

Mission Rosetta : l'Europe va débarquer sur une comète !

En mars 1986, la sonde européenne Giotto créait une petite révolution en photographiant le noyau de la comète de Halley à 600 km avant de reprendre du service, en 1992, pour aller à la rencontre de la comète Grigg-Skjellerup. La mission Rosetta, prévue pour un lancement en 2003, est encore plus ambitieuse : son module atterrisseur devrait se poser sur la comète Wirtanen et y effectuer des analyses in situ.

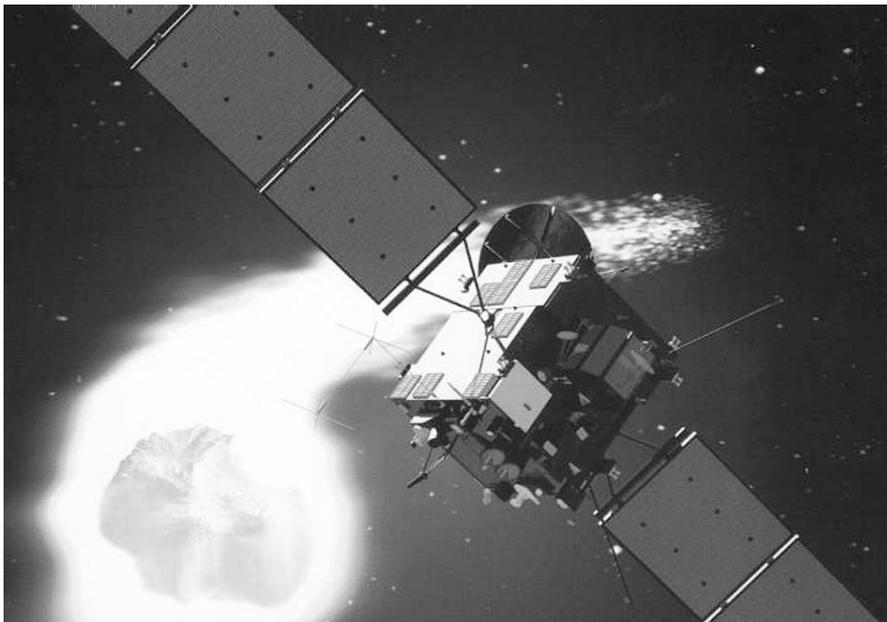
PHILIPPE JAMET

La créativité des scientifiques européens dans le domaine de l'astrophysique spatiale a été depuis longtemps démontrée et la caractéristique première de la démarche de l'Agence spatiale européenne consiste en une concentration judicieuse des moyens sur quelques objectifs précis. Dotés de moyens moins importants que ceux de la Nasa, les Européens ont souvent réussi à faire mieux (cas, par exemple, des satellites Hipparcos et Iso) ou à prendre une part prépondérante dans des programmes communs avec les Américains (cas notamment des programmes Ulysse et Soho). Dans le cas du programme Cassini-Huygens, c'est encore aux Européens qu'échoit la partie la plus prestigieuse de la mission : la traversée de l'atmosphère de Titan et l'atterrissage sur le satellite de Saturne. Ce dernier est un astre étrange et fascinant dont la caractéristique commune avec les comètes est d'être un objet très froid. Fait étonnant, et en dépit de sa température très basse, Titan semble être le lieu d'une chimie prébiotique complexe et certains des éléments détectés dans son atmosphère l'ont été aussi dans les émissions des comètes. Ainsi, les données mises en évidence en 2004 par la sonde Huygens intéresseront aussi les spécialistes de l'astronomie cométaire.

L'Esa semble donc avoir une certaine propension pour l'étude

des objets très froids et il ne faut pas s'étonner de ses succès dans le domaine de l'étude des comètes, comme ce fut le cas avec la sonde européenne Giotto.

On peut noter la faible présence des Américains dans ce domaine d'investigation même si le satellite ICE fut détourné de son orbite pour aller observer, en 1985, la comète Giacobini-Zinner et, en 1986, la comète de Halley. Pourtant, au début des années 80, ils souhaitaient s'investir plus activement à l'International Halley Watch et avaient encore en option le principe d'une sonde baptisée « Halley-Tempel 2 » qui devait survoler les deux comètes du même nom. La mise en œuvre de ce projet s'est traduit par un échec dû à une conception peut-être prématurée, la sonde devant épouser l'orbite de ces deux comètes et effectuer des manœuvres de rendez-vous. L'autre facteur qui a mis fin au projet fut la mauvaise volonté des décideurs qui ont refusé les crédits nécessaires au développement du moteur ionique qui avait été conçu pour cette mission. Cette position « en retrait » des Américains n'a pas eu toutefois trop de conséquences pour la communauté scientifique d'outre-Atlantique puisque des chercheurs du Department of Physics et du Department of Planetary Sciences de l'université d'Arizona ont participé au dépouillement des données de Giotto et des deux sondes soviétiques Vega 1 et Vega 2. Ce fut également le cas pour des équipes de l'Enrico Fermi Institute de Chicago, du Jet Propulsion Laboratory, de l'université du Texas et du



C'est après un long parcours de 5,3 milliards de kilomètres que la sonde Rosetta rencontrera la comète Wirtanen à 675 millions de kilomètres du Soleil.

Los Alamos National Laboratory.

L'Europe, grâce à Giotto, a donc pris une certaine avance dans le domaine des études cométaires et la sonde, outre Halley en mars 1986, a également observé, en 1992, la comète Grigg-Skjellerup dans le cadre du programme « Giotto Extended Mission ». Ce survol si proche de deux noyaux cométaires (Giotto passa à 600 km de Halley et à 200 km de Grigg-Skjellerup) reste encore unique dans les annales de l'astronautique. Il en est de même pour ce qui concerne l'hibernation prolongée et la réactivation de la sonde. Giotto fut « éteinte » après la traversée de la comète de Halley et mise en léthargie une première fois, pendant quatre ans, jusqu'à ce qu'une première réactivation soit effectuée pour vérifier le bon fonctionnement de ses instruments avant de l'orienter vers Grigg-Skjellerup. Sur les onze instruments de Giotto, huit ont survécu à la traversée de la queue de poussières de Halley. On regretta surtout la panne de la caméra HMC ainsi que de l'instrument NMS qui aurait été bien utile pour l'appréciation du rapport hydrogène-deutérium de Grigg-Skjellerup. La connaissance de ce rapport permet aux astrophysiciens de voir si les matériaux cométaires ont la même composi-

tion que celle, théorique, de la nébuleuse primitive. La vérification a été concluante pour Halley mais pas pour la seconde comète. Après cette première réactivation, Giotto a donc été mise en hibernation une seconde fois puis réactivée pour sa nouvelle mission. Dans le cadre de celle-ci, Giotto fut aussi la première sonde à revenir de l'espace lointain et à utiliser le levier gravitationnel de la Terre pour être réorientée vers une nouvelle comète. Il a même été envisagé de tourner la sonde vers une troisième comète mais ses réserves d'ergols n'étaient plus du tout suffisantes pour envisager une telle opération. D'autre part, son système de communications et ses systèmes de calcul étaient dépassés par l'évolution technologique, ce qui aurait rendu difficile le maintien des liaisons avec la Terre.

