers millions d'années du système solaire, de très nombreux noyaux ont été précipités vers le Soleil. Disposées en remparts autour de l'étoile, les planètes n'ont pas échappé à cet intense bombardement à l'origine de cratères d'impacts, à l'image de ceux qui couvrent la surface de Mercure ou de la Lune (Image 1.6). Sur les planètes telluriques, ces collisions catastrophiques ont probablement contribué à l'apparition d'une atmosphère primitive constituée d'eau, de dioxyde de carbone et d'azote.

Image 1.6 - Mercure observée par Mariner 10. La surface de la planète est recouverte de cratères.
Crédits NASA.

Pourquoi une chevelure ?

Loin du Soleil, les comètes sont la plupart du temps très discrètes et réduites à un noyau de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres de dimension. Lorsque leur orbite est perturbée par le passage d'un objet dans leur voisinage (étoile ou planète géante), certaines comètes peuvent être précipitées vers le centre du système solaire et vivre des moments plus animés, après avoir passé plusieurs milliards d'années dans les congélateurs que sont la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort. Les trajectoires des comètes connues sont généralement fortement elliptiques (voire hyperboliques), les faisant passer à très courte distance du Soleil.

C'est d'ailleurs le Soleil qui les rend resplendissantes et d'allure gigantesque au cours de leur trajet parfois unique (image 1.7). Lorsqu'elles plongent vers l'intérieur du système solaire, l'augmentation de la température (qui varie en raison inverse de la racine carrée de la distance au Soleil) et la pluie de particules et de rayonnement en provenance du Soleil qui s'abat sur la

Image 1.7 - La comète Hale-Bopp, lors de son passage en 1997. Une comète peut devenir un monstre à l'approche du Soleil. La coma peut s'étendre à plus de 50 000 km du noyau, soit l'équivalent du rayon de Saturne. Les queues peuvent quant à elles dépasser 100 millions de km de longueur. Les poussières se mettent en orbite autour du Soleil, donnant à la queue de poussière sa forme courbe qui matérialise le déplacement de la comète autour du Soleil. Source www.chapman.edu.tw

comète ont pour conséquence de produire un dégazage de sa surface. Les composés volatils se **subliment** et les poussières sont entraînées par le flux de gaz. Le dégazage conduit alors à la formation d'une enveloppe de poussières et de gaz (la coma) qui peut s'étendre sur des distances considérables. Une queue blanchâtre se forme sous l'effet de la **pression de radiation** et du **vent solaire**. Celle-ci diffuse la lumière du Soleil, ce qui la rend lumineuse, comme la poussière passant dans un rai de lumière. L'action du vent solaire produit également une queue de **plasma**, de couleur bleutée, crée par l'**ionisation** des molécules de gaz. Cette queue ne diffuse pas la lumière. Sa couleur est due à l'émission de **fluorescence** des molécules ionisées CO^+. Elle est rectiligne et s'étend à grande distance, à l'opposé de la direction du Soleil (image 1.8).

Enfin, sous l'effet du rayonnement ultraviolet du Soleil, les molécules d'eau présentes dans l'environnement du noyau sont dissociées à de grandes distances de ce dernier. L'hydrogène forme ainsi un halo autour de la coma. Malgré son étendue (jusqu'à 10 millions de kilomètres de diamètre), le halo d'hydrogène est invisible au sol. Il n'est détectable que depuis l'espace, en raison de l'absorption de sa lumière par l'atmosphère terrestre.

Mais le panache lumineux dont la comète se pare est bien le signe d'une mort annoncée... la sienne ! après quelques orbites autour du Soleil. En effet, au cours des passages successifs, la boule de neige sale perd ses composés volatils (plusieurs centaines de tonnes par seconde en phase active, soit environ 1 m d'épaisseur par passage) et finit par ne plus resplendir lorsque le noyau a totalement dégazé. Elle laisse alors la place à un astre mort, sorte de meringue calcinée, inerte et invisible. La frontière entre comètes éteintes et astéroïdes est d'ailleurs parfois trompeuse. On estime que la comète de Halley a une durée de vie de l'ordre de 1 000 à 2 000 ans. Si c'est bien elle qui s'était montré 4 siècles avant notre ère, nous assistons à ces dernières révolutions au titre de comète.

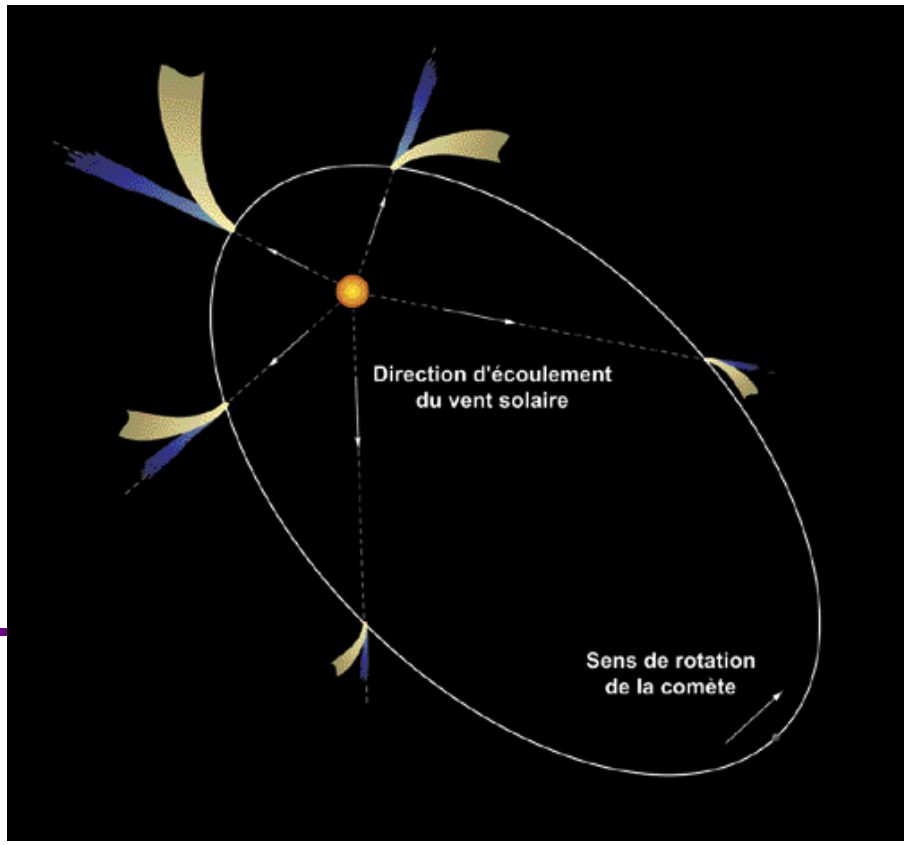


Image 1.8 - Schéma représentant l'orientation des queues de la comète au cours de son périple autour du Soleil. La queue d'une comète est toujours dirigée dans la direction opposée au Soleil. Source CNES, illustration S. Rouquette.

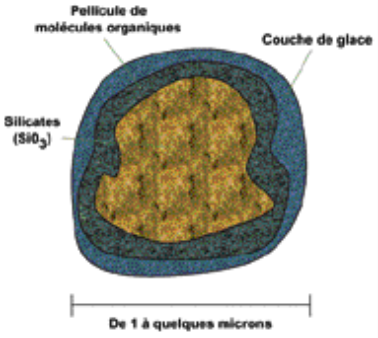


Image 19 Le cœur siliceux ou métallique des poussières cométaires serait entouré d'une pellicule de matière organique, elle-même protégée par une fine couche de givre. L'arrivée de ces particules sur la Terre primitive aurait pu accélérer le processus d'apparition de la vie. Crédits CNES, illustration S. Rouquette.

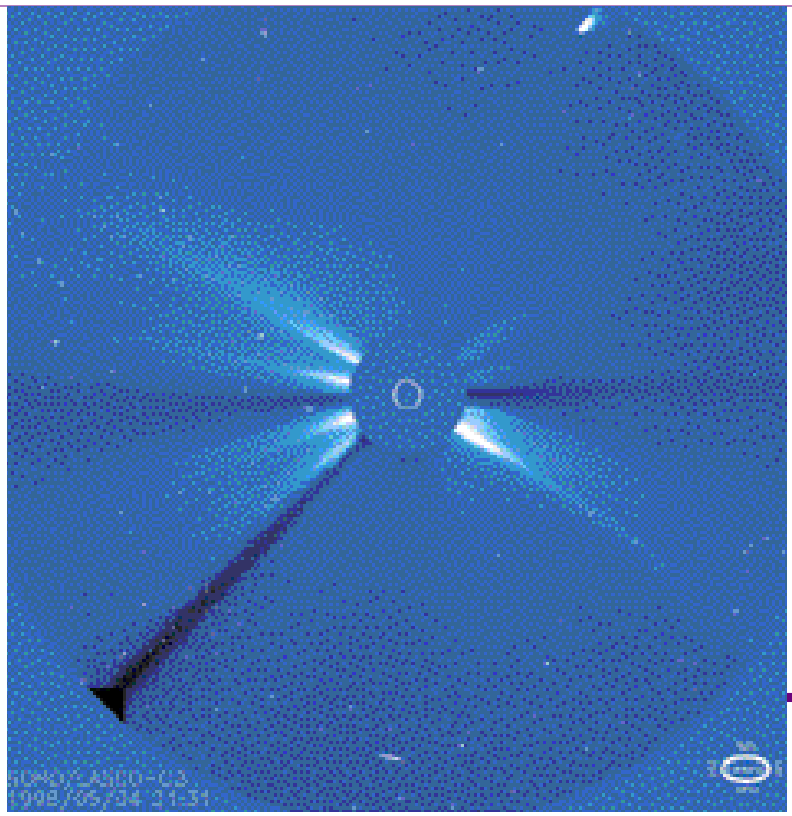


Image 110 - Cette vue assez inhabituelle de l'environnement du Soleil (dont la taille est représentée par le cercle blanc an centre de l'image) a été réalisée à l'aide du coronographe embarqué sur le satellite Soho. La tache claire et diffuse au sommet de l'image est une comète s'approchant de notre étoile. Crédits ESA/NASA.

Quelques vedettes du 20e siècle

Les études réalisées à l'issue de la rencontre de la sonde Giotto avec la comète de Halley ont révélé des caractéristiques insoupçonnées de ce petit monde. La composante volatile montre une forte composition en eau (80 % du volume des gaz éjectés). Présentant les dimensions d'une montagne (16x8x8 km^3), le noyau observé est de forme irrégulière et sombre (**albédo** inférieur à 0,04 - 0,06 pour Mercure, 0,4 pour la Terre, 0,9 pour la neige fraîche-). Par ailleurs, sa densité a été estimée entre 0,1 et 1 (1 pour l'eau, 5,5 pour la densité moyenne de la Terre). Ainsi, le noyau serait une sorte d'agrégat floconneux de poussières (image 1.9) composées de roches (25%), de **matière organique** (C, H, O, N, 25%) et d'un mélange des deux (50%). La comète Hyakutake a illuminé le ciel hivernal de l'année 1996. Elle est passée à seulement 15 millions de kilomètres de la Terre. Son étude a notamment permis de découvrir des fragments quittant le noyau. Cet émiettement semble être en fait une caractéristique de nombreuses comètes et corrobore l'idée que celles-ci sont de fragiles agglomérats.

La plus spectaculaire de la fin du siècle dernier fut sans doute Hale-Bopp, comète géante de près de 50 km passée à 195 millions

Impacts de géocroiseurs

Les statistiques actuelles sont éloquentes :

- 50 000 débris météoritiques rencontrent la Terre chaque année (ils sont volatilisés dans l'atmosphère) ;
- un impact avec un objet de 10 m de diamètre environ a lieu tous les 100 ans.
- un impact avec un objet de 100 m de diamètre environ se produirait tous les 1 000 ans ;
- un impact avec un objet de 1 km de diamètre environ pourrait se produire tous 100 000 ans à 1 million d'années. Il aurait des répercussions à l'échelle globale ;
- un impact avec un objet de 10 km environ pourrait avoir lieu tous les 100 millions d'années et serait responsable d'extinctions massives (d'espèces végétales et animales) à l'échelle planétaire.

