

La comète Tempel 1 vue par la sonde Deep Impact 50 minutes après la collision de l'impacteur. (© NASA/JPL-Caltech/UMD)



Rencontres cométaires

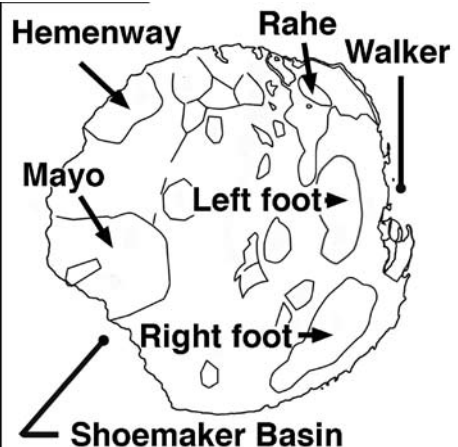
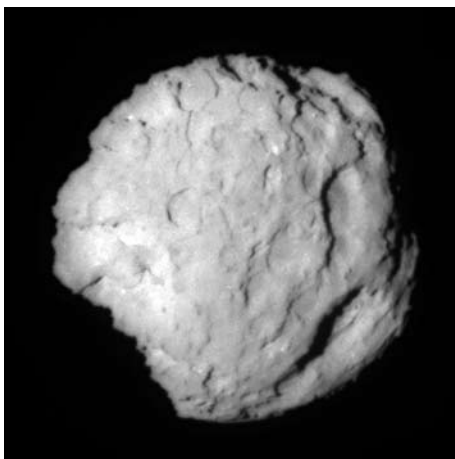
Le 15 février à 5 h 40, la sonde Stardust de la NASA est passée à moins de 180 kilomètres du noyau de la comète Tempel 1, celle-là même qui avait été l'objet de l'expérience Deep Impact en 2005. L'un des buts était bien sûr de voir les dégâts causés par l'impact du projectile de 370 kilos qui avait percuté l'astre à la vitesse de 10,2 km/s. Les astronomes voulaient aussi voir comment la surface de la comète avait évolué au cours des quelques années séparant les deux missions, et découvrir

des zones du noyau qui n'avaient pas encore été photographiées.

Pouvoir revenir aussi vite sur la scène du crime n'avait pas été envisagé en 2005. Le nuage de gaz et de poussières avait été observé par la sonde Deep Impact pendant qu'elle s'éloignait rapidement du noyau mais le cratère résiduel n'avait pas pu être détaillé derrière ce voile de débris. De nombreuses observations avaient été aussi réalisées depuis le sol, mais rien ne vaut une investigation in situ.

Stardust n'en est pas à son coup d'essai. Elle avait déjà visité une comète, Wild 2, le 2 janvier 2004 et en avait pris de nombreuses photos montrant, entre autres, des reliefs comparables aux *mesas* de la Monument Valley, ou *tepuis* du Vénézuéla, ces montagnes tabulaires aux parois très abruptes. Deux ans et des centaines de millions de kilomètres plus tard, le 15 janvier 2006, Stardust passait près de la Terre et lâchait une capsule contenant des particules de la coma de Wild 2 et de l'espace interplanétaire piégée par une matrice d'aérogel. C'était la première fois que des échantillons de comètes étaient ramenés sur Terre de façon non naturelle – notre planète est en effet continuellement bombardée de poussières cométaires, certaines donnant lieu à des météores, d'autres flottant longtemps dans la haute atmosphère. L'avantage d'un échantillon pris in situ est de donner du matériel fraîchement détaché du noyau et d'en connaître l'origine. Les poussières qui arrivent sur Terre ont pu passer des millions d'années dans l'espace.

La comète Wild 2 vue par Stardust en janvier 2004. Les noms indiqués à droite avaient été choisis par l'équipe pour identifier les différents terrains. (© NASA/JPL/Stardust)



Les échantillons montraient des traces de composés organiques cométaires malgré une contamination due au carbone contenu dans le piège d'aérogel. Des hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH) ont pu se former par suite de la chaleur dégagée par les impacts, les poussières les plus petites étant les plus affectées. Néanmoins, la présence de molécules organiques dans cette comète était bien établie, ce qui renforçait les convictions des partisans d'une origine extraterrestre de la vie. À tout le moins, des matériaux propices à son développement peuvent être apportés sur Terre par les comètes.