L'apport scientifique de Giotto

L'importance du pari de l'International HalleyWatch qui, outre Giotto, a mobilisé quatre autres sondes (les deux sondes soviétiques et deux sondes japonaises Sakigake et Suisei, ces dernières lancées par l'agence

spatiale ISAS), deux satellites (ICE et IUE) et de nombreux télescopes au sol, réside surtout dans le besoin des scientifiques de connaître ce qui s'est passé dans notre système solaire il y a 4,5 milliards d'années. Les comètes, dont la plupart d'entre elles passent l'essentiel de leur temps dans les zones externes et froides au-delà du système planétaire, sont des résidus fossiles de la « nébuleuse primitive » qui, à partir d'un nuage sombre de poussières et de molécules en contraction, a donné naissance à notre étoile et à son cortège de planètes. Fraction importante des cométésimaux dont un certain nombre a participé au processus d'accrétion des planètes, les comètes survivantes actuelles n'ont, quant à elles, pas participé à ce processus mais ont gardé *intacts* à travers les âges les éléments dont était composée cette nébuleuse primitive. Il est donc crucial pour les astrophysiciens de pouvoir aller observer les comètes aussi proche que possible de leur noyau, à la fois quand celui-ci est inerte et gelé, à grande distance du Soleil, et à la fois lorsque le rapprochement du Soleil et l'intensité croissante de la chaleur et du vent solaire font que ce noyau devient rapidement un émetteur de poussières, de gaz et de plasma.

Giotto a pour la première fois permis d'étudier les émissions de gaz et de poussières qui caractérisent une comète au niveau du périhélie de son orbite, à une distance relativement proche de son noyau, soit 600 km. En comparaison, les deux sondes soviétiques sont passées à environ 9 000 km et les deux sondes japonaises, qui visaient surtout à étudier l'onde de choc créée en avant du noyau par la rencontre du vent solaire avec le plasma cométaire, sont passées beaucoup plus loin. Grâce à la caméra HMC braquée sur la comète de Halley, Giotto a été la première sonde à photographier un noyau cométaire. Halley était une comète particulièrement intéressante à étudier car avec ses paramètres orbitaux (orbite inclinée à 162 ° et décrite en 77 ans), la comète ne subit le phénomène de dégazage, dû à la chaleur solaire, que pendant quelques mois. Cela n'est pas le cas pour de nombreuses comètes à courte période orbitale, ne dépassant pas 5 ou 6 ans, qui passent régulièrement un temps assez long

à distance proche du Soleil, dans les parties internes du système planétaire. En conséquence de cause, ces comètes ont perdu davantage de leurs éléments volatils que Halley dont la masse, d'après les données Giotto, est évaluée à 100 milliards de tonnes. Une des surprises, suite à la traversée de la queue de poussières de Halley, fut la taille du noyau : alors que les hypothèses lui accordaient tout au plus un diamètre de 5 à 6 km, les clichés pris par la caméra HMC ont révélé que Halley se présentait comme un « patateïde » orienté sur deux axes, un axe majeur d'environ 15 km et un axe mineur de 7 à 10 km. La longueur de l'axe mineur reste toutefois incertaine car, lors du passage de la sonde, celui-ci était directement orienté vers le Soleil et la face exposée à celui-ci était en partie obscurcie par les émissions de poussières. Une autre des caractéristiques surprenantes de Halley détectée par la caméra a été la découverte de cratères d'impacts, de « vallées » et de « collines » dont l'une d'entre elles avait une hauteur de 900 m. Il apparaît clairement que les noyaux cométaires sont bien plus complexes qu'on ne le pensait. Autre surprise, et qui explique pourquoi les modèles avaient sous-estimé la taille de Halley, son noyau absorbe de façon intense la lumière solaire et son *albedo* (proportion de lumière réfléchie), estimé à 2 à 4 %, est encore plus bas que celui des objets connus les plus sombres du système solaire. Nous ne possédons pas encore de données sur d'autres comètes pour faire la comparaison. Les missions d'observation de Halley représentent donc une césure par rapport à tout ce qui avait été fait auparavant dans le domaine de l'étude des comètes. Giotto a pour la première fois permis des investigations sur les gaz et les poussières au voisinage d'une comète et donc de sa « coma » (l'enveloppe de gaz diffus entourant le noyau de la comète) en même temps que les prises de vues du noyau.

Pour la première fois aussi, les astrophysiciens ont pu effectuer des analyses, à proximité d'un noyau cométaire, pour étudier ses paramètres physiques et sa chimie « exotique » sur lesquels les phénomènes de queue de poussières et de queue de plasma vont nous donner des indications. La formation de ces queues



Noyau de la comète de Halley. La sonde Giotto a révélé que le noyau de Halley possédait un albédo de 2 à 4 %, ce qui en fait l'objet connu le plus sombre du système solaire.