Au total,se sont quelques dizaines de tonnes qui s'ajoutent chaque jour à la masse de la Terre, suite à la chute de corps et de poussières (soit environ 30 à 100 mg/an par parcelle de 1 000 m^2).

Un nom pour une comète

Ce ne sont pas moins de 1 000 comètes qui ont été découvertes à ce jour et 200 d'entre elles ont une période inférieure à 200 ans. Elles portent généralement le nom de leur(s) découvreur(s) ou de celui ou ceux qui ont calculé leur orbite. Pour les comètes de courte période, un numéro précède la lettre P, correspondant à l'ordre chronologique dans lequel leur orbite a été calculée. La lettre C désigne les comètes de période longue ou non calculée. Ce sont par exemple :
- 1P/ Halley, première comète périodique découverte ;
- C/1995 O1 Hale-Bopp en 1995 ;
- C/1996 B2 Hyakutake en 1996 ;
- D/Schoemaker-Levy 9,disparue en 1994.

Image 1.11 Barringer Meteor Crater (désert de l'Arizona) est l'un des plus impressionnants vestiges d'impact d'astéroïdes avec la Terre. Un bolide de 200 m serait à l'origine du cratère de 1 km de diamètre et de 200 m de profondeur. Laissée il y a 30 000 ans, cette énorme cavité est comme un coup de poinçon dans la croûte terrestre. Crédits ESA.

Image 1.12 - Il y a environ 65 millions d'années, un géocroiseur de 10 à 20 km de diamètre a frappé la Terre au large de la presqu'île du Yucatan (Mexique). La collision s'est produite à une vitesse de 20 km/s environ. Ce cataclysme à l'échelle de la planète aurait causé la disparition de 50 à 70 % des espèces animales. Le déclin des sauriens qui régnait en maîtres incontestés aurait sonné l'avènement des mammifères. Crédits NASA.

de kilomètres de la Terre en mars 1997. Très active, elle produisait environ 100 tonnes d'eau par jour. L'observation à haute résolution de son noyau permit en outre de mettre en évidence la rotation de ce dernier.
De nombreuses comètes sont découvertes tous les ans. Ce sont par exemple des comètes Soho, qui tiennent leur appellation du satellite européen d'étude du Soleil SOHO (SOlar Heliosismology Observatory). Grâce à son coronographe (instrument qui permet de voir l'environnement du Soleil en occultant le disque brillant de la surface de l'étoile), plus de 100 comètes ont été découvertes en 6 ans (image 1.10). LINEAR (Lincoln laboratory Near Earth Asteroid Research) est un programme de détection automatique de géocroiseurs. Plus de 80 comètes ont été découvertes par ce système depuis 1996. Il en est une enfin qui mérite d'être mentionnée. Elle n'est pas très spectaculaire (elle est invisible à l'œil nu), mais sa découverte est une première dans le monde de l'astronomie. C/1997J2 Meunier-Dupouy est la première comète découverte par deux amateurs français (Michel Meunier et Philippe Dupouy) utilisant des détecteurs **CCD** pour réaliser des images. Cela marque d'ailleurs la fin d'une longue période d'absence des français (20 ans) sur la scène des découvertes cométaires.

La peur... que le ciel nous tombe sur la tête

Les vieilles peurs persistent et l'on a tôt fait de croire que les comètes sèment la mort plutôt que la vie (à en voir le succès de films récents tels que «Deep impact» ou «Armagedon»). Mais qu'on se rassure, ce n'est pas tous les jours que nous risquons ce type de mésaventure astrophysique (image 1.11 et 1.12).
En revanche, nous avons pu contempler

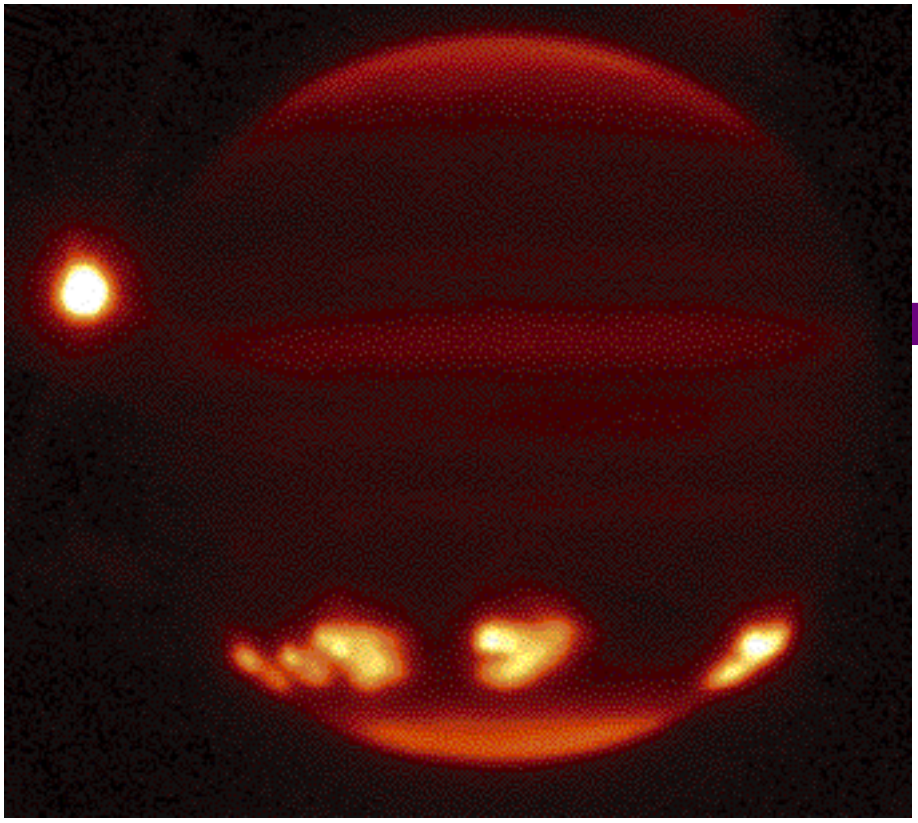


Image 1.13 - Cette image, réalisée dans le domaine infrarouge, montre les impacts successifs des débris de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter. Le point brillant dans le coin supérieur gauche du cliché est le satellite jovien Io. Crédits Hawaï University.

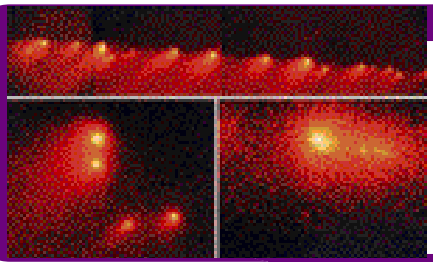


Image 1.14 - Avant de disparaître dans l'épaisse atmosphère de Jupiter, la comète Shoemaker-Levy 9 s'est disloquée sous l'action de l'attraction de la planète. On distingue clairement un train de près de vingt bolides. Crédits Hubble Space Telescope, NASA.

(on se délecte lorsque cela arrive ailleurs) la disparition de la comète Shoemaker-Levy 9 dans l'épaisse atmosphère de Jupiter (image 1.13). En juillet 1992, sous l'effet de marée causé par la planète (l'attraction gravitationnelle y est plus de 300 fois supérieure à celle de la Terre), le noyau cométaire s'est fragmentée en une vingtaine de projectiles (image 1.14). C'est finalement en juillet 1994 que les impacts ont eu lieu. Cette «aventure» confirme l'hypothèse de fragilité des noyaux cométaires et montre le rôle protecteur des planètes géantes. Sans leur présence, nous pourrions craindre un taux plus important de mauvaises rencontres !

Dans l'éventualité d'une collision à venir (objet identifié comme potentiellement dangereux), il faudrait avant tout calculer l'évolution à long terme de l'orbite de l'astéroïde ou de la comète. Puis, et ce n'est pas la moindre des étapes, il serait nécessaire de le briser ou de modifier sa trajectoire, sous réserve que l'on connaisse sa structure. Quoi qu'il en soit, les moyens techniques actuels nous interdisent une telle intervention. Et nous pourrions être condamnés à assister impuissants à notre destruction (voir encadré «Impacts de géocroiseurs»).

Hector Servadac

Ce «voyage extraordinaire» écrit par Jules Verne décrit l'excursion interplanétaire du professeur Palmyrin Rosette et de ses compagnons d'infortune, enlevés de la surface de la Terre par le noyau d'une comète. Une comète dont il avait déterminé les paramètres et à qui il avait donné le nom de Gallia,après avoir hésité entre Palmyra et Rosetta ! Après un circuit de 2 ans,la comète revient frôler la Terre et ses habitants en profitent pour regagner notre planète.

Et, bien que cela puisse troubler ou surprendre, la mission Rosetta ne doit absolument pas son nom à cette aventure.

Hector Servadac, Jules Verne, Les intégrales de Jules Verne, Hachette, 1978.

L'étude des comètes est donc un point de passage obligé pour comprendre la formation du système solaire et apporter des informations clés concernant l'apparition de la vie sur Terre. Le début du 21e siècle sera marqué par de nombreuses missions d'exploration cométaire. Deep Space 1 (DS-1) est une mission technologique américaine lancée en 1998. La sonde a survolé la comète Borrely en septembre 2001. La mission est achevée depuis le mois de décembre 2001. Stardust (mission américaine lancée an 1999) collectera quelques milligrammes de poussière autour de Wild 2, pour un retour de la capsule en 2006. La sonde a survolé l'astéroïde Annfranck le 4 novembre 2002. La mission américaine Contour (comet nucleus tour) a connu un destin tragique. Une semaine après son lancement le contact avec le satellite a été perdu. Deep Impact (une autre mission américaine) a pour objet l'étude de la composition et de la structure du noyau cométaire. La méthode employée est pour le moins... choquante ! lancée en janvier 2004, elle atteindra la comète Tempel 1 en juillet 2005. Lors du survol, elle larguera 350 kg de cuivre qui impacteront la comète à quelques 10 km/s. Le choc produira un cratère de 120 m de diamètre pour 25 m de profondeur ou, au pire, causera la destruction de la comète. Le but est d'observer depuis la Terre le nuage crée lors de l'impact.

L'Europe n'est bien sûr pas en reste. Et si la mission Rosetta (voir encadré «Hector Servadac») est unique, elle constitue une première mondiale par les objectifs que se sont fixés les scientifiques et les ingénieurs du projet : atterrir en douceur sur un noyau cométaire et l'étudier pendant près de deux ans, au sol et en orbite.