À la surprise des scientifiques, les échantillons ressemblaient à des poussières météoritiques typiques provenant d'astéroïdes de la ceinture principale, plus qu'à ce qu'ils imaginaient d'une comète. Il apparaissait ainsi que les comètes contiennent des matériaux formés relativement près du Soleil et ayant migré au loin dans les régions froides des comètes. De la forstérite, un silicate semblable à l'olivine, témoignait d'une origine à haute température, ce qui ne pouvait qu'étonner de la part d'une « boule de neige sale ».

C'est pendant le retour de Stardust avec sa cargaison de poussières vers notre planète que Deep Impact a pris pour cible la comète 9P/Tempel 1. Lancée le 12 janvier 2005, la



La capsule libérée par Stardust en janvier 2006 a atterri dans l'Utah, sur un site de l'US Air Force. (© NASA)

sonde arrivait le 4 juillet près de la comète et surveillait l'impact du module de 370 kilos qu'elle avait libéré quelques heures plus tôt. Ce module prenait régulièrement des images afin de se diriger vers sa cible – images d'un grand intérêt également pour les scientifiques. Une des révélations était que le noyau de Tempel 2 est moins allongé qu'on ne le croyait, faisant 7,6 et 4,9 km dans ses dimensions extrêmes. De nombreuses marques circulaires se sont révélées être des cratères d'impact. Une première pour une comète, les marques vues sur Wild 2 ne semblant pas pouvoir être attribuées à des collisions.

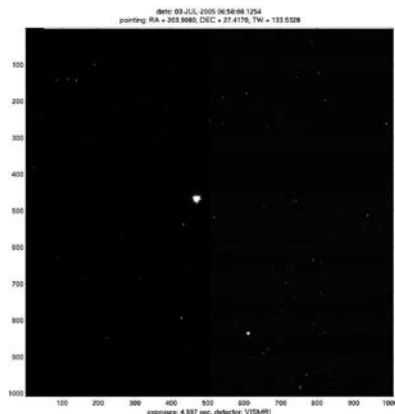
Le noyau est uniformément sombre, ne réfléchissant qu'environ 4 pour cent de la lumière, C'est très peu, beaucoup moins que ce que l'on pouvait attendre d'une boule de neige, même très sale. Il semble qu'il soit recouvert d'une couche de poussières très fines. Cet écran noir permet à la température superficielle d'atteindre de grandes valeurs, jusqu'à près de 60°C du côté jour. De telles températures garantissent évidemment l'absence de glace en surface. En plusieurs endroits s'étendent des zones étonnamment lisses, parfois bordées de falaises abruptes d'une vingtaine de mètres.

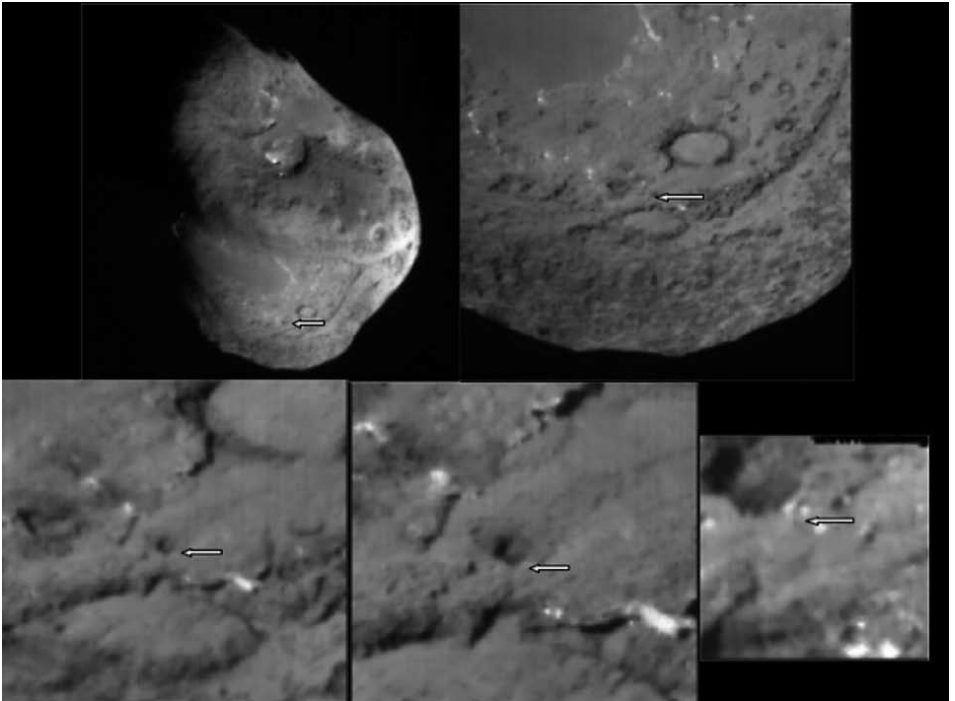
Le cratère créé par l'impact devait être d'un diamètre estimé entre 100 et 250 mètres et d'une profondeur de 30 mètres. Malheureusement il était caché par le nuage qui s'en élevait. Il était donc impossible de se faire une idée de la consistance du sol. Seule