est la caractéristique la plus visible quand une comète traverse la région du système planétaire intérieur. L'aspect d'une comète est très variable et dépend de sa distance par rapport au Soleil. Les phénomènes de dégazage sont bien évidemment la résultante du passage des comètes à une distance relativement proche du Soleil qui rend ces comètes « actives ». Lorsque ces comètes s'éloignent de nouveau du Soleil, le dégazage disparaît progressivement et le noyau redevient inactif. A chaque fois, toutefois, la comète, piégée par les forces de gravitation exceptionnelles de notre Soleil, perd une partie de ses éléments volatils. Halley, du fait de son orbite de 77 ans, possède encore une bonne réserve de ces éléments et serait donc un objet intéressant à étudier *in situ*. Pour ce faire, il nous faudrait progresser dans le domaine des techniques en astronautique et effectuer des recherches sur les moteurs à principes physiques nouveaux car les paramètres orbitaux de Halley la rendent difficile d'accès pour une mission de débarquement avec des méthodes conventionnelles. En 1986, on ne pouvait espérer mieux que ce que fit Giotto et la vitesse propre de Halley, l'inclinaison de son orbite et la trajectoire de la sonde, firent que cette dernière traversa la queue de

poussières à la vitesse résultante de 64 km/s. Ce sont les poussières éjectées à partir du noyau, et dont la vitesse s'ajoutait à celle de la sonde, qui furent fatales pour la caméra HMC. La plupart des instruments ont parfaitement fonctionné et la caméra, avant de rendre l'âme et outre l'observation du noyau sombre, nous a aussi permis de localiser géographiquement des jets intenses et spectaculaires de gaz et de poussières sur la partie de la comète exposée au Soleil. On a pu parfaitement observer des jets brillants dans la direction du Soleil ainsi que deux zones d'émission opposées sur les côtés de la comète mais toujours sur la face tournée vers l'astre du jour. Cette découverte a montré que le modèle cométaire prévoyant un dégazage du noyau uniforme sur toutes les régions exposées de la comète ne correspondait pas à la réalité. Grâce à Giotto, on a pu constater que la totalité des émissions de gaz et de poussières concernait seulement quelques régions précises. Evidemment, cela pose le problème de la *nature* de la croûte de la surface cométaire et il se peut que celle-ci soit à la fois plus épaisse et plus résistante que prévu. Il est fort possible aussi qu'elle ne soit pas répartie de façon homogène et identique autour du noyau cométaire. Les

jets de gaz et de poussières apparaîtraient seulement dans les parties où l'épaisseur est la plus faible. Sur la nature de cette carapace très fragile, notons la théorie des scientifiques français Bibring et Langevin pour lesquels il y aurait une certaine amorphisation de la surface des noyaux cométaires sous l'influence du rayonnement UV solaire et du rayonnement cosmique.

Si l'on excepte la diversité géographique des sources d'émission à la surface de la comète et la nature très sombre du noyau, les résultats de Giotto tendraient à accréditer la compatibilité de la comète de Halley avec le modèle de la « boule de neige sale » élaboré par l'astrophysicien américain Fred Whipple. Avant d'être touché comme la caméra HMC par les impacts de poussières venues de la comète, le spectromètre NMS (Neutral Mass Spectrometer) a permis de révéler que l'eau était la molécule mère prédominante de la comète de Halley avec une émission sous forme de vapeur. D'autres substances, contenues au départ sous forme de « glaces exotiques », sont également apparues lors de la phase de dégazage de la comète, parmi lesquelles le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'ammoniac (NH_3). La mesure du dégazage de ces substances a permis d'établir des ratios comparatifs, pour chacune d'entre elles, à la quantité d'eau et, selon le scientifique suisse Hans Balsiger (investigateur principal sur Giotto), l'émission de gaz de Halley contenait 80 % d'eau, 10 % de monoxyde de carbone, 3 % de dioxyde de carbone, 2 % de méthane, 1,5 % d'ammoniac et 0,1 % d'acide cyanhydrique. Pour ce qui concerne les jets de poussières de Halley, les premières investigations sérieuses ont commencé à plusieurs centaines de millions de kilomètres du noyau de la comète. Les analyses des spectres observés par l'instrument PIA-DMS (Dust Mass Spectrometer) ont permis de détecter la présence des éléments H, C, N, O, Na, Mg, Si, K, Ca et Fe, et de révéler que la majorité des poussières sont riches en éléments comme le magnésium, le fer et le silicium. Cela semble indiquer la présence au sein du matériau cométaire, en plus des glaces d'eau et de divers types exotiques, de parties dures qui ne sont pas uniformément réparties avec les éléments les plus

légers.

Ce qui a aussi surpris les scientifiques, c'est la violence des impacts de poussières qui ont été détectées pour la première fois grâce à l'instrument DID (Dust Impact Detection System) alors que Giotto se trouvait à environ 290 000 km du noyau. De nombreuses observations tendraient à prouver que les queues de poussières des comètes peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de kilomètres. Celles-ci resteraient sous forme d'essaims dans la zone des planètes intérieures alors que les comètes génitrices de ces poussières, et ayant subi beaucoup de dégazage, se retirent sur les marges externes du système solaire ou vers la zone des grandes planètes. Ces essaims de poussières cométaires viennent notamment, et régulièrement, se dissocier dans les hautes couches de l'atmosphère terrestre sous la forme d'« étoiles filantes ».

Les ions sont des atomes ou des molécules ayant perdu ou gagné un ou plusieurs électrons à la suite d'une excitation qui, dans le cas des comètes, est produite par l'augmentation de la température et le rayonnement UV solaire. On ne s'étonnera donc pas que Giotto ait mis en évidence de nombreux ions caractéristiques d'éléments qui possèdent chacun une vitesse d'ionisation. Pour chaque élément, ce phénomène d'ionisation se produit à une distance spécifique parcourue dans l'espace par rapport au noyau cométaire.

Autre phénomène intéressant, la rencontre du plasma cométaire et du vent solaire produit une onde de choc comparable à celle qui existe entre ce même vent solaire et la magnétosphère terrestre. Du côté de cette onde de choc, les deux sondes japonaises ont mis en évidence les ions C^+ , H_2O^+ , CO^+ et S^+ , tandis que, sur la partie opposée, Giotto a détecté les ions H^+ , He^+ , C^+ , O^+ , OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+ , CO^+ et S^+ . Autre découverte intéressante mais intrigante : un grand nombre d'éléments légers et de molécules, une fois éjectés du noyau de Halley, restent longtemps intacts malgré la chaleur et le rayonnement solaire, comme s'ils étaient collés entre eux ou avec les poussières par une substance invisible. Celle-ci pourrait être la fameuse « substance jaune » mise

en évidence en astrophysique de laboratoire, et à l'université de Leyden par les astrophysiciens néerlandais Mayo Greenberg, Allamandola et Baas, lors de simulation des conditions régnant dans les nuages interstellaires. On trouve en effet beaucoup d'analogies entre ceux-ci et les comètes, et les travaux de Giotto et d'Iso ont parfaitement confirmé que ces comètes étaient bien constituées des mêmes matériaux que ces nuages et la nébuleuse primitive ayant donné naissance au système solaire. Comme le dit Mayo Greenberg : « *Le noyau d'une comète est un véritable réservoir basse température de grains interstellaires pré-solaires.* » Ce qui explique pourquoi les spécialistes de l'astrophysique interstellaire s'intéressent aussi à l'astronomie cométaire.