Glossaire

GLOSSAIRE

Albédo. *L'albédo définit la capacité d'un objet, intrinsèquement non lumineux, à diffuser, donc à réfléchir vers l'extérieur, un rayonnement incident. Les valeurs d'albédo s'échelonnent entre 0 (corps parfaitement absorbant) et 1 (corps parfaitement réfléchissant).*

CCD : l'œil électronique. *Un capteur CCD (Charge Coupled Device ou Dispositif à Transfert de Charges) est une surface photosensible que l'on positionne par exemple au foyer d'un télescope, en lieu et place, par exemple, d'une pellicule photographique. Essentiellement constituée de silicium, la surface sensible produit un signal électrique proportionnel à l'intensité lumineuse incidente. La surface du capteur est constituée d'un réseau de minuscules cellules (de 7 µm à 30 µm) que l'on appelle photosite ou pixel. Ce dispositif équipe maintenant la plupart des caméras vidéo et se démocratise peu à peu dans le milieu de la photographie.*

Fluorescence. *Sous l'action d'un rayonnement, les atomes ou molécules de toute substance peuvent être excités. Ils libèrent ensuite ce trop plein d'énergie par l'émission de lumière dans un domaine caractéristique de longueur d'onde (i.e. couleur).*

Ion, ionisation. *Un atome est constitué d'un noyau (protons et neutrons) entouré d'un nuage d'électrons. Lorsqu'un ou plusieurs d'entre eux sont arrachés à l'atome, sous l'impact de particules ou de rayonnement, ce dernier se trouve ionisé. Il devient un ion.*

Molécule organique. *Les acides aminés, briques élémentaires de la vie terrestre sont des molécules organiques. Celles-ci sont constituées principalement de 4 éléments qui sont : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. Ces molécules sont notamment porteuses de l'information génétique (ADN).*

Nébuleuse primitive. *Nuage de gaz et de poussière à partir duquel s'est formé le système solaire il y a 4,6 milliards d'années.*

Plasma. *Les trois états «ordinaires» de la matière sont : le solide, le liquide et le gaz. Le plasma, considéré comme le quatrième état, est un gaz d'électrons et d'ions portés à haute température. Rare sur Terre, c'est l'état le plus communément observé dans l'Univers.*

Pression de radiation. *Lorsqu'un photon (particule de lumière) vient frapper une surface, il exerce une pression sur celle-ci, un peu à l'image du vent dans une voile. La pression de radiation exercée par le Soleil oriente la queue des comètes en direction opposée à celui-ci.*

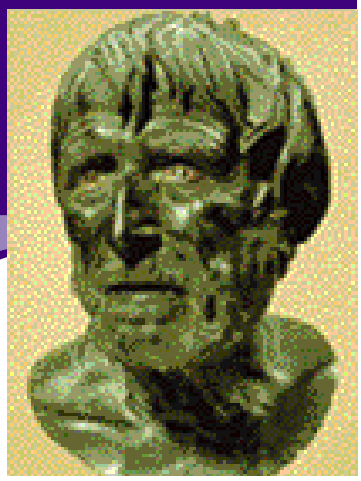
Silicates. *Les silicates forment un groupe de minéraux très répandus dans les roches magmatiques et métamorphiques. L'écorce terrestre est constituée à 90% de silicates.*

Sublimation*. Lorsqu'un corps solide passe directement à l'état de gaz, on dit qu'il subit une sublimation.*

Vent solaire*. Le vent solaire est constitué de particules chargées -principalement des protons, des électrons et des noyaux d'hélium - qui s'échappent de la couronne solaire en direction radiale à raison de 2 millions de tonnes par seconde et à la vitesse moyenne de 400 km/s.*

Rosetta...
un rêve plus loin !

Les comètes sont trop rares pour que les astronomes se contentent du hasard de leur rencontre pour les étudier. Les réservoirs de comètes sont trop éloignés pour que leurs instruments puissent y chercher des informations précises sur les objets qui les peuplent. Pour apporter des réponses aux questions posées par les scientifiques, il n'y a qu'un moyen : aller à la rencontre d'une comète et l'étudier en détail en s'y posant. C'est l'objet de la mission Rosetta, dont les principaux traits sont donnés par Denis Moura.



Le temps viendra où une étude attentive et poursuivie pendant des siècles fera le jour sur ces phénomènes de la nature. Sénèque -4 AJC/65.

Avant le décryptage de la Pierre de Rosette (Image 2.1), découverte en 1799 par Pierre-François-Xavier Bouchard, la civilisation égyptienne était un mystère. Il était impossible de raconter son histoire car personne ne parvenait à lire le message des hiéroglyphes. Jean-François Champollion réussit à traduire ceux-ci (grâce au texte écrit en grec, démotique et hiéroglyphes) pour donner un sens aux textes des vestiges pharaoniques.
Le parallèle avec la mission Rosetta, qui a hérité de son nom, n'est pas fortuit car la mission de la sonde sera de déchiffrer le message porté par les comètes afin d'ajouter un chapitre à l'histoire encore mal connue de la formation du système solaire.

Une mission ambitieuse

Rosetta est une mission de rendez-vous entre une sonde spatiale et une comète. L'enjeu de la mission est d'étudier la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, que ce soit en orbite ou directement depuis le sol (Image 2.2). Elle compte parmi les pierres angulaires du programme scientifique Horizon 2000 de l'agence spatiale européenne (ESA). La mission a été décidée en 1993 et sera lancée entre le 26 février et le 17 mars 2004 par un lanceur Ariane 5, depuis la base de Kourou.
Lorsqu'on envoie une sonde (ou un satellite) à la rencontre d'un objet céleste que l'on souhaite étudier, deux alternatives se présentent. On peut étudier l'objet à distance, par le biais de mesures dites de télédétection : ce sont par exemple des images réalisées dans différentes bandes de longueur d'onde, comme le font les satellites Spot. On peut aussi poser à sa surface une batterie d'instruments qui vont réaliser des expériences directement sur ou sous le sol (prélèvement d'échantillons, analyse sismique...). Cette solution n'est bien sûr envisageable que si la structure de l'astre le permet. Il est peut probable qu'une sonde soit un jour envoyée dans les vapeurs brûlantes du Soleil pour en prélever quelque échantillon que ce soit.

Image 2.1 La pierre de Rosette, découverte en 1799. Crédits British Museum.

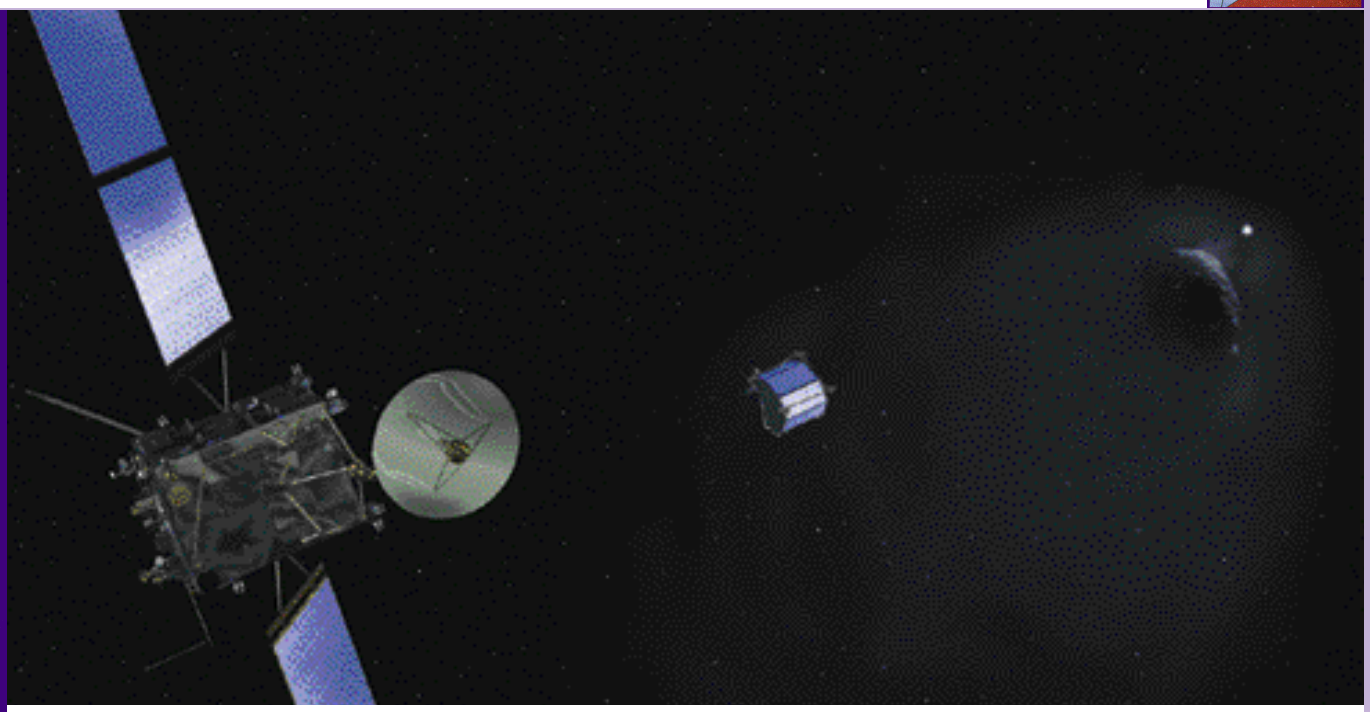


Image 2.2 Vue d'artiste représentant l'arrivée de Rosetta et le largage de l'atterrisseur sur la comète. Crédits ESA.

Rosetta relèvera le double défi de se mettre en orbite autour d'un noyau cométaire et de larguer un atterrisseur à sa surface. Elle étudiera particulièrement l'émergence de l'activité de la comète à grande distance du Soleil et son évolution jusqu'au passage de 67P/C-G au plus près du Soleil (périhélie).

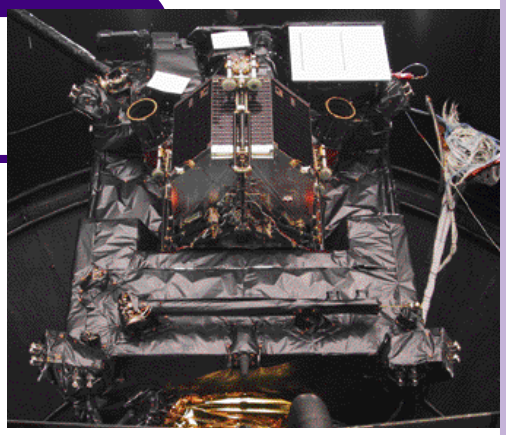
Une collaboration à la hauteur des enjeux

Voir, sentir, toucher !

Pour mener à bien la mission qui lui est confiée, la sonde emporte 21 instruments scientifiques, qui peuvent se répartir selon deux catégories d'expériences. Les unes permettront d'analyser la composition des gaz et des poussières émis par le noyau lors du dégazage et les autres réaliseront l'étude de la composition et de la structure du noyau. Les expériences se répartissent donc sur l'orbiteur et l'atterrisseur pour réaliser :

- la caractérisation du noyau cométaire (morphologie, taille, paramètres de rotation...) ;
- l'étude des poussières et des particules dans l'environnement du noyau ;
- l'analyse des gaz en présence à la surface du noyau et dans son enveloppe ;
- l'identification des sources de gaz à la surface du noyau ;
- la détermination de la part de matière organique dans la composition du noyau ;
- le sondage radar de l'intérieur du noyau.

Image 2.3 - L'atterrisseur de la sonde Rosetta fixé sur l'orbiteur. Crédits ESA, 2002.



La sonde Rosetta

La sonde est un parallélépipède de 10 m³ environ, à la surface duquel sont disposés les instruments de l'orbiteur, l'atterrisseur, mais aussi les éléments essentiels que sont les panneaux solaires, les antennes de communication avec l'atterrisseur et la Terre, mais aussi les tuyères nécessaires aux changements de trajectoire. D'ailleurs, pour une masse totale de près de 3 tonnes, le satellite ne compte pas moins de 1,7 tonnes de carburant ! La charge utile ne représente donc qu'une petite contribution à la masse totale (150 kg d'instruments à bord de l'orbiteur et 100 kg pour l'atterrisseur). En vérité, cela n'a rien d'étonnant. Cette caractéristique est bien le propre des missions spatiales au long cours qui nécessitent beaucoup de carburant afin de contrôler leur trajectoire (entre 10 et 50 % de la masse en orbite ou en croisière) et de nombreux systèmes pour permettre aux instruments de réaliser leurs mesures et de transmettre les données aux utilisateurs.

Des générateurs solaires de 32 m d'envergure fourniront l'énergie électrique de l'orbiteur. L'atterrisseur (Image 2.3) sera recouvert de panneaux solaires fournissant une puissance de 9 W, couplés à des batteries rechargeables. Mais, ne connaissant pas l'environnement dans lequel il évoluera (brouillard crée par les poussières, période de rotation du noyau, givrage possible des panneaux) il sera également équipé de piles d'une autonomie de 5 jours environ. Le plan d'activité des expériences scientifiques a été établi sur cette durée.