Traces d'impacts de particules cométaires dans l'aérogel de Stardust. (© NASA/JPL)

L'impacteur vu depuis le vaisseau mère Deep Impact peu après la séparation. (© NASA/JPL-Caltech/UMD)





La surface de Tempel 1 vue par l'impacteur pendant sa chute. Le point d'impact estimé à partir de la trajectoire et des données d'imagerie est indiqué par une flèche. (NASA/JPL-Caltech/UMD)

l'observation du nuage pouvait renseigner les astronomes sur la quantité de matière excavée.

Les détecteurs de Deep Impact enregistrèrent de très fines particules et découvrirent la présence de divers minéraux, silicates, carbonates, de carbone, HAPs, etc. D'autres sondes spatiales et de nombreux télescopes au sol étaient de la partie et analysèrent l'événement sous toutes les coutures. On constata ainsi une brusque augmentation de la quantité de silicates (olivine, pyroxène) mais aussi d'éléments volatils (eau, gaz carbonique) dans la coma. Une série de molécules plus complexes, organiques, apparurent, parmi lesquelles l'aldéhyde formique et le méthanol. Ce sursaut ne dura guère et, après quelques jours la comète avait repris son aspect habituel.

L'effet dynamique de l'impact sur la comète doit également être relativisé. Le choc n'a modifié la vitesse de la comète que de 100 microns par seconde. Le périhélie a été réduit de 10 mètres et la période orbitale de

bien moins qu'une seconde. Tout cela n'est rien comparé à l'influence de Jupiter que nous décrivons plus loin.

Sa mission accomplie auprès de Tempel 1, le vaisseau survivant Deep Impact n'en avait pas terminé pour autant. On lui assigna un autre objectif, une autre comète, et cette nouvelle mission fut baptisée DIXI (Deep Impact Extended Investigation). Après un passage près de la Terre en décembre 2007 pour bénéficier d'un coup de pouce gravitationnel la sonde prit le chemin de la comète 103P/Hartley 2 qu'elle survola le 4 novembre 2010 (voir *Le Ciel*, décembre 2010, p. 394). Une rencontre avec la comète Boethius avait d'abord été prévue en 2008, mais cette dernière eut la mauvaise idée de disparaître

sans laisser de traces. Entre les rendez-vous cométaires, les ressources de l'engin ont également été mises à profit pour une mission de surveillance des planètes extrasolaires, la mission EPOCh (Extrasolar Planet Observation and Characterization). Deep Impact devenait alors EPOXI par une savante contraction d'EPOCh et de DIXI.