L'intérêt de l'astronomie cométaire in situ

Les recherches effectuées en 1986 sur Halley et en 1992 sur Grigg-Skjellerup ont certes fait beaucoup progresser l'astronomie cométaire et nous bénéficions aussi de la récupération dans la stratosphère d'échantillons cométaires apportés par les essaims de poussières que laissent derrière elles les queues des comètes. Toutefois, le niveau de notre ignorance est grand et, malgré Giotto, nous sommes encore incapables de dire de quoi est composée la croûte cométaire ou d'élaborer des modèles quant à sa structure et à son épaisseur. Nous possédons quelques indications en ce qui concerne la composition interne grâce à l'analyse par Giotto des jets de gaz et de poussières de Halley, mais les astrophysiciens soupçonnent qu'il y a ici des molécules plus complexes dont n'apparaissent que les composants dissociés par le rayonnement solaire. Il n'y a pas non plus unanimité sur le modèle explicatif cométaire dit de « Whipple » et Mayo Greenberg, toujours lui, a élaboré un autre modèle où le noyau d'une comète serait constitué de 30 % d'eau en volume, de 20 % de substance jaune, de 8 % de poussières de silicates, de 3 % de carbone pur, les 40 % restants étant formés de molécules comme CH_4 , NH_3 , CO , CO_2 , H_2CO et de radicaux

↳ comme HCO ou OH. Toujours selon Greenberg, une fraction importante du carbone cométaire serait contenue dans la substance jaune mais il existerait globalement un rapport d'équivalence en carbone entre les comètes et les nuages interstellaires. Il est donc parfaitement légitime que les scientifiques souhaitent porter les investigations plus poussées en

effectuant des carottages *in situ*. L'idéal serait de pouvoir effectuer des missions de débarquement sur plusieurs comètes différentes car celles-ci ne sont pas toutes structurées selon un modèle unique. Nous le soupçonnions déjà suite aux travaux des scientifiques néerlandais et on l'a confirmé, par exemple, quand Giotto a décelé des

d'importantes différences entre les surfaces respectives de Halley et de Grigg-Skjellerup. Il existe donc une grande diversité de comètes : le noyau d'une comète peut varier de un à plusieurs dizaines de kilomètres (cas de Hale-Bopp) mais, selon Michel Maurette et Dale Cruishank, il pourrait exister de gros noyaux cométaires de 100 à 150 km ! Dans

D'où viennent les comètes ?

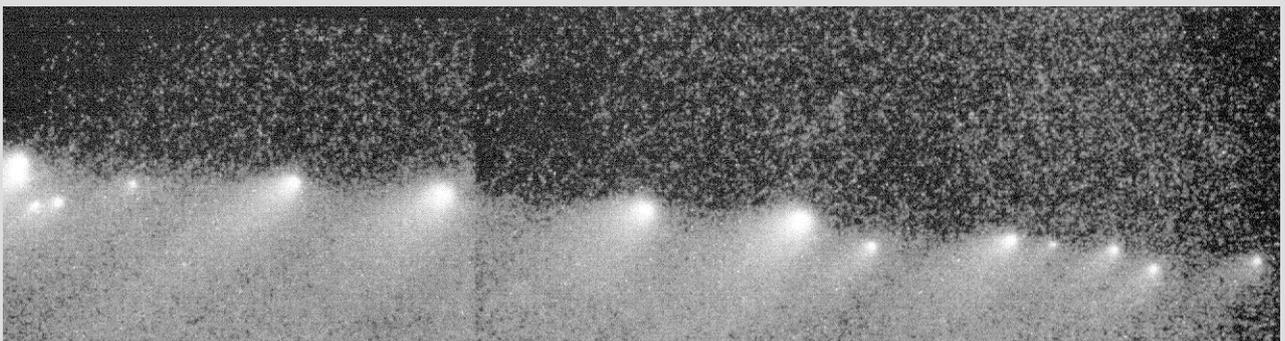
Toutes les comètes connues que l'on voit à intervalles réguliers et celles que l'on détecte comme « par surprise » (cas de la comète Hale-Bopp en 1997) sont des objets glacés dont l'orbite resserrée, ou en voie de resserrement, vient de leur *capture* par l'attraction gravitationnelle du Soleil ou des planètes géantes gazeuses comme Jupiter. Cette grosse planète joue un rôle certain dans la perturbation de l'orbite de nombreuses comètes et l'astronome anglais Edmund Halley (1656-1742) fut le premier à soupçonner le rôle désormais prouvé de Jupiter. L'exemple type et extrême de ce phénomène nous a été donné en février 1994 par la destruction en onze fragments de la comète Shoemaker-Levy sous l'influence des forces gravitationnelles intenses de la planète géante, et leur collision avec cette dernière (voir photo ci-dessous).

En 1950, l'astrophysicien néerlandais Jan Oort, développant de façon indépendante une hypothèse qui avait été déjà évoquée en 1932 par Ernst Öpik, propose une théorie aujourd'hui acceptée unanimement sur le lieu d'origine des comètes. Oort, se basant sur l'observation des orbites des comètes à longue période et sur la quantité de gaz qu'elles émettent lorsqu'elles se rapprochent du Soleil, a imaginé que ces comètes viendraient d'une zone lointaine, située bien au-delà des planètes géantes gazeuses à 50 000 UA (l'unité astronomique est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, soit 149 millions de kilomètres) et dénommée depuis « nuage de Oort ». Les comètes, qui étaient beaucoup plus nombreuses lors des premières centaines de millions d'années d'existence de notre système solaire et participaient au phénomène de bombardement intense des corps planétaires, sont en fait des comètes « résiduelles » qui n'ont pas, contrairement à d'autres, participé au processus de formation des planètes par accrétion. Selon la théorie la plus couramment admise, la majorité des comètes du nuage de Oort auraient été formées dans la région des grandes planètes extérieures et éjectées vers les marges externes de notre système planétaire par les intenses forces

gravitationnelles de ces planètes, selon un principe proche de celui du levier gravitationnel qui permet d'accélérer les sondes.