Image 2.4
Les instituts européens associés à la réalisation de l'atterrisseur.

Les mesures acquises par les instruments au sol seront stockées dans une mémoire de 12 Mb (nous sommes loin des 50 Gb d'un ordinateur de bureau, mais essayez seulement de faire fonctionner un tel outil avec une puissance inférieure à 10 W !) puis transmises à la Terre via l'orbiteur, grâce à un relais de radiocommunication.

Etant donnés l'ambition et le coût associés à la mission, aucune solution de développement national n'a été recherchée. Rosetta a été décidée et conçue dans un cadre international. Le développement du satellite principal incombe à l'ESA, celui de la charge utile de l'orbiteur est assuré conjointement par les états membres de l'ESA et la NASA. Le développement de l'atterrisseur est géré par un consortium européen dirigé par l'Allemagne (centre aéronautique et spatial, DLR), auquel participe largement la France (Image 2.4).
Enfin, la composante sol «terrienne», sous la responsabilité de l'ESA, fera appel à deux stations sol (Perth en Australie et Kourou en Guyane, cette dernière utilisée uniquement pour les phases proches de la Terre) et à un centre d'opérations (Darmstadt en Allemagne). De plus, l'atterrisseur aura également un centre d'opérations partagé entre l'Allemagne (DLR, Cologne) et la France (CNES, Toulouse).

Une large participation française

L'industrie nationale participe directement à cette mission sous contrat ESA, au travers des sociétés Alcatel Space, Astrium SAS, EADS LV, SNECMA et Thomson.
De plus, le CNES et la communauté scientifique française contribuent à la mission ROSETTA au niveau :

- de participations instrumentales aux charges utiles embarquées sur le satellite principal et sur l'atterrisseur (voir § «Participation scientifique française aux expériences») ;
- d'une participation à l'ingénierie, au développement, aux tests (Image 2.5) et aux opérations de l'atterrisseur (voir tableau 1).

Au total, 70 chercheurs appartenant à 14 laboratoires de recherche (Image 2.6) participent à cette mission spatiale ambitieuse qui associe également de nombreux industriels nationaux pour la réalisation de l'atterrisseur (THALES, SAFT, STEEL, CISI, REALIX, ...).
L'ensemble des contributions françaises à la charge utile et à l'atterrisseur est géré par le CNES. La coordination du développement de la contribution française à l'instrumentation est sous la responsabilité de la Direction des systèmes orbitaux (chef de projet : Denis Moura), la coordination scientifique étant assurée par la Direction des programmes (Francis Rocard, responsable du programme).
Deux instruments ont été réalisés sous complète maîtrise d'œuvre française. Ces expériences sont réalisées par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS-INSU), l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay et le Laboratoire de Planétologie de Grenoble.

La participation scientifique française aux expériences

L'expérience ÇIVA

ÇIVA (acronyme de Comet nucleus Infrared and Visible Analyzer) est le système d'imagerie de l'atterrisseur (Image 2.7). L'instrument apportera des informations concernant la nature chimique des comètes, leur formation et leur évolution, ceci grâce à des images panora-

Image 2.5 - Rosetta en cours de test d'environnement spatial. Crédits ESA, 2000.

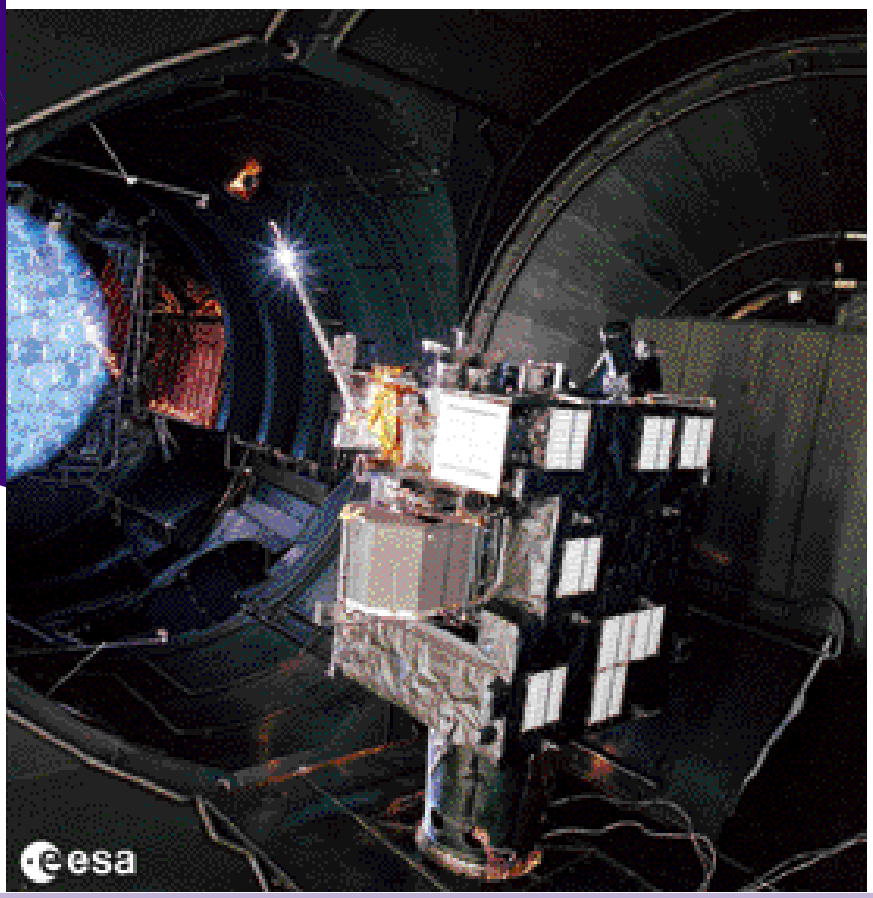


Image 2.6 Les laboratoires français principaux travaillant sur les instruments de la mission Rosetta. Crédits CNES.

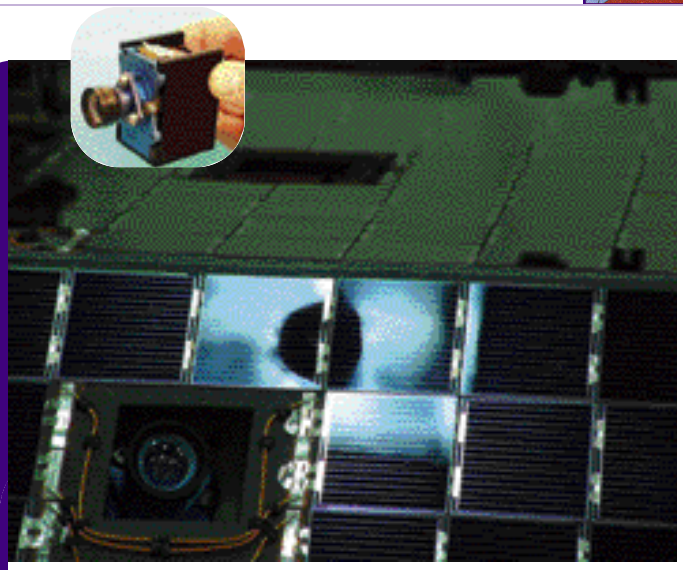


Image 2.7 - Une caméra de l'instrument ÇIVA, intégrée à l'atterrisseur. Crédits IAS, CNES.

miques du site d'atterrissage et des images (visible et infrarouge) d'échantillons prélevés sur ou sous la surface de la comète.

En référence au dieu hindou Çiva (dieu de la création et de la destruction -prononcer Shiva- représenté par un être possédant une multitude de bras), cette expérience est constituée de multiples détecteurs : 5 caméras panoramiques, un couple de **caméras stéréoscopiques**, un microscope optique (dans le domaine visible) et un **spectromètre** imageur. Les caméras seront utilisées pour cartographier le site d'atterrissage (CDD 1000 x 1000 pixels, résolution de 1 m à 1000 m de distance) et font appel à une technologie de type "3D" : les composants, sous forme de puces nues (sans boîtier de protection), sont montés sur des microcircuits. Ceux-ci sont ensuite moulés dans un bloc de résine et ont leurs interconnexions sur les parois latérales du cube formant le bloc de détection. Cette technologie, première mondiale, a permis d'atteindre des performances exceptionnelles, en masse (< 100 g), puissance (< 2 W) et en température (jusqu'à -150 °C en stockage, et -120 °C en fonctionnement). Les clichés incluront au moins un pied de l'atterrisseur dont la profondeur d'enfoncement renseignera sur la nature du sol.

Le microscope optique utilise le même bloc de détection que les caméras et réalisera l'imagerie des échantillons de surface et sous-surface avec une résolution de 7 µm.

Enfin, le spectro-imageur produira des images des échantillons dans le domaine infrarouge avec une résolution de 40 µm. Le développement de l'instrument est assuré par l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay (IAS-CNRS), sous la responsabilité de J-P. Bibring.

L'expérience CONSERT

Le second instrument placé sous responsabilité française est l'expérience CONSERT (COmet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission) qui réalisera le sondage radar de l'intérieur du noyau afin d'en analyser sa structure interne. CONSERT (Image 2.8) est la seule expérience de la mission Rosetta qui fournira des informations inédites sur l'intérieur du noyau cométaire. En effet, cet instrument sera le premier à apporter ce type d'observation aux scientifiques.

Rosetta en quelques chiffres

Date de lancement	Entre le 26 février et le 17 mars 2004
Taille de la sonde (corps central)	2.8 x 2.1 x 2 m^3
Envergure des panneaux solaire déployés	32 m (surface de capteurs environ 50 m^2)
Masse au décollage	3 tonnes
Dont carburant	1,7 tonnes
Charge utile	165 kg
Atterrisseur	100 kg
Puissance des générateurs solaires	9 000 W à 1 ua,400 W à 5 ua
Durée de la mission	10 ans
Nombre d'instruments	21 (dont 11 sur l'orbiteur)

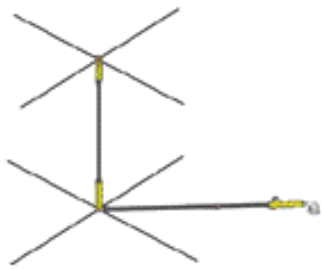


Image 2.8 - L'antenne de l'instrument CONSERT sera fixée sur l'orbiteur. Crédits LPG, Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble, CNRS, CNES.

L'expérience consiste à émettre un signal radio entre l'atterrisseur et l'orbiteur à travers le noyau cométaire. Ce parcours modifiera les caractéristiques des ondes émises. Ainsi, l'analyse du signal permettra d'obtenir des informations sur les propriétés physiques et électriques de la comète. De plus, elle donnera les contraintes fortes sur les matériaux ou les inhomogénéités et permettra l'identification des blocs, des lacunes ou des vides. Après plusieurs orbites d'observations, il sera possible de réaliser une sorte de **tomographie** de la structure interne du noyau.

Avec les informations recueillies, les chercheurs essayeront de mieux cerner le problème essentiel sur la formation de comètes :

- Se sont-elles formées à partir de grains interstellaires non transformés ou à partir des grains condensés dans la nébuleuse primitive ?
- L'accrétion s'est-elle opérée par collisions successives des cométésimales (cf. chapitre "Comètes... le système solaire au congélateur !") ou bien par agglomération continue de poussières et de glaces originelles ?

L'élément installé sur l'orbiteur a une masse totale de moins de 2 kg et fonctionne sous une puissance de 2,5 W. Celui qui est à bord de l'atterrisseur pèse moins de 3 kg et utilise 3 W pour fonctionner.

L'instrument CONSERT est développé sous la maîtrise d'œuvre du Laboratoire de Planétologie de Grenoble (LPG-CNRS) de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble sous la responsabilité de W. Kofman. Le LPG coordonne les travaux du Service d'Aéronomie (SA-CNRS) et du Max Planck Institut für Aeronomie (MPAe) en Allemagne.

