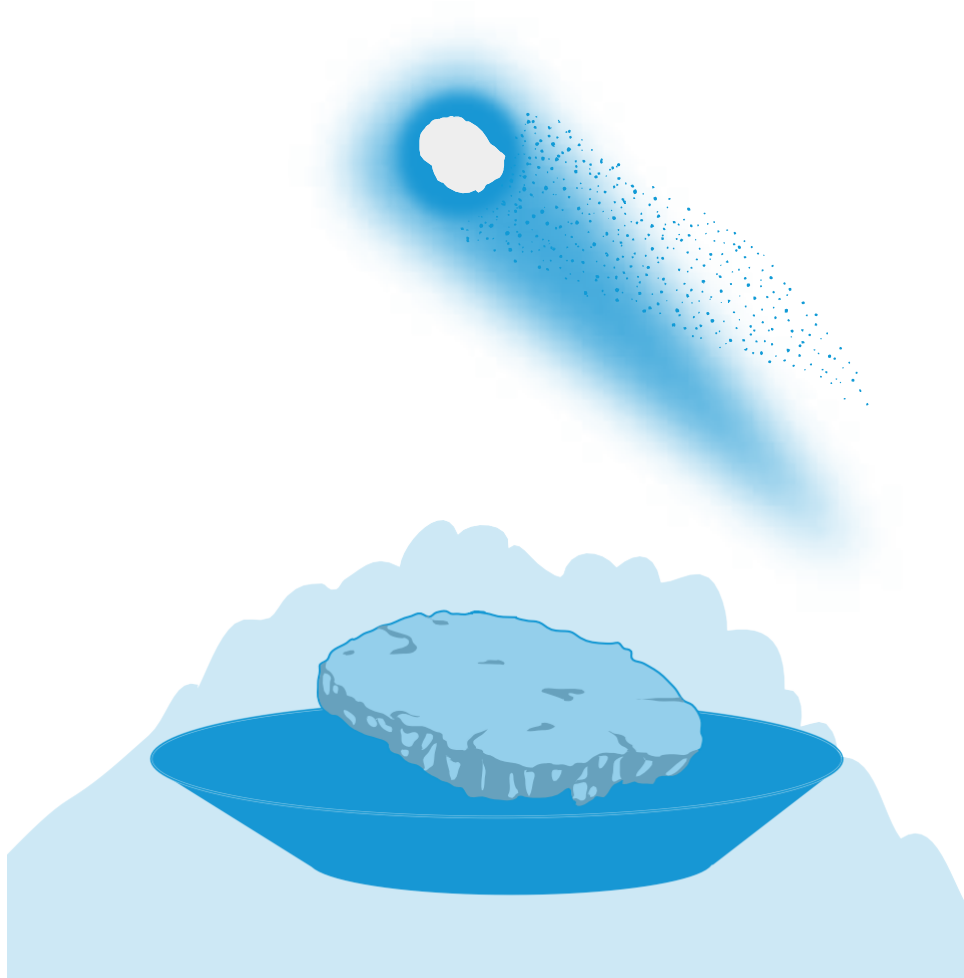


teach with space

→ CUISINER UNE COMÈTE

Des ingrédients pour créer la vie ?



→ INTRODUCTION

Les comètes sont considérées comme de véritables capsules temporelles contenant des informations sur les conditions de la formation du Système solaire. Afin de comprendre la nature des comètes, leur origine et leur influence sur l'évolution de la Terre, nous devons savoir quels matériaux les composent. Cette démonstration effectuée par l'enseignant et l'activité pratique destinée aux élèves, ainsi que la discussion qui en résulte, donnent un aperçu des constituants chimiques des comètes. Une discussion et une activité d'approfondissement, portant sur les processus d'impact terrestre et les calculs de l'énergie cinétique impliquée, sont également incluses.

Éléments clés	page 3
Contexte	page 4
Guide du professeur - Cuisiner une comète	page 12
Instructions	page 13
Discussions	page 14
Discussion d'approfondissement	page 18
Fiche élève	page 22
Contexte spatial à l'ESA	page 24
Giotto	page 24
SOHO	page 27
Comète 103P/Hartley et Herschel	page 28
Rosetta	page 29
Annexes	page 32
Glossaire	page 32
Liens	page 33

→ CUISINER UNE COMÈTE

Des ingrédients pour créer la vie ?

ELEMENTS CLÉS

Tranche d'âge : de 14 à 18 ans

Type : démonstration effectuée par l'enseignant et activité destinée aux élèves

Complexité : facile

Durée de préparation de l'enseignant : 20 minutes

Durée de la leçon : de 20 minutes à 1 heure

Coût par kit : moyen (de 5 à 25 euros)

Lieu : en intérieur (grande salle de classe bien ventilée)

Inclut l'utilisation de : glace sèche (dioxyde de carbone solide à une température inférieure à -78 °C)

Les élèves doivent déjà connaître

1. L'équation de l'énergie cinétique.
2. Les concepts de spectroscopie et de rayonnement infrarouge.

Acquis d'apprentissage

1. Les élèves doivent comprendre les différences élémentaires entre les comètes et les astéroïdes.
2. Les élèves doivent connaître les paramètres de composition élémentaires des comètes.
3. Les élèves doivent être en mesure de faire des calculs simples liés aux conversions d'énergie qui se produisent lorsque des comètes ou des astéroïdes entrent en collision avec des planètes.

Autre matériel nécessaire



↑ Vidéo « Cuisiner une comète ». Voir la section Liens.