De temps à autre, lors de son parcours sinusoïdal par rapport au plan médian galactique, notre système solaire rencontre des nuages de molécules et de poussières interstellaires. L'onde de choc créée par cette rencontre pourrait contribuer à « désorbiter » certaines comètes du nuage de Oort et à leur faire adopter une trajectoire de capture vers le système planétaire intérieur. L'hypothèse du nuage de Oort, sorte de boule sphérique contenant des milliards de corps glacés entourant à grande distance le système solaire, serait confortée par le fait que les comètes à longue période semblent « venir de partout », de toutes les directions et sous tous les angles.

Pour ce qui concerne les comètes à courte période, qui décrivent des orbites faiblement inclinées et assez resserrées allant de 5 à 20 ans, il se peut que certaines, déjà fortement dégazées par des passages multiples et répétés à proximité du Soleil, soient d'anciennes comètes à longue période. Leur trajectoire aurait été peu à peu « pliée » par les forces gravitationnelles des grandes planètes avec, pour conséquence, qu'elles sont devenues captives de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Toutefois, nombre d'astrophysiciens pensent que ces comètes viendraient de ce que l'on appelle la « ceinture de Kuiper » qui s'étendrait de l'orbite de Neptune (située à 30 UA du Soleil) jusqu'à 150 UA. Depuis 1992, date de la découverte de l'objet QBI, plusieurs dizaines de ces objets « transneptuniens » ont été découverts, notamment par l'équipe de l'astrophysicien Dale Cruishank. La plupart de ces objets sont relativement gros et certains présentent des aspects « ambigus » en revêtant à la fois les caractéristiques de comètes et celles d'astéroïdes. Fait important, Soho a révélé qu'un nombre important de comètes à courtes périodes pénétraient dans le système planétaire intérieur et pouvaient se trouver sur des orbites de collision avec le Soleil.



le domaine du surprenant, notons l'opinion de l'astrophysicien Michel Combes selon laquelle certains astéroïdes dits « Earth Grazers », et qui coupent régulièrement l'orbite terrestre à des distances relativement proches de nous, ne sont que des noyaux de comètes dégazées. Il existe même des objets « ambigus » revêtant à la fois les caractéristiques des astéroïdes et des comètes. C'est le cas du gros objet Chiron (180 km de diamètre), découvert en 1977 par Charles Kowal, et dont la surface est très sombre sans que l'on puisse dire si elle est rocheuse ou poussiéreuse. Classé au moment de sa découverte comme astéroïde, Chiron a, en 1989, développé une coma comparable à une comète et son orbite curieuse se situe entre Jupiter et Neptune. Il serait souhaitable d'envoyer une mission internationale d'atterrissage sur Chiron mais les scientifiques devront attendre un certain temps et se contenter d'objectifs plus accessibles.

Les Européens n'ont pas attendu les réflexions communes avec les Américains, dans le cadre du projet CNSR (Comet Nucleus Sample Return), pour envisager une mission visant à approcher encore de plus près une comète. Il fut un temps question du projet Caesar (Comet Atmosphere and Earth Sample Return) basé sur la mise au point d'une sonde de type Giotto de deuxième génération et faisant appel à une fusée Ariane 4. Caesar serait passé plus près que Giotto du noyau d'une comète et aurait collecté des échantillons de poussières et de gaz cométaires avant qu'un système de capsule ne permette leur retour sur Terre à des fins d'analyse. La sonde aurait d'abord été placée sur une orbite solaire se trouvant sur la trajectoire de rencontre avec une comète. Plusieurs comètes furent envisagées pour cette mission, comme Boethin, HMP (Honda-Mkros-Paj-dusakova) et Churyunov-Gerasimenko. Le projet ne fut pas concrétisé à la fois pour des raisons budgétaires et aussi parce que mûrissait dans l'esprit des spécialistes de l'Esa Marcello Coradini, M. Verdant et G.H. Schwehm ce qui allait devenir le projet Rosetta.

Rosetta est la troisième pierre angulaire du programme scientifique Horizon 2000 de l'Esa et se compose d'un orbiteur et d'un atterrisseur sur noyau cométaire dont les maquettes ont été présentées en juillet 1999 par



L'atterrisseur de Rosetta qui devra se poser sur la comète Wirtanen en 2011.

Roger-Maurice Bonnet, directeur des programmes scientifiques. Le programme Rosetta a subi quelques retards pour ce qui concerne son développement et l'objectif cométaire visé a fait l'objet de plusieurs changements. Dans un premier temps destinée à rendre visite à la comète Schwassmann-Wachmann 1, qui orbite entre Jupiter et Saturne en 16,1 années et qui avait été aussi envisagée pour le projet CNSR, Rosetta a ensuite eu comme objectif la comète Churyunov-Gerasimenko puis la comète HMP.

A l'époque où il fut décidé de viser HMP, les responsables de l'Esa justifiaient ce choix par des contraintes de temps et financières : leur argument était que l'orbite de HMP était particulièrement lente et qu'il était, en conséquence, parfaitement possible d'effectuer une seconde tentative dans le cas où un incident contraindrait à repousser la date de lancement. HMP semblait donc tenir la corde en tant qu'objet d'étude du projet Rosetta mais ce dernier glissa dans le temps tandis que l'objectif changeait, une fois de plus, et cette fois-ci en faveur de la comète 46P-Wirtanen, petit noyau cométaire assez dégazé et qui revient tous les cinq ans et demi dans la zone du système planétaire intérieur. L'Esa a justifié son choix par le fait que Wirtanen possède une orbite plus facile à atteindre que la plupart des comètes. Notons aussi que Wirtanen, comme d'autres comètes, a vu son orbite modifiée il y a quelques années par les forces