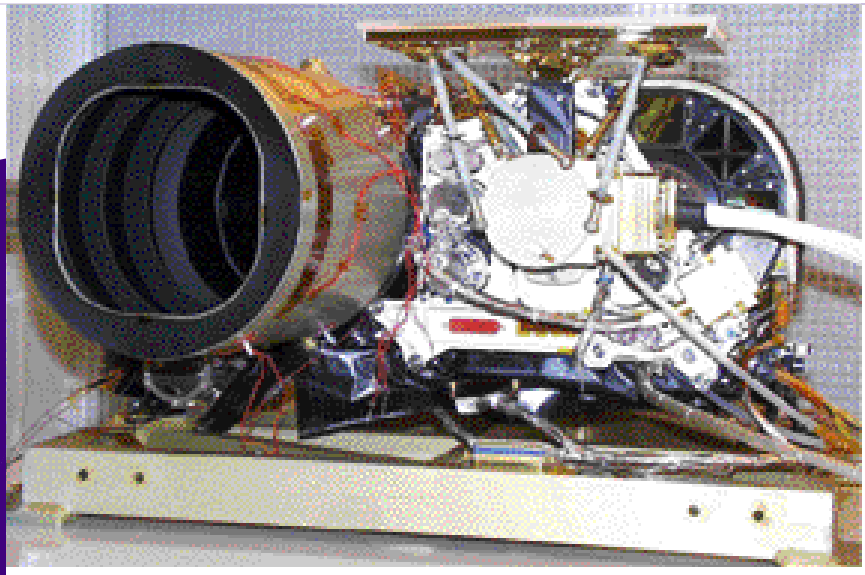


Image 2.10 - Une vue de la NAC (instrument OSIRIS) pendant les tests au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. On distingue une des deux roues à filtres (à droite), le radiateur assurant le refroidissement du détecteur CCD (en haut) et le baffle d'entrée (à gauche). Crédit : A. Origné, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

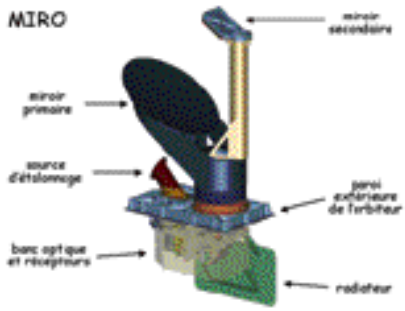


Image 2.9 - Schéma représentant le radiotélescope MIRO. Crédit LESIA, CNRS, CNES.

L'expérience COSAC

L'expérience COSAC (COmetary Sampling And Composition) est intégrée dans l'atterrisseur. Elle a pour objectif l'analyse chimique in situ de la matière organique et inorganique du noyau de la comète.

L'expérience est constituée d'un système de prélèvement d'échantillons (du sol et du proche sous-sol), de pyrolyseurs destinés à chauffer les échantillons jusqu'à 800°C, afin de vaporiser certains composés volatils, et d'analyseurs permettant de caractériser la phase gazeuse provenant des échantillons. Ces analyseurs consistent en un spectromètre de masse (SM) et un **chromatographe en phase gazeuse** (CPG). Les deux instruments permettront une identification sans ambiguïté des espèces en présence.

Cette technique a déjà été utilisée pour les missions spatiales visant à étudier Mars (Viking), Vénus (Pioneer, Venera, Vega) et Titan (Cassini-huygens), mais elle est utilisée pour la première fois dans le cadre de l'étude des comètes. Compte tenu des ressources disponibles et de notre méconnaissance de la composition chimique cométaire, donc de sa possible richesse en composés organiques, le CPG est le chromatographe spatial le plus complexe réalisé à ce jour.

Cette expérience est développée par le MPAe, sous la responsabilité du docteur H. Rosenbauer. Le spectromètre de masse est développé par une équipe de l'Université de Giessen (Allemagne). Le CPG est développé conjointement par le MPAe, le Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA-CNRS), le Service d'Aéronomie de l'Institut Pierre Simon Laplace (SA-IPSL-CNRS) et le département de chimie de l'Université de Brême (Allemagne). La contribution française à cette expérience a consisté dans le développement et la réalisation des réservoirs du gaz porteur du CPG par le Service d'Aéronomie, et dans l'étude et le développement de 5 colonnes chromatographiques par le LISA.

L'expérience MIRO

MIRO (Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter) est un radiotélescope équipant l'orbiteur de Rosetta (Image 2.9). Il fonctionne dans le domaine de longueur d'onde radio (millimétrique et sub-millimétrique), ce qui permet de faire une mesure directe de la température du noyau. Les ondes radio pouvant pénétrer le noyau sur des profondeurs de quelques millimètres à quelques centimètres, MIRO mesurera en fait la température de la sous-surface du

noyau. Ces mesures détermineront l'écart de température entre la «nuit» et le «jour» de la comète, l'inertie thermique du noyau, et discrimineront les régions de glaces des régions de poussières réfractaires. Cette exploration pourra être déterminante pour le choix du lieu d'atterrissage. On s'attend par exemple à des températures de -150 à +100°C, suivant l'insolation et la distance au Soleil.

Il mesurera également la quantité produite, la température et la vitesse de certains composants du gaz libéré par le noyau (eau -H_2O-, monoxyde de carbone -CO-, ammoniac -NH_3-, méthanol -CH_4-). Enfin, MIRO mesurera la température des astéroïdes survolés et y recherchera la présence éventuelle d'un faible dégazage.

MIRO comporte un télescope dont le miroir principal est une parabole de 30 cm de diamètre. Il utilise deux canaux offrant une résolution spatiale de 15 m (canal 1,6 mm) et 5 m (canal 0,5 mm) lorsque la sonde est à 2 km du noyau.

Le maître d'œuvre de MIRO est le Jet Propulsion Laboratory (Etats-Unis) sous la responsabilité de S. Gulkis. La contribution française consiste notamment en la conception et l'étalonnage de l'instrument et la fourniture de l'oscillateur ultrastable nécessaire au fonctionnement de la **technologie hétérodyne**. Les laboratoires français impliqués sont le Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique (LESIA-CNRS) et le Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique (LERMA-CNRS).

L'expérience OSIRIS

L'instrument OSIRIS (Optical **Spectroscopic** and Infrared Remote Imaging System) doit aborder les aspects fondamentaux de la formation des comètes et du système solaire en général par l'étude détaillée des processus physiques qui se déroulent sur et autour d'un noyau cométaire. Les objectifs scientifiques de la camera OSIRIS sont nombreux. Il s'agira par exemple :

- de déterminer la rotation du noyau cométaire et d'observer sa dynamique (zones d'activité, variation de surface) ;
- d'étudier la topographie du noyau et d'établir sa forme tridimensionnelle avec une précision meilleure que 1 m ;
- de rechercher et suivre les poussières et les jets de gaz ;
- de déterminer la forme, le volume et les paramètres orbitaux des astéroïdes survolés.

OSIRIS est constitué de deux télescopes indépendants, la Narrow Angle Camera (NAC, champ de vue de 2,5°x2,5°) et la Wide Angle Camera (WAC, champ de vue de 12°x12° environ). Chaque télescope est équipé d'un détecteur CCD de 2048x2048 pixels et fonctionne dans un domaine de longueur d'onde de l'ultraviolet (250 nm) au proche infrarouge (1000 nm). Les données sont enregistrées sur une mémoire de 1,5 Gb. Les deux caméras peuvent fonctionner simultanément, ce qui autorise l'obtention de couples d'images stéréoscopiques (Image 2.10).

OSIRIS a été développé au sein d'un consortium européen dont le MPAe est le maître d'œuvre. Le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM-CNRS), est maître d'œuvre du développement de la NAC dont l'étude et la réalisation du télescope ont été confiées à la société ASTRIUM.

L'expérience ROSINA

ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis) doit déterminer la composition élémentaire, isotopique et moléculaire de l'environnement cométaire, la température, la vitesse du gaz et des ions qui le constituent et enfin les réactions chimiques qui se produisent entre le gaz et les ions (Image 2.11). De plus, ROSINA sera utilisé lors du survol des astéroïdes pour rechercher de possibles dégazages et établir les liens éventuels avec les comètes. ROSINA utilise trois senseurs complémentaires, chacun optimisé pour remplir une partie des objectifs scientifiques.

- DFMS (Double Focusing Magnetic Mass Spectrometer) et RTOF (Reflectron Time Of Flight Mass Spectrometer) sont des spectromètres de masse utilisés pour l'analyse des gaz et des ions cométaires dans deux gammes de mesure.
- NIDM (Neutral and Ion Dynamics Monitor) fournit des mesures de vitesse et de température du gaz cométaire.

Le responsable principal de l'expérience est le professeur H. Balsiger de l'Université de Berne (Suisse). Plusieurs instituts de recherche se sont associés pour la construction des instruments : l'Université de Berne (Suisse), le MPAe, l'Université Technique de Braunschweig (Allemagne), l'Université de Giessen (Allemagne), le Lockheed Palo Alto Research Laboratory (USA), le Southwest Research Institute de San Antonio (USA), l'Université du Michigan (USA).