Liens avec le programme

Physique

- Énergie cinétique
- Conservation de l'énergie
- Changements d'état
- Processus d'impact
- Orbites (dans le Système solaire)

Astronomie

- Emplacement et nature des astéroïdes et des comètes
- Identification des caractéristiques d'une comète (noyau, chevelure, queues de poussières et queues d'ions)
- Conséquences des collisions dans le Système solaire
- Lien entre la ceinture de Kuiper, le nuage d'Oort et les comètes
- Sondes spatiales étudiant les corps du Système solaire

Chimie

- Changements d'état

Programme

Dans cette activité, l'enseignant et les élèves réalisent une expérience en classe pour simuler un noyau de comète. Les ingrédients utilisés sont représentatifs des matériaux qui composent un véritable noyau de comète, comme l'ont découvert les scientifiques grâce à la spectroscopie combinée aux résultats des survols de diverses comètes par des engins spatiaux.

→ CONTEXTE

Que sont les comètes ?

Les comètes sont de petits mondes glacés qui proviennent principalement de deux régions du Système solaire (Figure 1). Les comètes de courte période (dont la **période orbitale*** est inférieure à 200 ans) proviennent de la ceinture de Kuiper, une collection discoïdale de fragments congelés provenant de la formation du Système solaire, juste au-delà de l'orbite de Neptune. On pense que les comètes de longue période (dont la période orbitale atteint des dizaines de milliers d'années) proviennent d'un halo sphérique de matière glacée situé vers la frontière de notre Système solaire et appelé nuage d'Oort. Se trouvant à une distance de plusieurs milliers **d'unités astronomiques (UA)**, le nuage d'Oort est trop éloigné pour être photographié directement. Pour déterminer l'origine d'une comète à longue période orbitale, nous devons donc suivre sa trajectoire orbitale en remontant dans le temps (Figure 2).



↑ Photo de la comète Hale-Bopp prise en Croatie.

La plupart des comètes gravitent autour du Soleil en décrivant des orbites stables. Cependant, les objets de la ceinture de Kuiper peuvent être influencés par les champs gravitationnels des planètes géantes (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), et les objets du nuage d'Oort peuvent être influencés par des **perturbations gravitationnelles*** entraînées par les mouvements des autres étoiles. Ces perturbations peuvent parfois modifier les orbites de ces petits mondes froids, en les envoyant dans une course vers le Système solaire interne.

À mesure que ces objets s'approchent du Soleil, ils commencent à chauffer et la glace qu'ils contiennent **se sublime***. À ce stade, la structure d'origine est appelée « noyau ». Au fur et à mesure que le noyau se réchauffe, il émet du gaz et de la poussière, formant alors une « atmosphère » mince mais vaste, appelée chevelure (Figure 3).

Tandis que la comète s'approche encore davantage du Soleil, l'interaction de la chevelure avec les radiations solaires qui s'intensifient et le **vent solaire*** produisent les « queues » spectaculaires auxquelles les comètes sont le plus souvent associées. Très occasionnellement, leurs queues sont suffisamment brillantes pour être observées depuis la Terre en plein jour.

***Unité astronomique (UA)** : 1 UA est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, soit le rayon orbital de la Terre, qui est d'environ 150 millions de km.