Pendant ce temps-là, Stardust, rebaptisée Stardust-NExT pour expliciter « New Exploration of Tempel », continuait son petit bonhomme de chemin avec l'une ou l'autre manœuvre de correction et aussi un coup de pouce gravitationnel de la Terre en janvier 2009. Un calcul précis de la trajectoire s'imposait. Il ne suffisait pas de passer près de la comète Tempel 1, il fallait être du bon côté pour espérer voir le cratère produit par Deep Impact. Il fallait aussi avoir de bonnes éphémérides de la comète, et en particulier une connaissance précise de sa vitesse de rotation pour connaître la position du cratère au moment du survol 2011. Un peu de suspense concernait les réserves de carburant qui auraient pu être insuffisantes en cas de corrections trop importantes. De nombreuses observations depuis le sol ont complété les données obtenues par Deep Impact en 2005. Deux mois avant la rencontre, Stardust pouvait commencer à observer sa cible. Au sol, le télescope liégeois TRAPPIST donnait les dernières mesures astrométriques précises jusqu'au 10 février permettant de préciser les circonstances du survol.

Le 15 février à 4 h 40 la sonde Stardust survolait Tempel 1 à la vitesse de 10,9 kilomètres par seconde et à une distance minimale de 178 kilomètres. Elle a pu prendre 72 images à haute résolution, à la cadence d'une toutes les six secondes. Après ce sursaut d'activité, les images furent transmises vers la Terre, et le vaisseau fut reconfiguré

pour prendre des images d'adieu jusqu'au 24 février, date officielle de la fin des opérations relatives au survol.

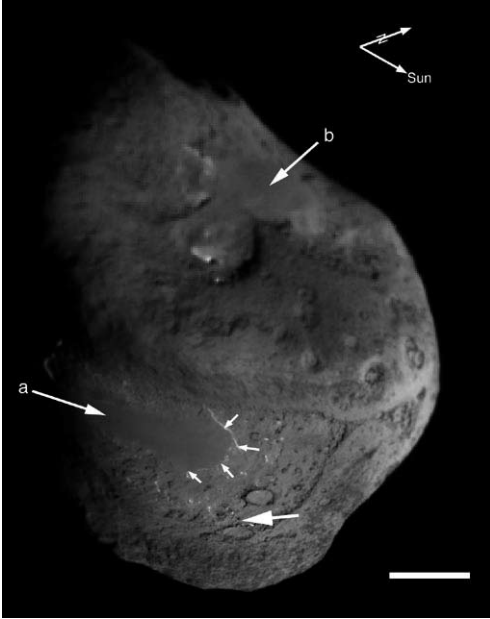
L'attente des résultats fut longue car, au lieu de transmettre d'abord les meilleures images comme il était prévu, un ordinateur a décidé pour quelque raison de commencer par celles prises du plus loin... et chaque transfert prenait un quart d'heure. Ceux qui espéraient voir de belles images sur le site de la NASA dès le petit matin du 15 en furent pour leurs frais et durent se contenter de l'ambiance de la salle de contrôle.

Finalement, les images montrèrent que la position et l'orientation de la caméra et de la comète étaient parfaitement synchronisées (un peu grâce à notre télescope liégeois). La zone de l'impact de 2005 était en plein dans le champ de la caméra lors du survol.

Le cratère est moins spectaculaire qu'on l'escomptait. Il semble qu'une bonne partie des éjectas soulevés par l'impact sont tout simplement retombés sur place. Néanmoins, on peut distinguer une structure circulaire et un monticule central.