gravitationnelles intenses de Jupiter. Captive et à courte période, Wirtanen, à cause de ses multiples passages dans le système planétaire intérieur, a perdu une grande part de ses glaces et de ses éléments volatils. Son dégazage est donc peu actif et comporte moins de risques pour les instruments qu'une comète plus active comme Halley. La leçon de Giotto a été retenue par l'Esa et aussi par les Américains pour leur projet Deep Impact. Dans ce dernier cas, la sonde, après avoir lancé un projectile sur la comète Tempel 1 pour y créer un nuage de poussières, restera prudemment à 700 km du noyau. Pour ce qui concerne Rosetta, on peut comprendre le choix de l'Esa pour préserver intacts les instruments de l'orbiteur et de l'atterrisseur mais il y a tout de même un *inconvenient* à ce choix : il existe un risque que Wirtanen, qui a largement dégazé et perdu une grande part de ses éléments volatils, ne soit pas un objet totalement représentatif d'un milieu cométaire, puisque les comètes de type « Whipple » restent largement majoritaires. Il nous semble que le choix d'une comète à longue période, moins érodée, aurait été plus intéressant mais, dans ce cas, le niveau technologique nécessaire dépasse largement les compétences européennes en la matière. Rien que pour Wirtanen, il a fallu faire appel à des solutions, bien éprouvées certes, mais qui relèvent d'un certain funambulisme technologique. En effet, la sonde sera lancée de Kourou par une fusée Ariane 5 en janvier 2003 mais le vol fera appel à la technique bien connue du « levier gravitationnel », étant donné que la puissance du lanceur européen est insuffisante pour injecter la sonde spatiale sur une orbite directe de rencontre avec la comète. Une fois séparée de son lanceur et échappée à la gravitation terrestre, Rosetta utilisera son système de propulsion pour se diriger vers Mars qu'elle atteindra en mai 2005. La sonde utilisera la gravitation de Mars pour gagner de la vitesse et effectuera un retour vers la Terre qu'elle « frôlera » à deux reprises, en mai 2005 et octobre 2007. La manœuvre de rendez-vous avec la comète sera effectuée le 27 novembre 2011 et, pendant plus de cinq mois, Rosetta naviguera de concert avec Wirtanen et effectuera ses premières mesures

et ses premières photographies. Ce n'est que le 20 mai 2012 que sera effectuée l'approche finale avec Wirtanen suivie, le 28 mai 2012, d'une mise en orbite à moins de 2 km de la comète. Entre-temps, Rosetta aura survolé les astéroïdes 4979-Otawara en juillet 2006, et 140-Siwa en juillet 2008. Otawara est un objet de moins de 20 km de diamètre mais Siwa est plus conséquent avec un diamètre de 110 km.

Entre janvier 2003 et novembre 2011, il se sera donc passé presque neuf ans avant que la sonde cométaire européenne atteigne son objectif et après une odyssée spatiale de 5,3 milliards de kilomètres. Il faut souhaiter que les scientifiques et les ingénieurs de l'Esa réussissent ce formidable pari mais l'exemple du projet Rosetta nous montre combien est *indispensable le nucléaire dans l'espace*. La comète Wirtanen est une comète à courte période dont l'orbite n'est pas très inclinée par rapport au plan de l'écliptique correspondant au plan orbital terrestre. En dépit de cela, et en utilisant des moyens classiques de propulsion chimique, il nous faut effectuer un véritable exercice d'équilibriste qui implique qu'une sonde puisse passer plus de neuf ans dans l'espace sans aucun dommage pour elle-même et ses instruments. Un engin à propulsion électronucléaire, du type de ceux imaginés par le Pr Ernst Stühlinger, nous mettrait à deux ou trois ans d'une comète scientifiquement plus intéressante que Wirtanen, avec l'avantage que sa poussée continue nous permettrait de pouvoir franchir l'important Delta V propulsif qui sépare le plan orbital terrestre du plan orbital souvent excentré sur lequel se meuvent beaucoup de comètes à longue période. Pour ce qui concerne la fourniture d'énergie à une telle sonde, la solution nucléaire (générateurs radio-isotopiques RTG, petit réacteur nucléaire) nous permettrait également de nous passer des panneaux solaires gigantesques dont est munie Rosetta. Lorsqu'elle rencontrera Wirtanen, Rosetta se trouvera à 675 millions de kilomètres du Soleil, dans une semi-obscurité, et ne recevra du Soleil que 5 à 6 % de la densité de puissance transmise au niveau de l'orbite terrestre. D'où la taille de ses panneaux solaires lesquels, déployés, feront 32 m !

Au moment où Rosetta effectuera sa rencontre avec la comète, celle-ci se détachera faiblement du fond du ciel et sera encore inactive à cause de sa distance considérable par rapport au Soleil. Cela constituera une date historique pour l'Esa car ce sera la première fois qu'une sonde observera d'aussi près un noyau cométaire inerte. Même si Wirtanen n'est peut-être pas l'objet idéal, à cause des risques d'altération de son matériau, l'étude de son état devrait nous permettre de voir de quel type de matériau elle est composée. Les spécialistes de l'Esa pensent que celui-ci est contemporain de l'époque de la nébuleuse primitive qui donna naissance à notre système solaire. Même en grande partie dégazée et ayant perdu une grande part de ses éléments les plus volatils, Wirtanen reste un objet intéressant qui doit avoir gardé une part de ce matériau comme toutes les comètes résiduelles actuelles.

L'étude des comètes est la seule à pouvoir nous permettre de connaître la nature de ces matériaux originels car ces derniers ont soit disparu soit été transformés sur les planètes, malgré le fait que des milliards de comètes ont participé à leur processus d'accrétion. Sur les planètes (en particulier les planètes telluriques comme Mercure, Vénus, la Terre et Mars), les forces de gravité, la chaleur des planètes nouvellement formées ont entraîné la destruction d'une grande partie des éléments les plus légers. Les comètes résiduelles actuelles sont les seuls astres du système solaire à les avoir conservé intacts à cause de leur petite taille et de leur basse température. Cette conservation était impossible pour les planètes à cause, d'une part, des processus d'érosion, chimiques et géologiques, et, d'autre part, des premiers processus biologiques dont l'action a permis de doter la Terre d'une atmosphère oxygénée.