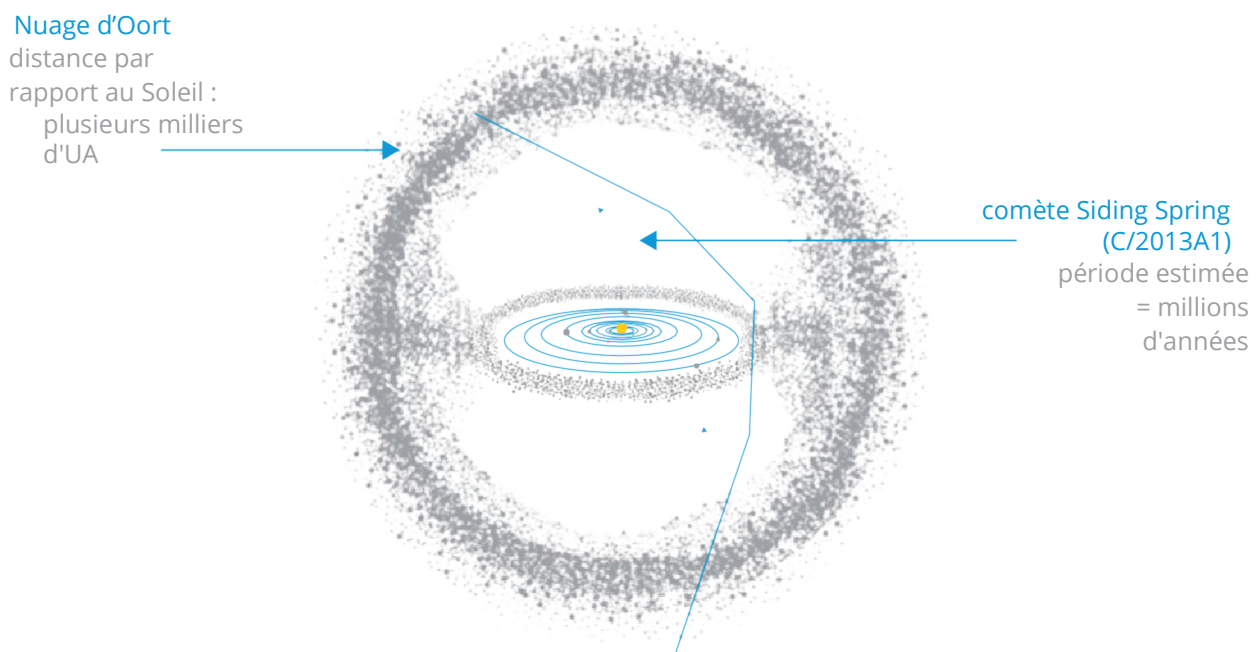
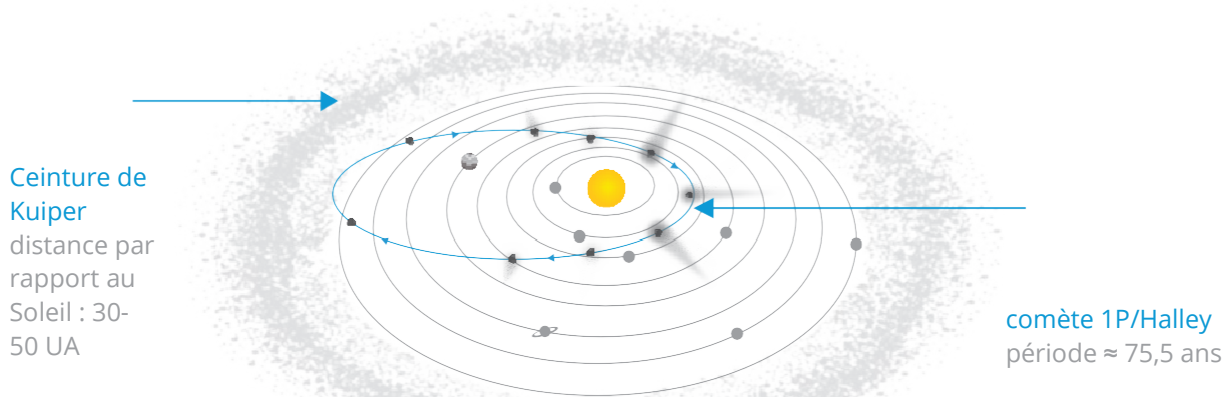
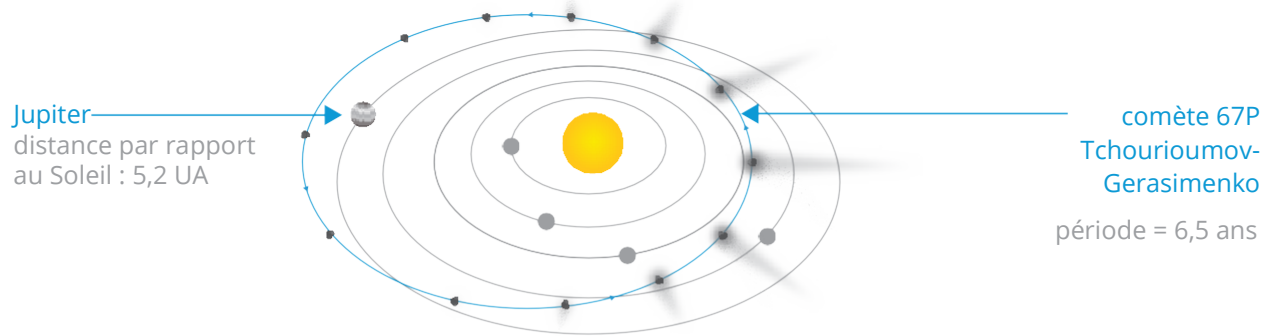
***Perturbations gravitationnelles** : modifications de l'orbite d'un corps céleste (par exemple : planète, comète) dues à des interactions avec les champs gravitationnels d'autres corps célestes (par exemple : planètes géantes, autres étoiles).

***Période orbitale** : temps nécessaire à un corps céleste pour effectuer une orbite complète.

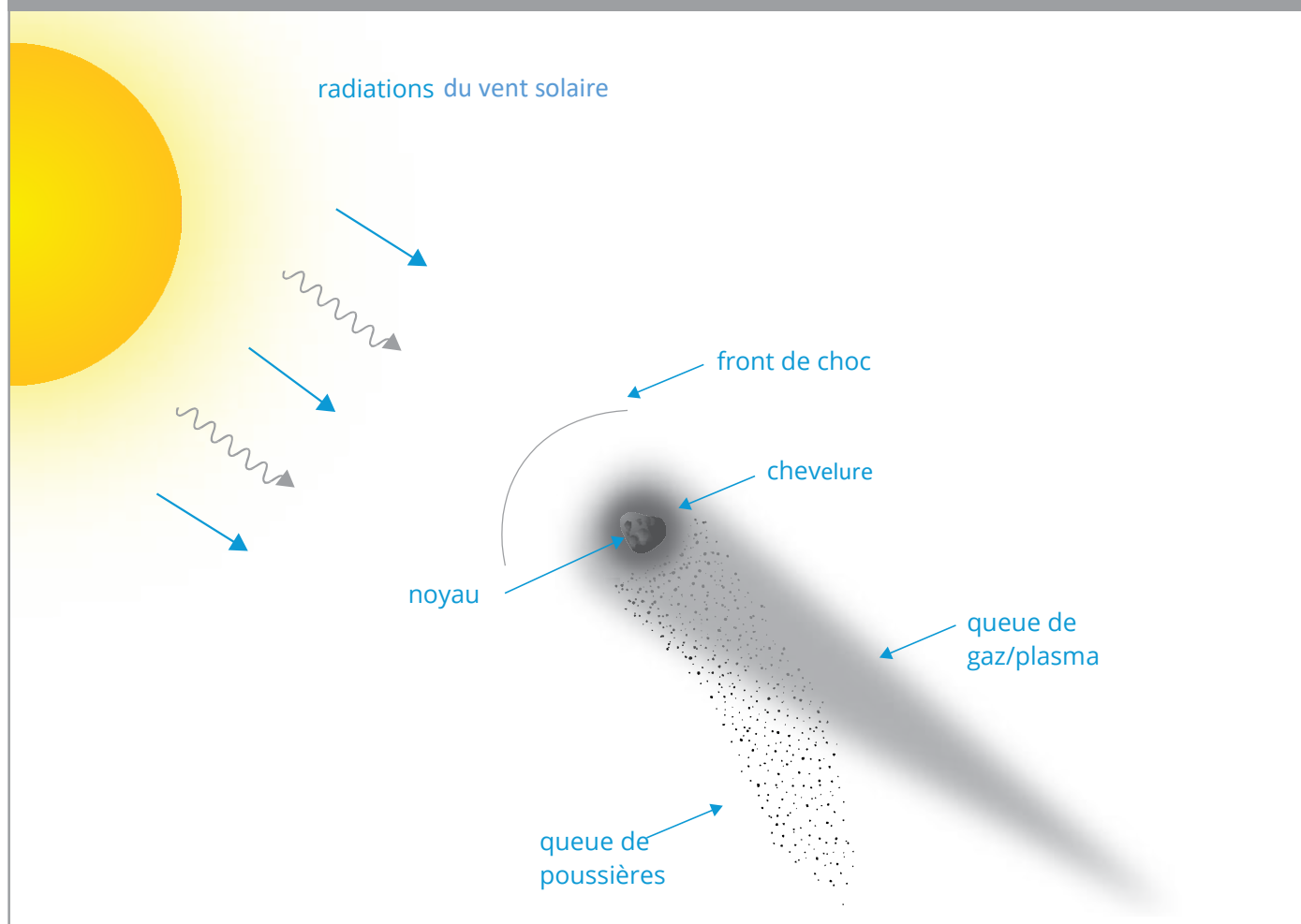
***Vent solaire** : flux de particules de haute énergie (plasma) émis par l'atmosphère supérieure du Soleil dans toutes les directions. Il contient surtout des électrons et des protons.