Les contributions françaises concernent le processeur des données de l'instru-

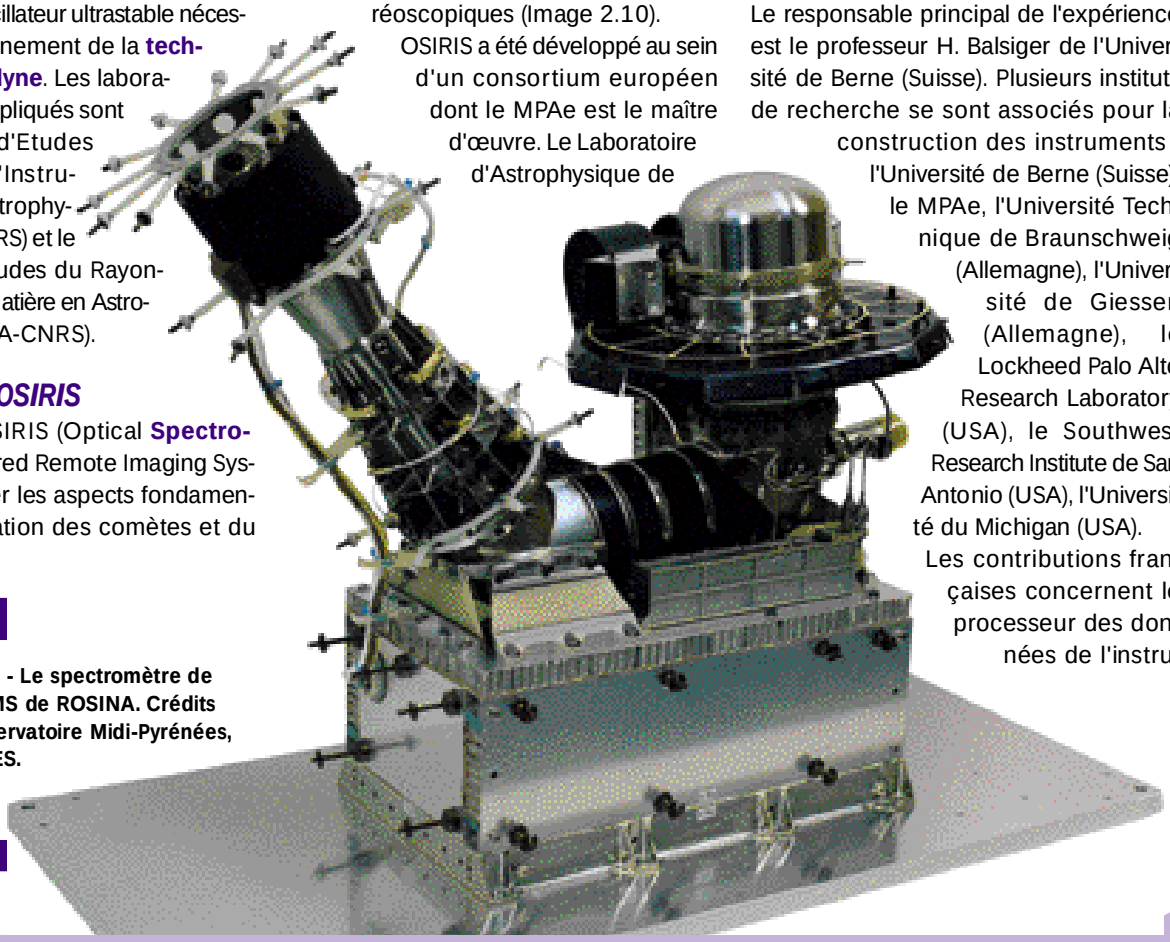


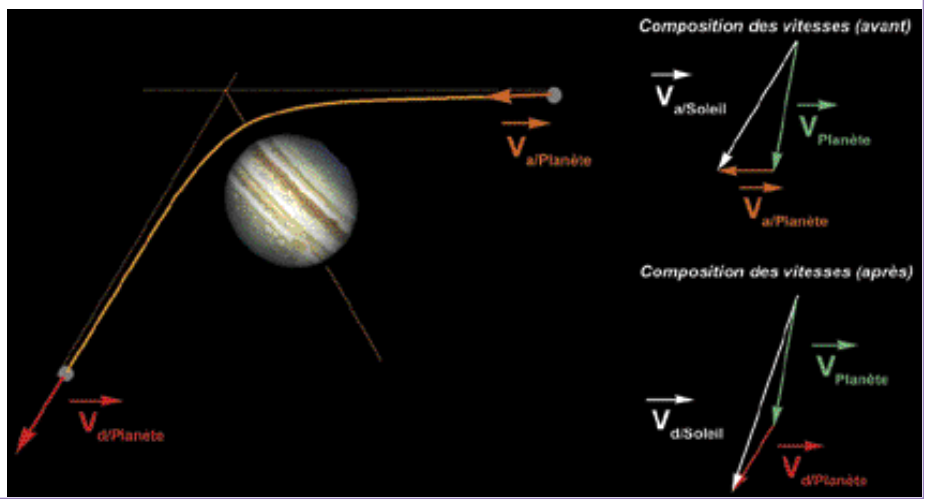
Image 2.11 - Le spectromètre de masse DFMS de ROSINA. Crédits CESR, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS, CNES.

Assistance gravitationnelle

Les modifications de trajectoire n'utilisent pas forcément des séquences propulsées. Pour partir à la découverte du système solaire, les sondes spatiales utilisent un principe naturel faisant appel à l'attraction gravitationnelle des planètes qui se trouvent sur leur parcours.
L'assistance gravitationnelle est une technique astucieuse qui permet d'économiser d'énormes quantités de carburant.
Pour en bénéficier, une sonde lancée à travers le système solaire (à la vitesse $\vec{V}_{a/Soleil}$) doit passer momentanément sous l'influence gravitationnelle d'une planète.
Dans le référentiel de la planète, le champ gravitationnel a pour conséquence d'infléchir la trajectoire qui prend la forme d'une hyperbole dont la planète est l'un des foyers. Le vecteur représentant la vitesse d'arrivée $\vec{V}_{a/Planète}$ pivote vers celui représentant la vitesse de départ $\vec{V}_{d/Planète}$ sans que sa valeur soit modifiée !

Dans le référentiel héliocentrique, lorsqu'elle n'est plus sous l'influence de la planète, la sonde est animée d'une vitesse $\vec{V}_{d/Soleil}$, somme vectorielle de la vitesse de la sonde et de la vitesse de déplacement de la planète sur son orbite $\vec{V}_p$.

L'efficacité de la manœuvre dépend bien entendu de la masse de la planète (champ gravitationnel proportionnel à la masse), mais aussi de l'angle d'arrivée et de l'altitude minimale de survol de la sonde.



ment et le RTOF par le Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements (CESR-CNRS), le DFMS par le Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP-IPSL- CNRS).

Le consortium plasma RPC

Les instruments du consortium plasma de la mission ROSETTA ont pour objectif d'étudier les propriétés physiques du noyau et de sa surface, la structure et la dynamique de la coma ainsi que les interactions avec le vent solaire au cours du développement de l'activité cométaire. RPC est un ensemble de 5 capteurs :

- ICA (Ion Composition Analyser), un analyseur de composition ionique, sous la responsabilité de l'institut de physique spatiale (IRF) en Suède ;
- IES (Ion Electron Sensor), deux analyseurs d'ions et d'électrons, développés par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) aux Etats-Unis ;
- LAP (LAmgmuir Probe), une sonde mesurant les caractéristiques (température, densité) des ions et des électrons dans l'environnement de la comète et les ondes dans lesquelles ils baignent, réalisée par l'IRF ;
- MAG, deux magnétomètres déterminant les propriétés magnétiques de la comète, sous la responsabilité de l'institut autrichien de géophysique et de météorologie (IWF) ;
- MIP, une sonde permettant de mesurer les ondes électromagnétiques émises par la comète ainsi que la densité, la température et la vitesse des électrons près du noyau de la comète. L'instrument est développé dans le cadre d'une coopération internationale, le Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE-CNRS) en assurant la responsabilité scientifique et technique.

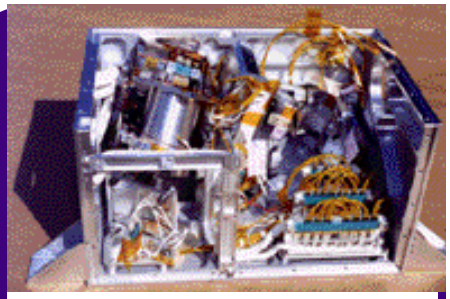


Image 2.12 Le canal à haute résolution spectrale de l'instrument VIRTIS. Crédits LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, CNES.

L'expérience VIRTIS

VIRTIS (Visual and Infrared Thermal Imaging Spectrometer) est un spectromètre fonctionnant dans le domaine visible et infrarouge (0,3-5 µm). La spectro-imagerie infrarouge permet d'étudier à distance la composition des corps rencontrés. Dans le cas d'une comète, il s'agira de déterminer la composition moléculaire des gaz et des poussières émis dans la coma et de la surface du noyau (Image 2.12).
La caractérisation globale du noyau commencera dès la mise en orbite de Rosetta, avec une cartographie minérale complète, particulièrement sur la région qui sera sélectionnée pour l'atterrissage. Les composés recherchés sont les silicates, les minéraux, les glaces et les composés organiques.
Le démarrage de l'activité cométaire, qui se traduit par une sublimation des composés volatils contenus dans le noyau et par l'émission de poussières, sera suivi de près par VIRTIS, qui doit pouvoir détecter très tôt les gaz émis (par exemple le monoxyde de carbone -CO- et l'eau -H_2O). Une fois l'activité cométaire lancée, le suivi des émissions des gaz permettra d'identifier et de suivre l'évolution de nombreux composés.
L'instrument est développé sous la responsabilité de Angioletta Coradini, de l'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica (Italie). Les laboratoires impliqués sont : le DLR, qui à la charge de l'électro-

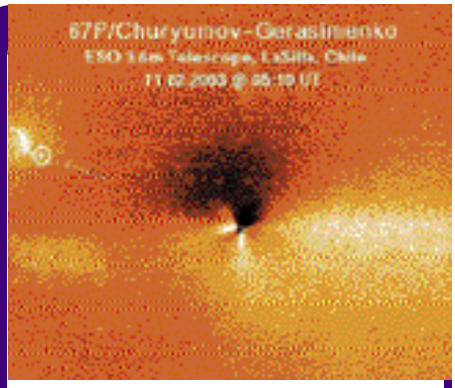


Image 2.13 Image de la comète 67P/C-G réalisée par l'Observatoire européen austral.© ESO.

nique générale et des logiciels embarqués ; le LESIA qui a la responsabilité de l'instrument VIRTIS-H et l'IAS pour la calibration de l'instrument VIRTIS.

De Rosetta... à nos origines

Astéroïdes et comètes sont la mémoire de la formation du système solaire (cf. chapitre "Comètes... le système solaire au congélateur !"). Les astéroïdes sont constitués de blocs rocheux de composition et de texture variable (plusieurs survols réalisés par des engins spatiaux ont permis de relever les caractéristiques générales). Le survol d'astéroïdes au cours du périple de Rosetta vers 67P/C-G permettra de compléter notre compréhension de la diversité des astéroïdes.

Les planètes ont subi des modifications profondes depuis leur plus jeune âge, si bien que les éléments qui les constituent ont perdu l'information sur la composition du matériau primordial et ne peuvent donc pas rendre compte du début de leur histoire. Les comètes en revanche, formées il y a 4,5 milliards d'années, n'ont pas évolué depuis et sont donc susceptibles de nous apporter un nouvel éclairage sur l'histoire de la formation du système solaire. Au-delà de leur contribution au processus de formation du système solaire, elles semblent même avoir joué un rôle essentiel dans l'évolution biologique de la Terre. En effet, les molécules organiques dont elles sont en partie constituées sont les éléments qui constituent les acides aminés, ingrédients essentiels au développement de la vie. Et si la vie primitive est apparue suite à la libération de ces composés par les comètes qui ont impacté la surface de la jeune Terre, nous sommes peut-être tous des extraterrestres !

Pourquoi 67P/C-G ? La comète a été découverte en 1969 par les astronomes qui lui ont donné son nom.

- Son orbite relativement peu elliptique à la particularité d'offrir de bonnes conditions d'observation. Son aphélie (le point de son orbite le plus éloigné du Soleil) ne se situe pour ainsi dire qu'à 5,7 ua, soit à peine plus de 860 millions de kilomètres du Soleil. Au périhélie, elle s'approche à seulement 1,3 ua du Soleil.
- Sa période de révolution autour du Soleil (6,6 ans) est suffisamment courte pour être déterminée avec précision.
- La durée de la mission d'étude de 67P/C-G est de 18 mois pour une croisière de 10 ans et demi, ce qui est compatible avec les moyens techniques et financiers mis en jeu.
- Enfin, 67P/C-G a été choisie en septembre 2003, comme remplaçante de 46P/Wirtanen, qui a "filé" suite à l'annulation du vol de 2003. 67P/C-G est plus volumineuse (et 30 fois plus lourde) mais présente des caractéristiques orbitales similaires ne remettant pas en cause la mission ni l'atterrissage à sa surface. Elle est assez active à l'approche du Soleil, ce qui suggère qu'elle possède encore de nombreuses ressources de composés volatils sous forme de glaces (Image 2.13).

Pourquoi donc aller la chercher si loin, puisqu'elle sera très proche de la Terre en 2015 ? Tout l'intérêt de la mission réside en l'accompagnement de la comète au cours de son trajet vers le système solaire interne, afin de suivre l'émergence et l'évolution de son activité et d'étudier les mécanismes mis en jeu, notamment par l'observation des premières sublimations des glaces. De plus, ce rendez-vous loin du Soleil permettra de réaliser des images du noyau avant qu'il ne soit perturbé par le rayonnement solaire. De cette façon, le repérage du site d'atterrissage sera facilité. L'atterrisseur sera posé avant que l'activité ne soit trop importante (le "brouillard" crée par la sublimation des gaz et l'éjection de poussières rendrait une telle approche très risquée).

Trois petits tours et puis s'en vont !