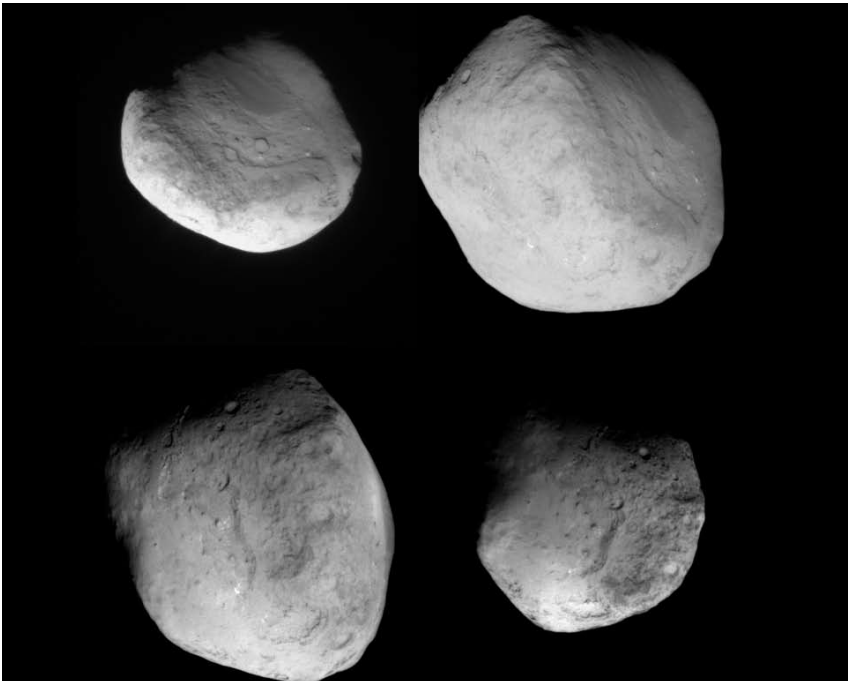


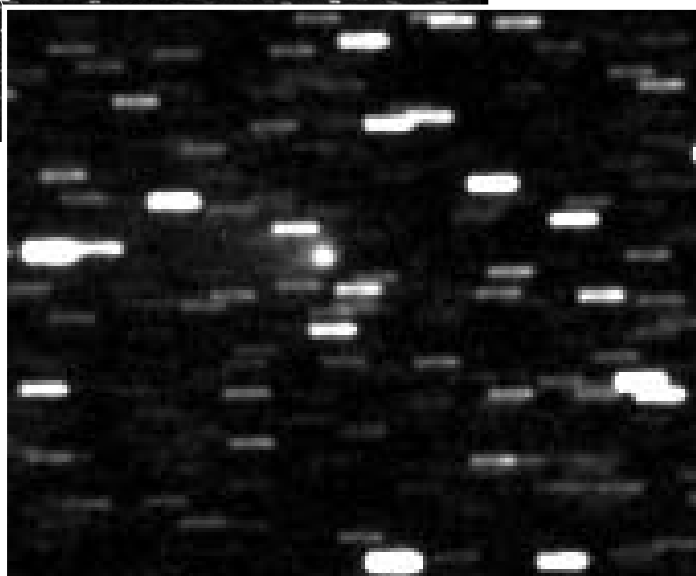
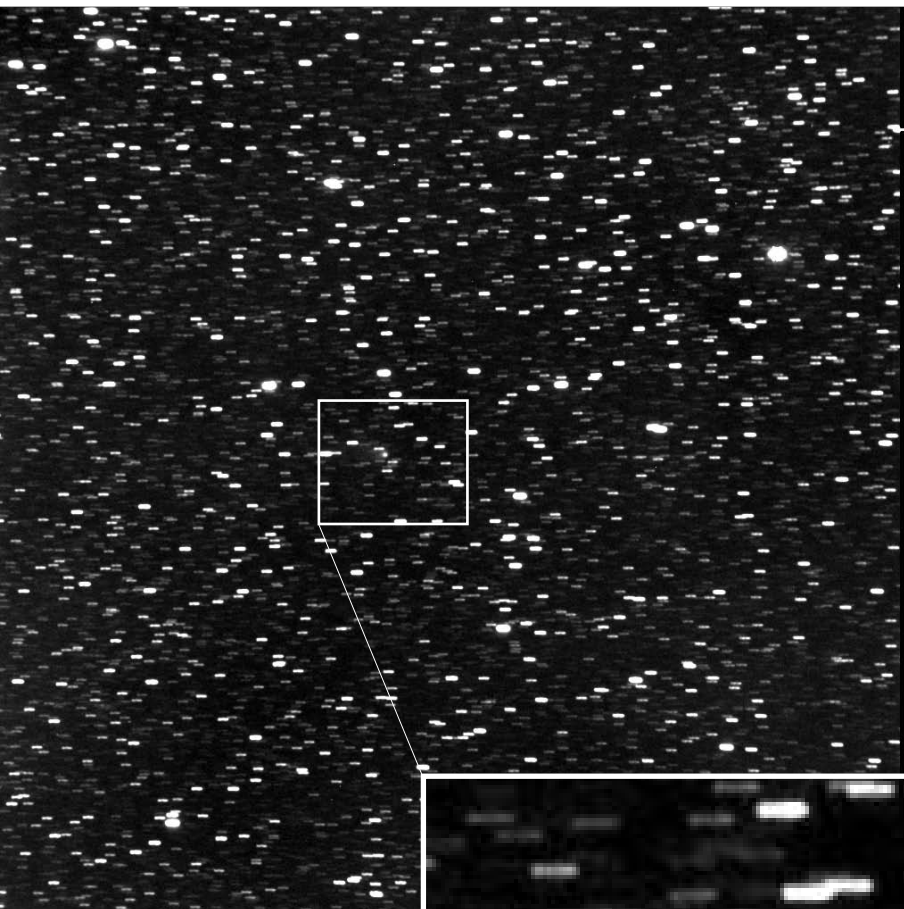
La comète Tempel 1 photographiée par le vaisseau mère un peu plus d'une minute après la collision.
(© NASA/JPL)