Les paramètres techniques et orbitaux choisis permettront à la sonde, qui voyagera de concert avec la comète dans un premier temps puis se mettra en orbite à une distance inférieure à 2 km, d'observer la phase de *réveil* de Wirtanen lorsqu'elle deviendra active à cause de la chaleur et des UV solaires. La surface de la comète devrait changer d'aspect graduellement et, en

raisonnant de façon analogique avec Halley, on suppose que les jets de gaz et de poussières devraient apparaître à des endroits précis et non de façon uniforme. Il faut toutefois tenir compte du fait que Wirtanen est une comète à courte période qui a effectué de nombreux passages à proximité du Soleil et, de ce fait, sa carapace est peut-être moins épaisse que celle de Halley. Pour la première fois, les scientifiques auront l'opportunité de suivre *en direct* l'évolution d'une surface cométaire en fonction de ses diverses distances par rapport au Soleil. Autres avantages, et notamment par rapport à Giotto, Rosetta pourra détecter les poussières et les molécules de gaz dès le début de la phase de dégazage avant que celles-ci ne subissent les premiers processus de dissociation sous l'effet de la chaleur. Certains scientifiques pensent que les comètes contiennent des molécules très complexes de même nature que celles contenues dans les nuages interstellaires et qu'elles ont apporté à la Terre une grande partie de son eau et des matériaux organiques qui allaient permettre de donner naissance aux processus vitaux.

Les scientifiques rejettent actuellement, pour ce qui concerne la Terre, les thèses traditionnelles d'atmosphère primitive d'Oparine (atmosphère composée majoritairement d'hydrogène, de vapeur d'eau, d'ammoniac et de méthane) et de Haldane (atmosphère composée d'ammoniac, de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau). Ces deux modèles avaient pour point commun d'avancer que l'atmosphère terrestre originelle était de type « réductrice », c'est-à-dire capable de provoquer quasi naturellement, avec l'apport d'une source d'énergie qui aurait pu être le rayonnement UV solaire, la formation des bases architecturales de la vie tels les acides aminés. Ainsi, la Terre primitive, grâce à la présence d'ammoniac et de méthane (conditions impératives à la formation de molécules complexes et d'une chimie prébiotique), aurait contenu en elle-même tous les ingrédients permettant le passage de l'inanimé au vivant. Toutefois, aujourd'hui, les modèles d'atmosphère primitive d'Oparine et Haldane sont aujourd'hui rejetés au profit d'un modèle où l'atmosphère est constituée seulement de dioxyde

de carbone et d'azote. Fait très important, il apparaît que ce modèle et ce type d'atmosphère n'aurait pu permettre le développement des « briques de la vie » *sans apport extérieur* : les comètes apparaissent comme les meilleures candidates pour cet apport ! Le nouveau modèle d'atmosphère primitive montre que celui-ci aurait constitué un *obstacle* pour le maintien de l'eau à l'état liquide et la formation des acides aminés. On pense que ce sont les impacts ou dissociations de comètes dans notre atmosphère qui auraient permis au milieu terrestre d'évoluer vers une forme plus favorable à une chimie prébiotique. Cette thèse sur le rôle des comètes a été renforcée par de nombreuses observations cométaires qui ont montré qu'il y avait en abondance sur celles-ci

trois des matériaux permettant cette synthèse des acides aminés : l'eau, l'acide cyanhydrique et le formaldéhyde. Les deux derniers éléments permettent également la synthèse de la *glycine* et il n'est pas inintéressant de souligner que celle-ci fait partie des vingt acides aminés considérés comme des briques essentielles de la phase de chimie prébiotique conduisant à l'émergence des processus vivants.

A ces questions, l'atterrisseur de Rosetta, équipé de nombreux instruments scientifiques, tentera d'apporter quelques réponses. Après un travail de cartographie effectué par les caméras de l'orbiteur pour sélectionner l'endroit le plus adéquat pour un atterrissage, l'atterrisseur sera envoyé, à faible vitesse, vers le noyau cométaire où

il pourra s'arrimer grâce à un harpon d'ancrage. La gravité de la comète est en effet très faible et, sans la présence de ce harpon, il y avait le risque que l'atterrisseur rebondisse et se perde dans l'espace. Cet atterrisseur emportera avec lui sept instruments complexes pour l'analyse des échantillons cométaires qui seront prélevés par un système de carottage pouvant opérer jusqu'à 20 cm en dessous de la surface. En plus des instruments, notons la présence d'une minicaméra qui sera insérée dans le trou où sera effectué le carottage.

Rendez-vous donc en novembre 2011 : Rosetta, comme la pierre de rosette des hiéroglyphes, nous permettra peut-être de lever un certain nombre de secrets intriguants ! ■

Le retour des ambitions américaines en matière cométaire

Dans le domaine de l'étude des comètes, les Américains ont souvent annoncé des projets sans qu'ils soient hélas concrétisés par des programmes effectifs. On l'a vu, en particulier, avec la mission CRAF (Comet Rendez-Vous Asteroid Fly-By) à laquelle devaient participer nos voisins allemands et l'équipe de Jacques Crovisier du département de Radio-astronomie de Meudon. Dans un premier temps, la sonde devait viser la comète Wild-2 après avoir survolé plusieurs astéroïdes mais les Américains changèrent d'objectif pour se rabattre sur la comète Tempel-2. L'intérêt principal de cette mission était de voir pour la première fois un noyau cométaire à l'endroit le plus éloigné de son orbite par rapport au Soleil et à un moment où disparaît le phénomène de coma. CRAF devait larguer sur Tempel-2 un pénétrateur (pouvant agir jusqu'à 2 m de profondeur), un système de carottage et un système collecteur de poussières. Comme bien d'autres avant elle et après elle, la mission

CRAF a subi de constants remaniements qui ont entaché sa conception d'origine soumise sans cesse à des aléas. L'échec de la mise en œuvre du projet fut davantage la marque du triomphe de la bêtise que celui de l'indécision de la Nasa. En effet, le rôle de certains milieux « écologistes » a eu deux conséquences néfastes : d'abord, l'interdiction de l'utilisation, à partir de la soute de la navette, du système de propulsion basé sur l'étage Centaur G qui devait contribuer à injecter la sonde sur l'orbite désirée ; ensuite, le rejet d'un système de générateur radio-isotopique RTG qui aurait été le plus viable pour fournir de l'énergie à la sonde dans les parties lointaines du système solaire où elle était appelée à exercer. La solution alternative d'une sonde électrosolaire ne fut pas non plus poursuivie. CRAF, qui aurait dû être lancée en 1993 pour survoler et étudier Tempel-2, fut finalement abandonnée en 1992.