Il n'existe actuellement aucun lanceur assez puissant pour envoyer directement Rosetta vers son rendez-vous avec 67P/C-G. Pour un tel voyage, le lanceur devrait communiquer à la sonde une vitesse de près de 40 km/s. Or, la limite se situe actuellement à un niveau dix fois plus faible. Une autre solution pourrait alors être de propulser la sonde grâce à des moteurs installés à bord. Hélas, la masse nécessaire au décollage serait largement supérieure aux capacités de transport des lanceurs modernes. Mais ce véritable casse-tête a une solution "universelle". Pour éviter d'emporter une quantité prohibitive de carburant (la masse au décollage doit être la plus réduite possible pour une raison de coût et de capacité de lancement), la sonde passera à plusieurs reprises à proximité de la Terre (en 2005, 2007 et 2009) et de Mars (2007). Ce procédé, appelé effet de fronde ou assistance gravitationnelle, consiste à gagner de la vitesse en se plaçant temporairement sous l'influence du champ gravitationnel d'une planète. Le coût des assistances gravitationnelles ne se calcule

67P/C-G en quelques chiffres

Dimensions du noyau	Environ 3 km x 5 km (estimation)
Période de rotation	12,6 heures
Gravité au sol (par rapport à la Terre), en considérant une densité de 0,02	$< 1/10^{-5}$ Probablement complexe en raison de la forme et de la structure du noyau
Période orbitale	6,57 ans
Distance minimale au Soleil (périhélie)	194.10^6 km (1,3 ua)
Distance maximale au Soleil (aphélie)	860.10^6 km (5,73 ua)
Excentricité de l'orbite	0,63
Inclinaison de l'orbite	7,2°
Année de découverte	1969
Découvreurs	K. Churyumov & S. Gerasimenko

Image 2.14 - Vue d'artiste représentant Rosetta lors du survol de Mars. Illustration AOES Medialab, crédits ESA, 2001.

pas en Euros ou en kilogrammes, mais en années de voyage, temps nécessaire pour effectuer les survols planétaires. Ces manœuvres conduiront Rosetta à passer au voisinage de la Terre en 2005, 2007 et 2009 (Image 2.15), puis à quelques centaines de km de Mars en février 2007 (Image 2.14).
A l'occasion du coup de pouce martien, Rosetta disparaîtra derrière la planète rouge pendant plus de 20 minutes... pour un terrible suspens.
Après son troisième et dernier survol de la Terre, elle sera placée sur une orbite proche de celle de 67P/C-G. Sa vitesse atteindra alors quelques 145 000 km/h (40 km/s, CQFD). S'engagera alors une course poursuite de 5 années au cours desquelles la sonde, placée sur une orbite plus "basse" (à plus petite distance du Soleil) que la comète, devra rattraper celle-ci.
La rencontre avec la comète aura lieu en juillet/août 2014. Au cours des 6 mois suivants, la sonde ajustera sa trajectoire afin de se placer finalement en orbite à quelques kilomètres du noyau de la comète. La précision de l'approche est simplement stupéfiante. Elle doit être telle que la sonde doit être positionnée à une dizaine de mètres près, ceci à près de 900 millions de kilomètres de la Terre. La vitesse relative de la sonde par rapport à la comète sera très faible pour permettre une mise en orbite précise (inférieure à 5 km/h). Après un repérage et une cartographie de la surface du noyau, l'atterrisseur sera largué à 1 km d'altitude environ. Il se posera doucement (5 km/h) sur la comète pour mener à bien sa mission d'exploration.
Au cours de ces 10 années de voyage (Image 2.16), la sonde sera placée en "sommeil" pendant près de 70 % du temps. Elle ne sera activée que pour effectuer les manœuvres d'assistances gravitationnelles ou de corrections orbitales, mais aussi lors des survols rapprochés des astéroïdes.
En août 2014, à l'approche de la comète, Rosetta sera définitivement réactivée, afin d'ajuster sa trajectoire et de rejoindre celle qu'elle ne quittera plus, pour une mission en orbite de plus d'un an, jusqu'au passage de la comète au périhélie en décembre 2015.

Image 2.15 Vue d'artiste représentant Rosetta lors du survol de la Terre. Illustration AOES Medialab, crédits ESA, 2001.

Les grandes premières !

Sous de nombreux aspects la mission est une première, ce qui constitue un défi majeur pour les acteurs associés au projet. Pour apporter des informations inédites sur la composition du sol et de l'environnement de la comète, sur les processus de dégazage, ainsi que sur la structure et la composition du noyau, un certain nombre de prouesses techniques ont été réalisées.
Rosetta sera la première sonde utilisant des panneaux solaires à si grande distance du Soleil. La puissance lumineuse fournie par l'étoile à 800 millions de kilomètres ne représente en effet que 4% de celle qui est reçue au niveau de la Terre. D'une envergure de 32 m, ces générateurs solaires fourniront 400 W à la sonde lors du rendez-vous avec 67P/C-G, contre près de 6 000 W au voisinage de notre planète.
Cette mission sera la première à effectuer une mise en orbite d'une sonde autour d'une comète, dans le but de réaliser une étude de longue durée (2 ans d'observations à courte distance). La configuration au moment de la rencontre permettra également de suivre pour la première fois la métamorphose d'une comète, de l'aphélie jusqu'au périhélie.
La mise en orbite autour d'un astre si petit

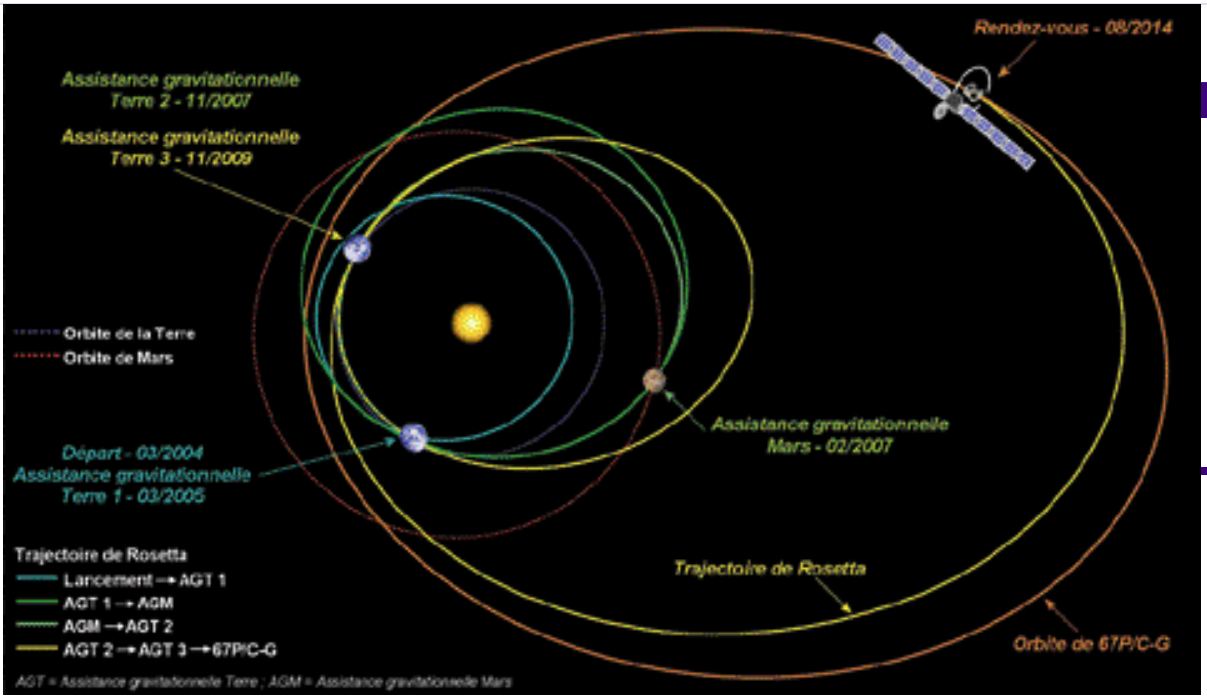
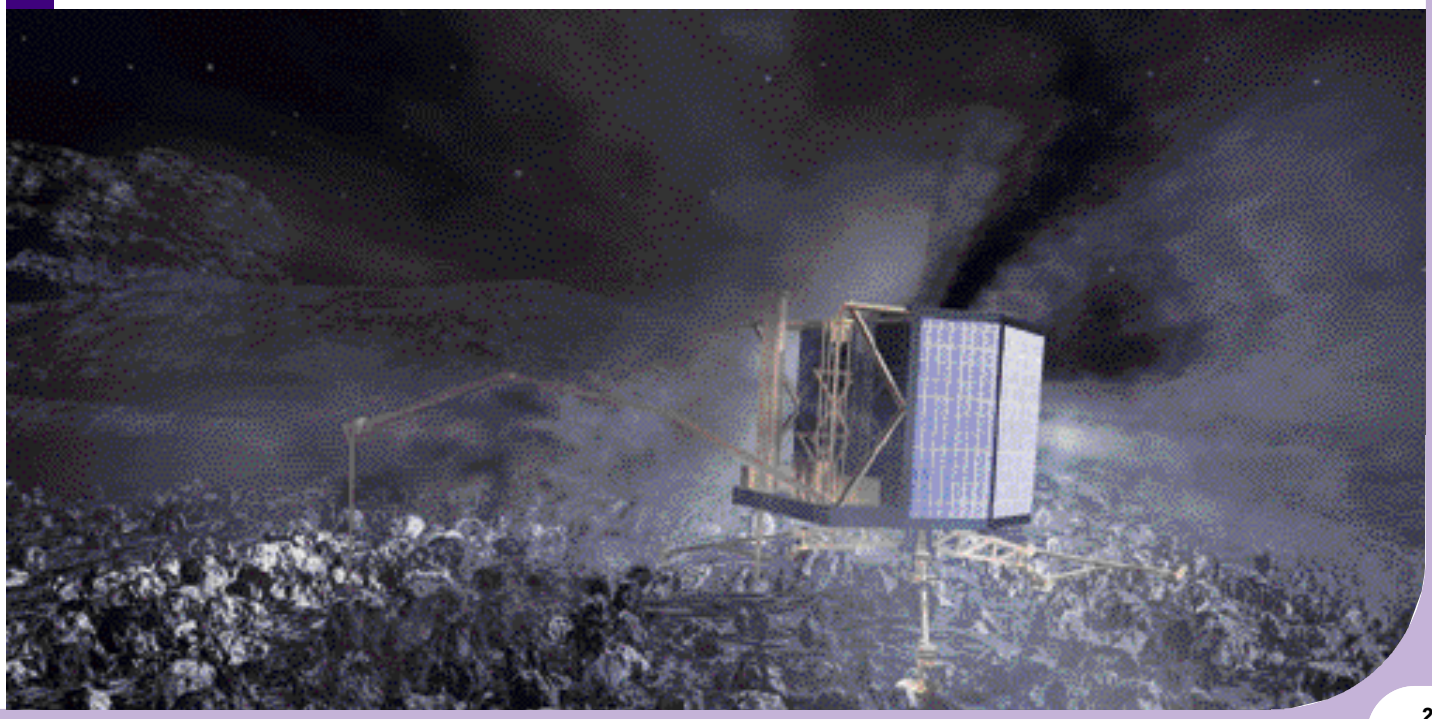


Image 2.16 La trajectoire de la mission Rosetta. Crédits CNES, illustration S. Rouquette

et peu massif est difficile. La gravité de la comète est si faible que la vitesse orbitale à 10 km d'altitude doit être de l'ordre de 10 km/h. Pour comparaison, la vitesse d'un satellite à 400 km au-dessus de la Terre est de l'ordre de 7,5 km/s. La vitesse de la sonde devra donc être parfaitement ajustée pour ne pas échapper à l'attraction de 67P/C-G ou s'écraser à sa surface.
L'atterrisseur sera le premier laboratoire scientifique à se poser en douceur sur le noyau d'une comète (Image 2.18). On peut citer deux raisons techniques majeures qui font de cet atterrissage un événement majeur. En raison de la faible gravité de la comète (la gravité au sol de 67P/C-G est au minimum 100 000 fois plus faible que celle de la Terre), l'atterrisseur devra s'ancrer à la surface pour ne pas risquer d'être éjecté. De plus, le noyau cométaire étant actif même à grande distance du Soleil, il peut dégazer à tout moment. La vitesse de descente de l'atterrisseur sera très faible et ce dernier risque d'être déstabilisé (éjecté ou mis en rotation) si un jet de gaz et de poussières se produit à son approche. Pour éviter cela, l'atterrisseur pourra être mis en rotation lente sur lui-même et sa vitesse de chute ajustée grâce à une tuyère placée sur le dessus