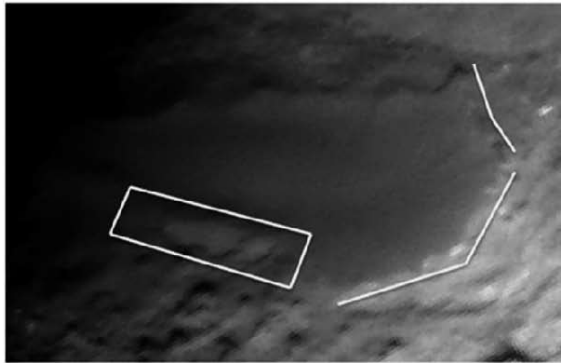
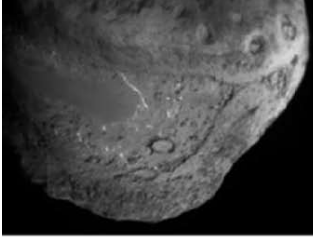
À gauche, le noyau de Tempel 1 vu par Deep Impact. Des hautes plaines très lisses et des â-pics d'une vingtaine de mètres agrémentent une surface érodée par de multiples cratères d'impacts.
(© NASA/ JPL-Caltech / UMD)

Ci-dessous, quatre vues de Tempel 1 par Stardust-Next, le 15 février. La séquence temporelle va de gauche à droite et de haut en bas. La première image prise lors de l'approche montre essentiellement la même face que celle observée par Deep Impact. Sur la deuxième image, de nouveaux terrains apparaissent à gauche tandis que la zone du cratère Deep Impact se déplace vers la droite. Cette image et la suivante sont les vues les plus détaillées prises par la sonde trois secondes avant et trois secondes après la plus grande proximité. La majorité de la surface apparaissant sur la troisième image n'avait pas été vue par Deep Impact. (© NASA/JPL-Caltech/ University of Maryland/Cornell)

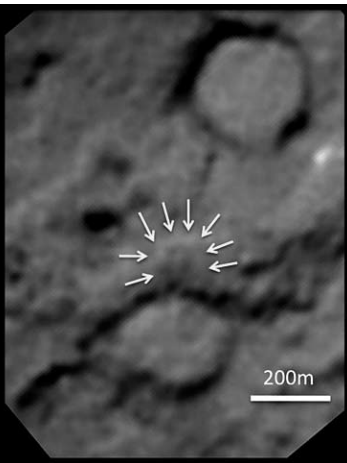




*La comète 9P/Tempel 2 apparaît comme une petite tache diffuse au centre de cette image obtenue le 3 février avec le télescope liégeois TRAPPIST à l'observatoire de l'ESO à La Silla. Stack de six poses de 60 secondes dans la bande R.
(© E. Jehin, TRAPPIST)*



Des changements à la surface de Tempel 1 ont eu lieu entre la mission Deep Impact de 2005 (en haut à droite) et celle de Stardust-NExT en février. Pendant ce laps de temps la comète a parcouru une orbite autour du Soleil. Les terrains lisses sont des plaines plus élevées que les zones plus accidentées. Les scientifiques pensent que des falaises (indiquées à droite par des lignes) ont été érodées et se sont déplacées vers la gauche, parfois de 20 à 30 mètres en six ans. Le quadrilatère montre des dépressions qui ont fusionné par suite de l'érosion. On attribue ces changements à la vaporisation de matériaux volatils. (© NASA/JPL-Caltech/University of Maryland/Cornell)