***Se sublimer (sublimation)** : lorsque, sous l'effet de la chaleur, une substance passe directement de l'état solide à l'état gazeux, sans passer par l'état liquide. Lorsque le gaz est refroidi, il forme généralement un dépôt solide.

Figure 2



↑ Orbits de comètes dans le Système solaire.



↑ Anatomie d'une comète.

Toutes les queues de comètes ne sont pas aussi spectaculaires que celles de la Figure 1, ni même visibles depuis la Terre. La taille du noyau, ses composants, la distance à laquelle elle s'approche du Soleil et le nombre de fois où la comète s'est approchée du Soleil déterminent à quel point sa queue sera spectaculaire. Une fois qu'elle a dépassé le point de son orbite le plus proche du Soleil (**le périhélie***), la comète retourne vers les régions plus froides du Système solaire, en ayant perdu une partie de sa masse définitivement.

Les comètes décrivent des orbites elliptiques dont le Soleil occupe un foyer (Figure 2), et sont donc visibles pendant un bref laps de temps seulement, lorsqu'elles s'approchent du périhélie. Pour les comètes dont l'orbite est très elliptique, cela représente seulement une infime partie du temps qu'il leur faut pour compléter une orbite autour du Soleil. Elles passent la majeure partie de leur existence à décélérer lentement en s'éloignant du Soleil jusqu'à atteindre l'**aphélie***, puis à accélérer lorsqu'elles se rapprochent du Soleil, en raison de son attraction gravitationnelle, jusqu'à atteindre le périhélie.

Pour plus d'informations sur les orbites elliptiques et les orbites des comètes, veuillez-vous reporter à la ressource « ESA : teach with space - les ellipses | P02 » (voir la section Liens).

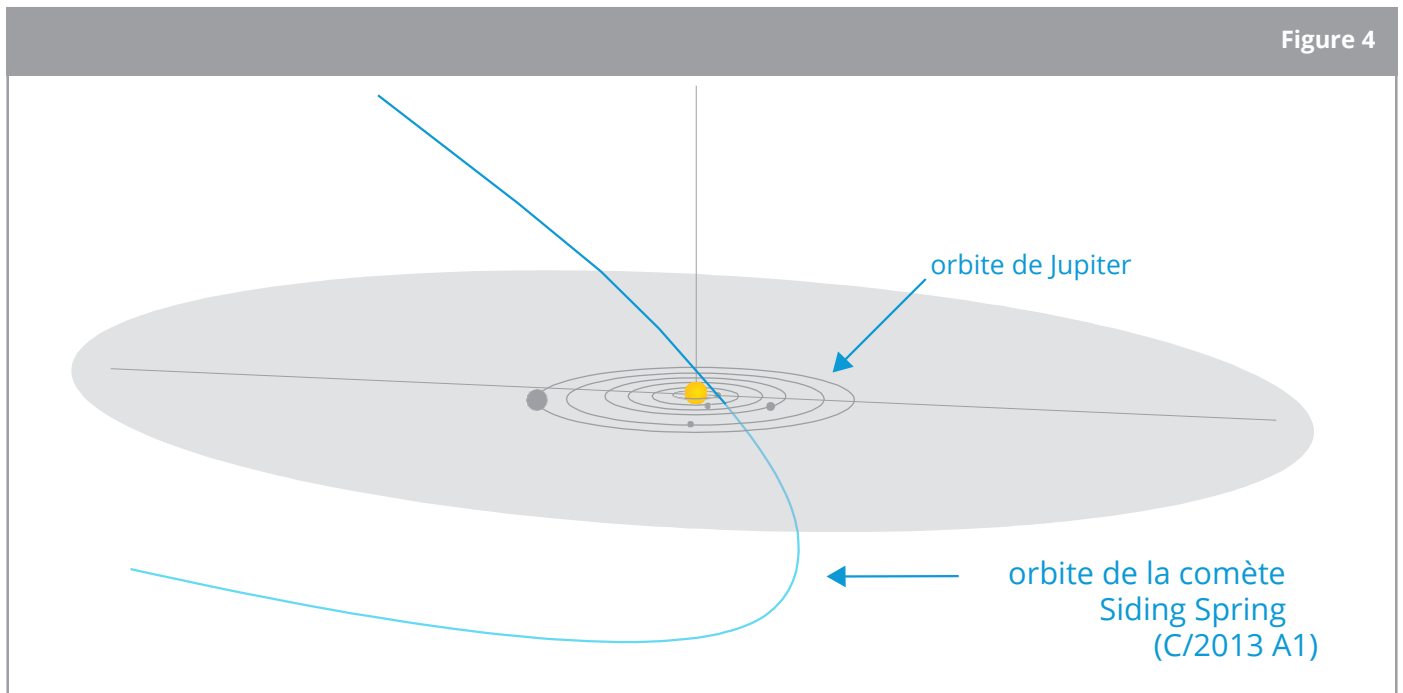
***Aphélie** : point d'une orbite le plus éloigné du Soleil.