Image 2.18 - Vue d'artiste représentant l'atterrisseur à la surface du noyau cométaire. Illustration AOES Medialab, crédits ESA, 2001



Participation française à l'atterrisseur

PARTICIPATION	CONTENU
Management	Codirection du projet avec DLR (Allemagne) et ASI (Italie)
Analyses de missions	Responsabilité de l'analyse des phases de séparation,descente et atterrissage
Ingénierie atterrisseur	Co-ingénierie avec DLR (Allemagne)
Radio-communications	Responsabilité du sous-système assurant les communications entre l'orbiteur et l'atterrisseur
Sources d'énergie	Responsabilité du sous-système piles et batteries
Composante Sol	Responsabilité des études d'architecture globale du segment sol de l'atterrisseur Responsabilité du centre des opérations scientifiques et de navigation (SONC)
Opérations	Responsabilité des opérations du SONC

Tableau 1 :participations techniques à l'atterrisseur

du module. Elle sera également utilisée pour le plaquer au sol durant son ancrage. Il est utile de préciser que toute cette séquence sera automatique, le temps de communication entre la Terre et Rosetta (environ 80 min aller-retour) interdisant tout pilotage en direct.
Mais l'instrument n'est pas sauvé pour autant au moment ou il établit le contact avec la surface de la comète. Et cela en raison de la méconnaissance de la nature du sol. Le train d'atterrissage doit être souple pour amortir la chute, posséder des pieds larges, dans l'hypothèse où il rencontre un sol souple, mais pas trop en cas de sol rocailleux. Le choix a priori est difficile à faire. Partiriez-vous en randonnée équipés de raquettes pour marcher sur du granit ou de tennis pour arpenter des pentes neigeuses ? Le challenge a été de réaliser un compromis entre les diverses solutions, de façon à ce que l'atterrisseur et les instruments ne soient pas mis en péril quel que soit l'aspect de la comète.
A son retour dans le système solaire intérieur en décembre 2015, un curieux cortège visitera la proche banlieue de la Terre. 67P/C-G sera accompagnée de Rosetta qui aura alors terminé sa mission ! Elle s'approchera à 1,3 ua du Soleil, soit à moins de 200 millions de km de la Terre. Les scientifiques devront analyser les nombreuses données recueillies par l'orbiteur et l'atterrisseur afin de répondre aux questions essentielles concernant la formation du système solaire et l'apparition de la vie sur Terre. Cela ne suffira certainement pas pour ne laisser aucune interrogation sur ces deux grandes questions... Mais que de prouesses et de découvertes au cours des dix années de ce voyage unique !

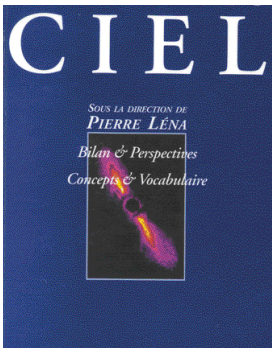
Glossaire

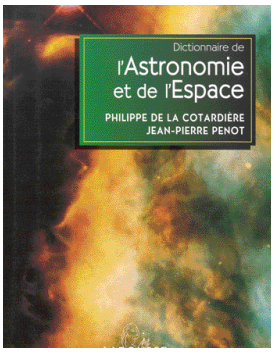
Chromatographie en phase gazeuse
Tout comme la spectrométrie de masse, il s'agit d'identifier les constituants d'un échantillon préalablement vaporisé. La séparation des différents composés n'est pas réalisée dans un champ électrique mais au travers d'un gaz appelé "véhicule" ou "gaz vecteur".
Récepteur hétérodyne
Il s'agit d'un récepteur de signaux modulés en amplitude dans lequel des signaux fournis par un amplificateur haute fréquence sont mélangés à ceux que fournit un oscillateur local pour obtenir des signaux de moyenne fréquence, qu'on amplifie.
Spectrométrie de masse
La spectrométrie de masse permet de mesurer la masse des molécules en transformant ces dernières en ions à l'état gazeux. Pour cela, un échantillon de matière est tout d'abord vaporisé et ionisé. Les ions formés sont ensuite triés en fonction de leur masse et de leur charge électrique, puis détectés.
Spectroscopie
La lumière solaire est polychromatique (plusieurs "couleurs"), depuis le domaine gamma jusqu'aux ondes radio. Dans certaines conditions (température, champ magnétique...) les éléments comme le sodium, le carbone ou l'oxygène absorbent une partie de ce rayonnement, ce qui permet de les identifier avec certitude. La spectroscopie nous renseigne donc sur la composition et la structure de la matière en analysant le spectre obtenu par la décomposition d'une onde électromagnétique émise par un objet (par exemple la lumière diffusée par la queue d'une comète). Cette décomposition peut être réalisée au moyen d'un prisme.
Stéréoscopie
La vision humaine est stéréoscopique. L'espace séparant les yeux permet de visualiser les objets en relief. En imagerie, il s'agit le plus souvent de créer des images qui restituent le relief, grâce à l'utilisation de deux appareils de prise de vue distants de quelques centimètres.
Tomographie
Procédé d'imagerie qui permet d'obtenir des images par plans d'un objet tridimensionnel. En médecine, la tomographie est utilisée pour l'imagerie des organes.

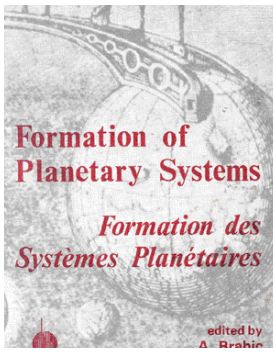
Sites internet

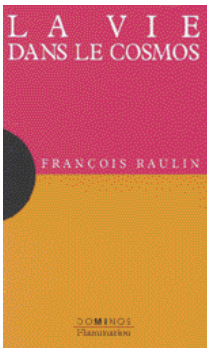
http://smsc.cnes.fr/ROSETTA/Fr/index.htm
http://sci.esa.int/rosetta/
http://www.cesr.fr/
http://www-lpg.obs.ujf-grenoble.fr/
http://www.ias.fr/cdp/Rosetta/welcome.html
http://www.lisa.univ-paris12.fr/GPCOS/Hc/H211.htm
http://www.imcce.fr/s2p/
http://webast.ast.obs-mip.fr/people/festou/
http://www.rosetta-lander.net/
http://comets.amsmeteors.org/
http://www.astrobale.com/rosetta.html
http://www.solarviews.com/french/edu/comets.htm
http://www.ac-reims.fr/datice/ecole/ia08/Eclipse_18-06-99/infinis.htm
http://www.ephe.sorbonne.fr/forums/roismages.htm
http://www.cam.org/~sam/billavf/nineplanets/comets.html
http://www.geospace-online.com/gol-fr/sav/arc/sav-arc-cometes1-fr.htm
http://stardust.jpl.nasa.gov/
http://www.culture.fr/culture/conservation/fr/methodes/chrom_01.htm

Bibliographie









Astéroïdes et comètes : des tas de cailloux, E. Asphaug, Pour la science, n°273, juillet 2000.
Astéroïdes et comètes : les menaces de la Terre, A. Carusi, Pour la science, n°212, juin 1995.
Cometary missions & french involvement, D.J.P. Moura, F. Rocard, J.P. Bibring, IAF, 1999.
Dictionnaire de l'astronomie et de l'espace, P. de la Cotardière, J.P. Penot, éditions Larousse, 1999.
Formation of planetary systems, ed. A. Brahic, Cépaduès éditions, 1982.
Hale-Bopp : véritable laboratoire naturel, S. Ruphy, Pour la science, n° 298, mai 1997.
L'avez-vous vue, la comète ?, F. Harrois-Monin, Ciel & Espace; Décembre 2000.
La vie dans le cosmos, F. Raulin, Flammarion Collection "Dominos", 1994.
Le nuage de Oort, P. Weissman, Pour la science, n° 253, novembre 1998.
L'évolution chimique et les Origines de la vie, Brack A. et F. Raulin, éditions Masson, Les briques de la vie, M. Bernstein, S. Sandford, L. Allmandola, Pour la science, n° 262, août 1999.
Les comètes, A.C. Levasseur-Regourd, Sciences et vie junior, juillet 2000.
Les comètes, M. Festou, La recherche, n°338, janvier 2001.
Les molécules des comètes, D. Bockelée-Morvan, J. Crovoisier, La recherche, n° 271, décembre 1994.
collection "Les grands Problèmes de l'Evolution", 1991.
Les sciences du ciel, sous la direction de P. Léna, éditions Flammarion, 1996.
L'esprit de famille chez les astéroïdes, D. Benest, P. Farinella, C. Froeschlé, La recherche, n° 275, avril 1995.
Rosetta, une odyssée de l'espace pour une comète, Espace magazine, n°6, novembre-décembre 2002.

INFORMATIONS PRATIQUES

Le Cahier de l'espace est un document de référence sur un thème de l'actualité du domaine spatial, réalisé à l'issue de chaque session des Mercredis de l'information. Il est diffusé dans un délai de quelques mois après la session de conférence.
Dans la même collection :
- Ailleurs... La vie ! Possible ou probable ? (Septembre 2002)

A paraître :
- Spot 5 et Météosat : des yeux en orbite (Février 2003)
- L'Homme extraterrestre (Mars 2003)
- Lanceurs et propulsion du futur (Avril 2003)

Depuis mai 1999, le département Education-Jeunesse du CNES propose un cycle de conférences sur les thèmes spatiaux.
Les Mercredis de l'information sont principalement destinées aux enseignants (primaire, secondaire ou supérieur) mais sont ouvertes à tous les acteurs de la communauté éducative.
Pour participer à l'Ecole de l'espace :
CNES, Département Education-Jeunesse
18, av. Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9.
Martine Langlade (05 61 27 47 94)

La Cité de l'espace (située au bord de la rocade Est de Toulouse, sortie n° 17) constitue le complément idéal à ces conférences. Les enseignants intéressés peuvent profiter de leur venue à Toulouse pour participer, le mercredi matin, à une visite gratuite de la Cité de l'espace. Renseignements auprès du service éducatif de la Cité de l'espace (05 62 71 56 12).

Le département Education-Jeunesse du CNES donne à tous les enseignants (de l'école au lycée), la possibilité de se former aux techniques spatiales et à l'utilisation des outils expérimentaux.
Pour toute information, contactez-nous au 05 61 27 31 14

Organisation des conférences :
Sébastien Rouquette
(département Education-Jeunesse, CNES),
Jean-Pierre Penot,
(département Publications, CNES).
Comité de rédaction
du Cahier de l'espace :
Denis Moura (CNES)
Francis Rocard (CNES)
Sébastien Rouquette (CNES)
Ont également participé à ce document :
Antonella Barucci (LESIA)
Jean-Pierre Bibring (IAS)
Philippe Chauvin (CNRS-INSU)
Jacques Crovisier (LESIA)
Pierre Drossart (LESIA)
Laurent Jorda (LAM)
Wlodek Kofman (LPG)
François Raulin (LISA)
Henri Rème (CESR)
Robert Sternberg (LISA)
Jean-Gabriel Trotignon (LPCE)

Pour retrouver les Mercredis de l'information, les Cahiers de l'espace et toutes les activités éducatives proposées ou soutenues par le CNES, visitez le site Internet jeunesse du CNES : www.cnes-edu.org

Une production **de la Direction de la Communication externe, de l'Éducation et des Affaires Publiques**, département Education-Jeunesse. **Avec la participation exceptionnelle du CNRS et le soutien de :**