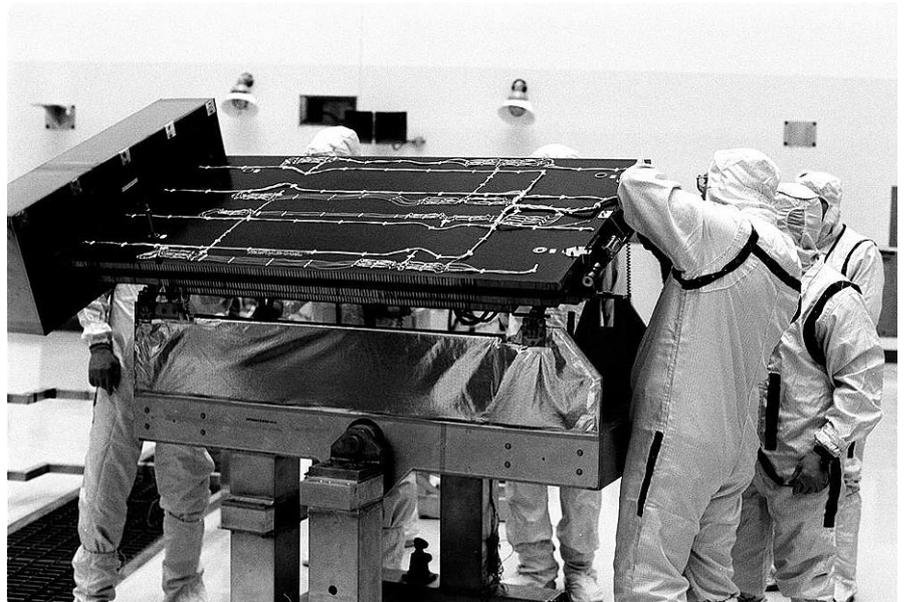
Il en alla de même pour le projet CNSR (Comet Nucleus Sample Re-

turn) qui fut étudié en commun par la Nasa et l'Esa et devait faire appel à une fusée Titan 4 et dont la partie européenne, pour ce qui concerne la conception, était très inspirée des réflexions de l'équipe du physicien Klinger (du laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de Grenoble) qui s'intéresse aux glaces d'eau et aux glaces exotiques du système solaire. CNSR, mission qui fut l'occasion de larges débats vers la fin des années 80 et qui aurait dû se dérouler de 1997 à 2000, prévoyait un carottage (avec retour d'échantillons) sur la comète Schwassmann-Wachmann 1 au niveau de l'orbite de Jupiter. Cette comète périodique, découverte par deux astronomes allemands en 1927, possède pour particularité de posséder une orbite quasi circulaire, décrite en un peu plus de 16 ans, et qui la maintient en permanence entre Jupiter et Saturne. Les deux aspects les plus importants de la mission étaient le carottage (qui donna lieu à d'importants travaux de simulation dont

↗ bénéficie aujourd'hui Rosetta) et le retour sur Terre des échantillons. Pour ces derniers, le problème était de les conserver *intacts* en subissant pour la phase retour la température de Jupiter. Cette grosse planète se caractérise en effet par la présence d'une source d'énergie interne (due aux forces de gravitation) et qui fait que Jupiter émet entre 1,5 et 2 fois plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil. La solution trouvée fut celle d'un cryostat parfaitement étanche pour contenir les échantillons. Il est incontestable que les travaux préparatoires à CNSR influencèrent les premiers scénarios du programme Rosetta.

Les Américains firent également faux bond au programme Rosetta dans lequel ils s'étaient pourtant engagés à la fois au niveau de l'orbiteur et au niveau d'un des deux modules atterrisseurs. Celui-ci, dénommé « Champollion » devait être construit sous l'égide de la Nasa en partenariat avec les Français du CNES. Le retrait des Américains a eu pour conséquence la transformation du projet en faveur d'un atterrisseur unique plus imposant et de conception franco-allemande. Toutefois, certains laboratoires d'outre-Atlantique ont maintenu leur collaboration pour ce qui concerne l'orbiteur.

La mise en œuvre en cours ou à venir de certains projets explique probablement ce retrait américain. Le premier d'entre eux baptisé Deep Space 1, sonde faisant



La sonde Stardust. Elle a été lancée le 7 février 1999 vers la comète Wild-2 et son objectif est de prélever en 2002 des échantillons de poussières cométaires.

appel à un moteur ionique et ayant déjà survolé l'astéroïde 1992-KD, pourrait survoler la comète Wilson-Harrington en janvier 2001 et la comète Borelly en septembre 2001. La mission Stardust, qui a été lancée le 7 février 1999 vers la comète Wild-2, est plus ambitieuse car son objectif est de prélever en 2002 des échantillons de poussières cométaires. Après avoir été placées dans un réceptacle, ces poussières prendraient le chemin de la Terre où elles seraient récupérées en 2006

par un avion après avoir bénéficié d'une descente en parachute. Autre sonde américaine prévue en matière cométaire, Contour (Comet Nucleus Tour) sera lancée en juillet 2002 par une nouvelle fusée Delta et rencontrera la comète Encke en novembre 2003, la comète Schwassmann-Wachmann 1 en juin 2006 et la comète d'Arrest en août 2008. Contour sera équipée d'un matériel sophistiqué pour mesurer les émissions des trois comètes, effectuer des opérations de spectrographie, faire des analyses de composition chimique et de caractéristiques physiques, mesurer et comparer les albédos. Contour disposera aussi d'une caméra capable de prendre à distance des clichés avec une résolution de 4 m. En 2005, les Américains auront également réalisé la mission Deep Impact (lancée en janvier 2004), véritable mission kamikaze visant la comète Tempel-1. Deep Impact tirera un projectile de cuivre de 500 kg sur la comète. La vitesse de celui-ci sera de 10 km/s et les simulations montrent que ce système devrait creuser sur la comète un cratère de 120 m de diamètre et de 20 m de profondeur. La sonde traversera alors le nuage de poussières soulevé par l'explosion afin d'étudier sa composition tout en restant à la distance respectueuse de 700 km. Le phénomène sera visible depuis la Terre.

Philippe Jamet



Contour (Comet Nucleus Tour) sera lancée en juillet 2002 par une nouvelle fusée Delta et rencontrera la comète Encke en novembre 2003, la comète Schwassmann-Wachmann 1 en juin 2006 et la comète d'Arrest en août 2008.