***Front de choc (comète)** : surface d'interaction entre les ions contenus dans la chevelure de la comète et le vent solaire. Le front de choc se forme sous l'effet de la vitesse orbitale relative de la comète et du vent solaire supersoniques. Il se forme en amont de la comète, dans la direction d'écoulement du vent solaire. Dans le front de choc, de grandes concentrations d'ions cométaires s'accumulent et chargent le champ magnétique solaire avec du plasma. Il en résulte des lignes de champ qui se courbent autour de la comète, emprisonnant les ions cométaires et formant une queue de gaz, de plasma et d'ions.

***Périhélie** : point d'une orbite le plus proche du Soleil.

Impacts dans le Système solaire

La Figure 2 montre les trajectoires orbitales de 3 comètes différentes, qui semblent toutes traverser les orbites des planètes, suggérant que les collisions entre comètes ou astéroïdes et planètes sont inévitables. Cependant, les orbites de comètes provenant du nuage d'Oort peuvent être fortement inclinées par rapport au plan du Système solaire (l'écliptique). Par conséquent, en raison de la perspective, plusieurs des trajectoires qui semblent traverser directement les orbites planétaires sont trompeuses. Par exemple, la trajectoire de la comète Siding Spring (C/2013 A1) lors de son approche du périhélie en 2014 présente une forte inclinaison par rapport au plan orbital terrestre (Figure 4).

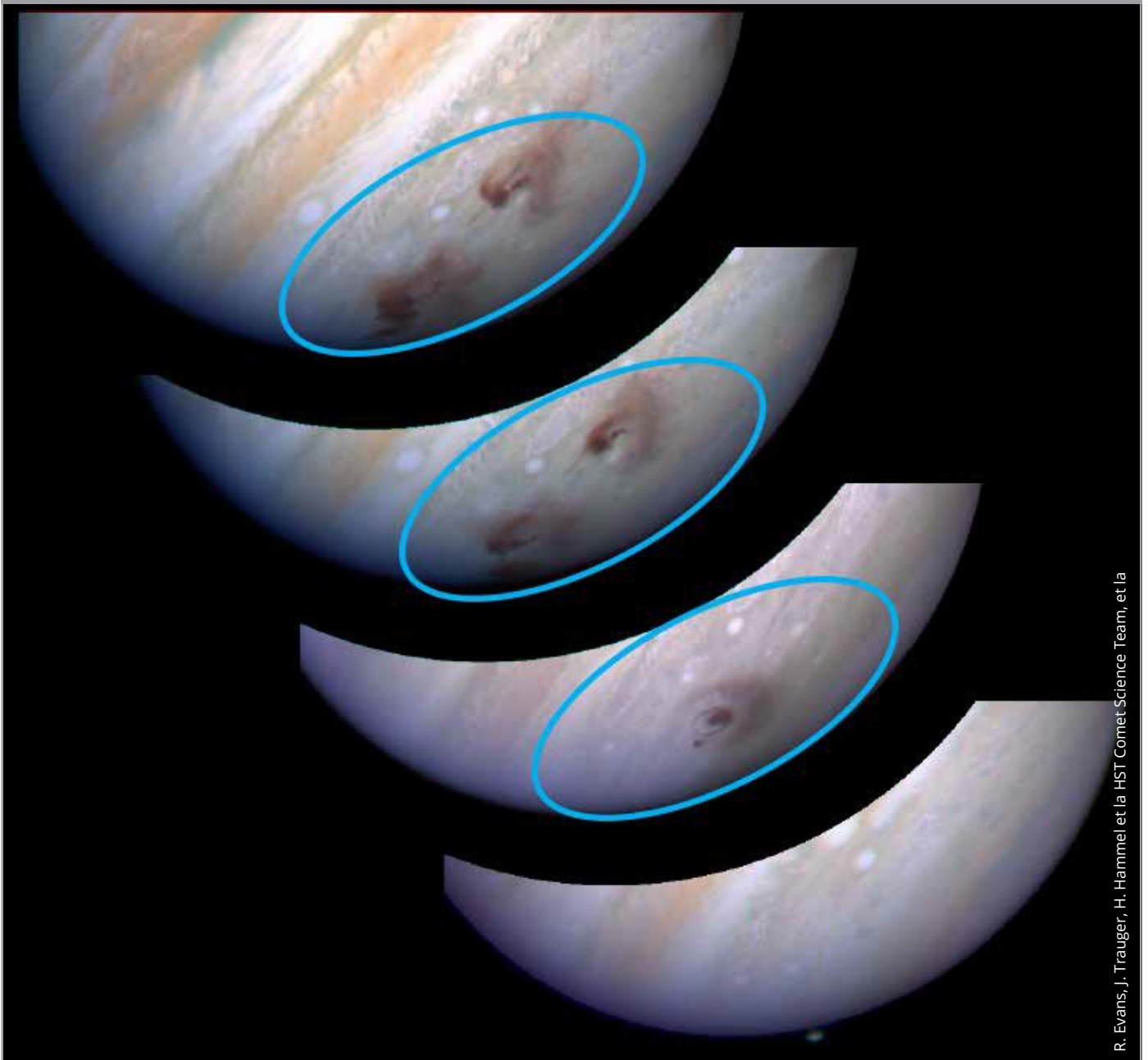


↑ Trajectoire de la comète Siding Spring (C/2013 A1) à travers le Système solaire.