Tempel 1. L'image de gauche est un composite d'images prises par Deep Impact en juillet 2005. À droite, les flèches indiquent le cratère résultant de la collision. On estime son diamètre à 150 mètres. La bosse centrale, plus brillante, est sans doute due aux retombées. (© NASA/JPL-Caltech/University of Maryland/Cornell)

En plus des images, la sonde a pu recueillir des informations sur la coma et les particules que la comète éjecte. Celles-ci ont été détectées par vagues provenant chacune de la désintégration de plus grosses poussières. Une douzaine de particules ont traversé plusieurs couches de protection de la sonde.

Toutes les données vont être analysées en détail par les astronomes dans les mois et années à venir.

9P/Tempel 1

La comète périodique Tempel 1 a été découverte en 1867 à l'occasion d'un passage très favorable, avec une distance à la Terre de moins de 0,6 unité astronomique à quelques jours du périhélie. Elle avait pu être suivie pendant plus de trois mois de sorte qu'une orbite assez précise avait pu être déterminée avec une période de 5,7 ans. La comète a pu être retrouvée aux deux passages suivants. En 1881, la comète s'approchait un peu trop de Jupiter (0,55 UA) ce qui modifia l'orbite. La période passa à 6,5 ans et le périhélie sauta de

1,8 à 2,1 UA rendant l'astre inobservable avec les moyens de l'époque.

Ce n'est qu'en 1963 que les calculs détaillés par B.G. Marsden montrèrent l'évolution de l'orbite tourmentée par l'influence de Jupiter. La comète était parvenue à son orbite actuelle, caractérisée par une libration autour de la résonance 1:2 avec Jupiter. Les éphémérides établies par Marsden permirent de retrouver Tempel 1 sur une plaque photographique prise en 1967 dans des circonstances peu favorables. En 1972, les conditions étaient nettement meilleures. La comète atteignit la magnitude 11 et fut retrouvée sans difficultés à la position prévue.

L'orbite actuelle de Tempel 1 est située entre celles de Mars et de Jupiter. La période est de 5,5 ans et l'excentricité de 0,5, des valeurs qui changent constamment à cause de Jupiter, comme le montre le tableau ci-joint.

Le périhélie atteindra un minimum de 1,48 UA en 2161 et un maximum de 2,37 en 2833. Les calculs indiquent que le périhélie n'a pas atteint plus de 10 UA au cours des 300 millénaires passés.

Passages successifs de la comète Tempel 1 auprès de la Terre et de Jupiter. Après la date on trouve les caractéristiques principales de l'orbite

(périhélie en UA et période en années) dans le cas des passages, ou la distance à Jupiter. (© NASA/JPL/UMD, D. Yeoman)

1643	Nov,	4,39	25,1	1787	Mars		0,349	1955	Déc,	1,53	5,55
1644	Sept,		0,019	1789	Nov,	1,59	5,70	1967	Jan.	1,50	5,51
1648	Juin	2,86	7,77	1867	Mai	1,56	5,65	1972	Juil.	1,50	5,50
1664	Jan,	2,86	7,77	1870	Fév,		0,359	1978	Jan.	1,50	5,50
1668	Août		0,776	1873	Mai	1,77	5,98	1983	Juil.	1,49	5,49
1671	Juil,	2,51	7,16	1879	Mai	1,77	5,98	1989	Jan.	1,50	5,50
1700	Mars	2,51	7,16	1881	Oct,		0,553	1994	Juil.	1,49	5,50
1703	Nov,		0,202	1885	Sept,	2,07	6,50	2000	Jan.	1,50	5,51
1707	Jan,	1,86	6,19	1937	Déc,	2,07	6,50	2005	Juil.	1,51	5,51
1771	Juil,	2,00	6,46	1941	Oct,		0,415	2011	Jan.	1,51	5,52
1775	Juil,		0,653	1944	Mai	1,69	5,84	2016	Août	1,54	5,58
1777	Nov,	1,76	5,49	1950	Mars	1,69	5,84	2022	Mars	1,54	5,58
1783	Nov,	1,76	6,02	1953	Sept,		0,750	2024	Mai		0,551