Néanmoins, de nombreuses preuves démontrent que les planètes sont régulièrement (sur des échelles de temps géologiques) frappées par des comètes et des astéroïdes. Les processus d'impact ont formé la plupart des cratères observés sur les surfaces lunaires et planétaires du Système solaire. C'est au début de son histoire que le Système solaire a connu la fréquence de collisions la plus élevée (période du Grand bombardement tardif), mais des impacts se produisent encore de nos jours.

En 1994, de nombreux fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 (D/1993 F2) sont tombés sur la surface de Jupiter. La plus grande trace d'impact observée mesurait des milliers de kilomètres de diamètre. Elle a été causée par le fragment G de la comète, qui mesurait seulement quelques kilomètres. Les effets de cet impact sur l'atmosphère de Jupiter sont visibles sur la Figure 5, une séquence chronologique d'images prises par le télescope spatial Hubble.

Figure 5



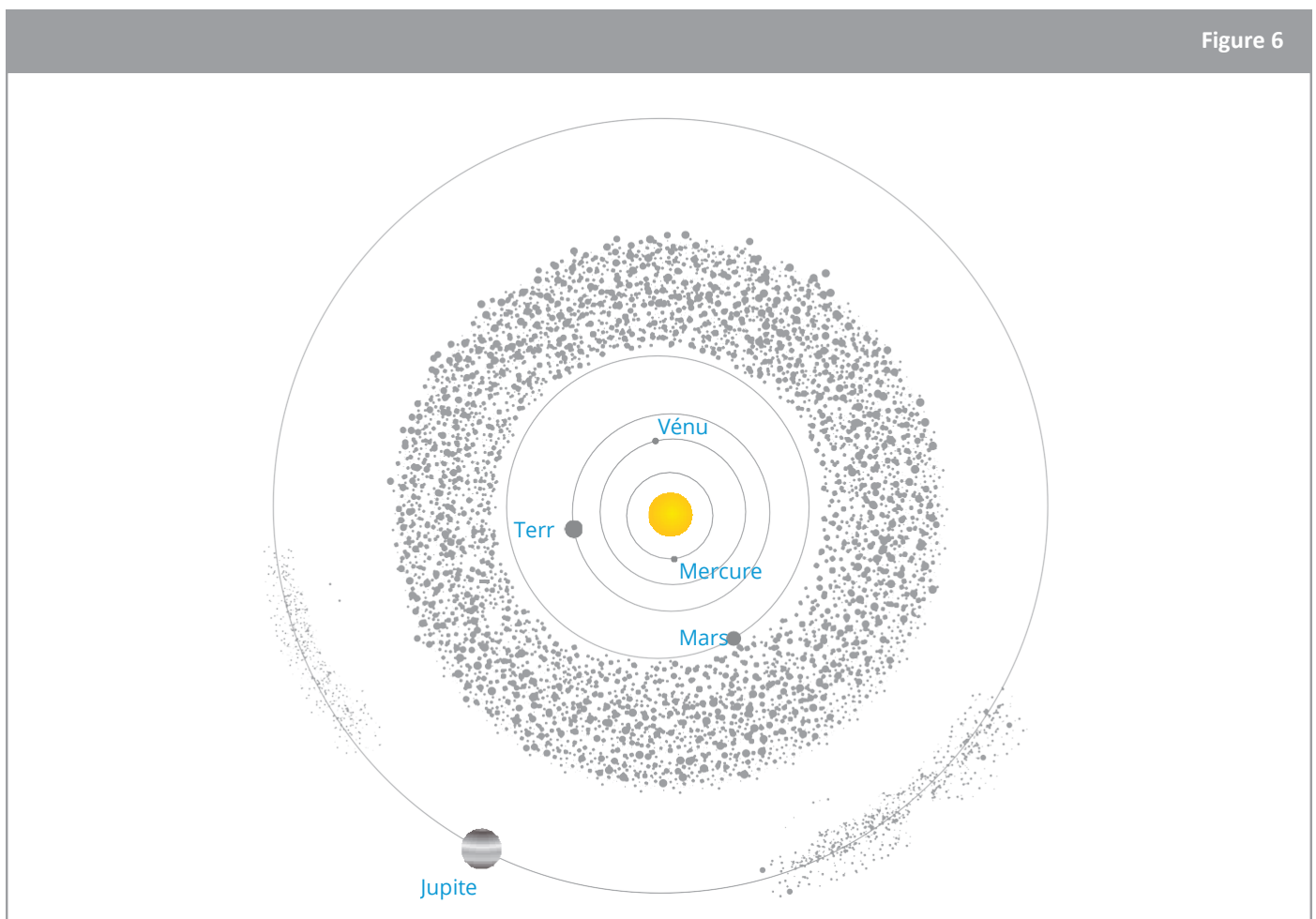
R. Evans, J. Trauger, H. Hammel et la HST Comet Science Team, et la

↑ Cette mosaïque d'images montre l'évolution du site d'impact G sur Jupiter (entouré de l'ellipse bleue).

Les astéroïdes

Les comètes ne sont pas les seuls objets qui entrent en collision avec la Terre et avec d'autres corps du Système solaire. Les astéroïdes, qui proviennent principalement de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter (Figure 6), sont de grands objets rocheux ou métalliques. Globalement, les astéroïdes se forment à une distance beaucoup plus proche du Soleil et contiennent donc moins d'éléments légers que les comètes. Les principaux composants des astéroïdes sont les métaux, les oxydes métalliques, les minéraux et les silicates. Dans les comètes, les grandes quantités d'éléments légers, tels que le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le phosphore et le soufre, permettent la formation de certains composés, comme l'eau, le méthane et le dioxyde de carbone.

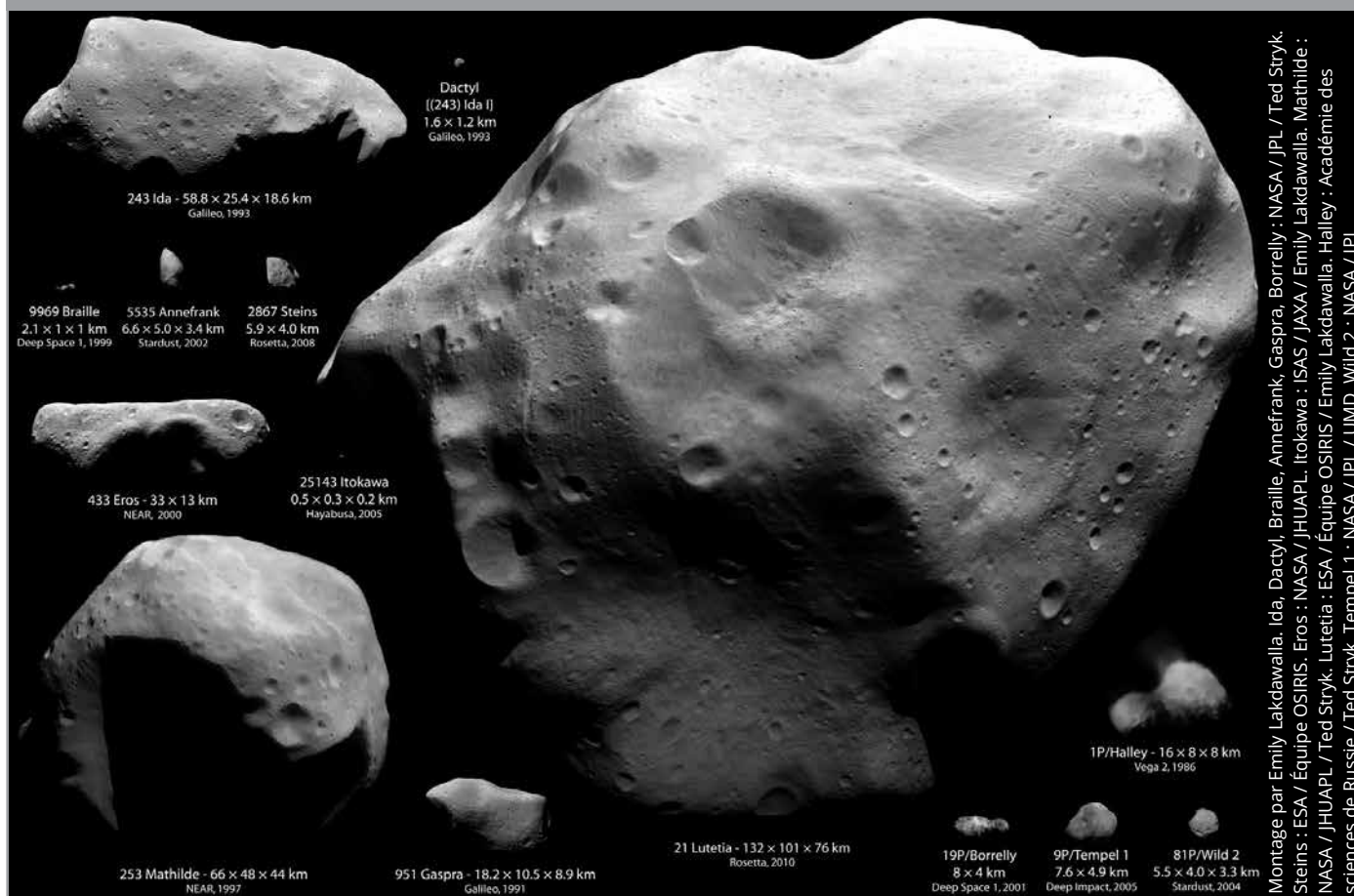
Les plus grands astéroïdes connus sont Vesta et Pallas, qui mesurent plus de 500 km de diamètre. La Figure 7 présente une comparaison de la taille de certains astéroïdes et comètes. Les astéroïdes irréguliers présentés sur la Figure 7 sont beaucoup plus petits que Vesta et Pallas, mais nombre d'entre eux sont beaucoup plus gros que les noyaux de comètes qui ont été photographiés.



↑ Diagramme de la répartition des astéroïdes dans le Système solaire. La majorité des astéroïdes se trouvent dans la ceinture principale entre les orbites de Mars et de Jupiter. Les autres grands groupes d'astéroïdes, les troyens de Jupiter, se trouvent aux **points stables de Lagrange***, L4 et L5, sur l'orbite de Jupiter.

***Points de Lagrange** : dans toute configuration orbitale, il existe cinq points où un objet, affecté uniquement par la gravité, peut demeurer en orbite de façon stable. Pour plus d'informations, veuillez-vous reporter à la vidéo « ESA : teach with space - les puits de gravité | VP04 » (voir la section Liens).

Figure 7



Montage par Emily Lakdawalla. Ida, Dactyl, Braille, Annefrank, Gaspra, Borrelly : NASA / JPL / Ted Stryk.
 Steins : ESA / Equipe OSIRIS. Eros : NASA / JHUAPL. Itokawa : ISAS / JAXA / Emily Lakdawalla. Mathilde :
 NASA / JHUAPL / Ted Stryk. Lutetia : ESA / Equipe OSIRIS / Emily Lakdawalla. Halley : Académie des
 sciences de Russie / Terf Strvk Temmel 1 · NASA / IPI / IIMD Wild 2 · NASA / IPI

↑ Comparaison de la taille des astéroïdes et des comètes.

Impacts terrestres

Sur la surface terrestre, en raison des processus tectoniques et météorologiques actifs, les cratères durent généralement quelques millions d'années avant de disparaître. Toutefois, l'analyse géologique des roches souterraines et d'autres caractéristiques peut aider à déduire la formation ancienne d'un cratère. Au début des années 1990, ces analyses ont permis de confirmer qu'il y a environ 65 millions d'années, une comète ou un astéroïde, d'un diamètre d'environ 10 km, est tombé sur Terre dans une zone aujourd'hui connue sous le nom de Yucatán, au Mexique. Cet impact a formé un cratère de plus de 150 km de diamètre. Le changement climatique mondial qui s'est produit par la suite a contribué de façon significative à l'un des plus grands événements d'extinction de l'histoire géologique terrestre : l'extinction Crétacé-Paléogène, qui a mené à la disparition des dinosaures.

À des échelles temporelles beaucoup plus récentes, de plus petits cratères se sont formés et sont encore visibles, tels que Meteor Crater (également connu sous le nom de cratère Barringer) en Arizona, aux États-Unis, comme le montre la Figure 8.

Figure 8



↑ Image de gauche : Meteor Crater, Arizona, États-Unis. Image de droite : Meteor Crater photographié depuis la Station spatiale internationale.

Meteor Crater s'est formé il y a environ 50 000 ans après qu'un astéroïde constitué de nickel et de fer s'est écrasé dans les plaines de l'Arizona, aux États-Unis. Cet impact a formé un cratère de près de 200 m de profondeur et 1,5 km de diamètre. Des fragments de l'impacteur initial sont éparpillés aux alentours.

En 1908, un astéroïde ou une comète, d'un diamètre estimé à plus de 50 m, a explosé à une altitude de 5 à 10 km au-dessus d'une zone forestière isolée près de la rivière Toungouska dans la ville actuelle Krasnoïarsk, en Russie. Bien que l'astéroïde ou la comète n'ait pas touché la surface de la Terre, la force de l'explosion a rasé une zone forestière de plus de 2 000 km² (Figure 9).

Figure 9



↑ Arbres abattus dans l'explosion de la Toungouska.

→ GUIDE DU PROFESSEUR

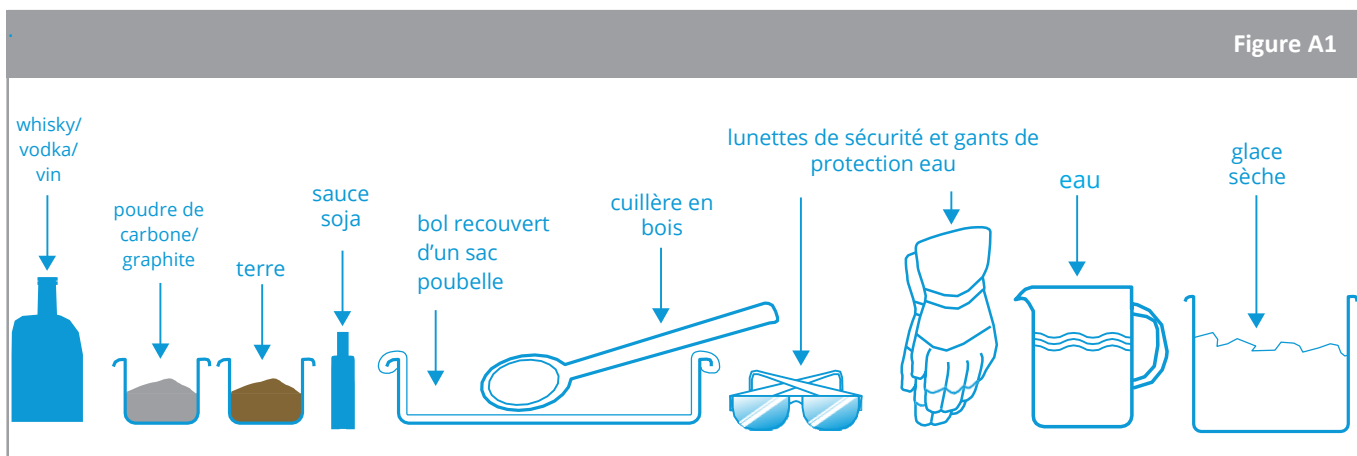
Cuisiner une comète

Lors de cette démonstration, l'enseignant réalise une expérience en classe pour simuler un noyau de comète. Les ingrédients utilisés représentent les matériaux qui composent un véritable noyau de comète.

La version de cette activité destinée aux élèves a recours à de plus petites quantités d'ingrédients, dans des gobelets en plastique. Il est important d'expliquer clairement les dangers aux élèves et de leur indiquer les consignes à suivre en matière de santé et de sécurité. Vous trouverez les instructions destinées aux élèves dans la Fiche élève, après cette section.

Équipement

- Glace sèche (environ 0,75 litre, les plus petits pellets possibles)
- Eau (environ 0,75 litre)
- Grands sacs poubelle
- 10 cuillères à soupe (4 très grandes cuillères en bois) de terre (assurez-vous que la terre n'est pas agglutinée et que sa consistance est uniforme)
- 1 cuillère à soupe de poussière/poudre de carbone ou de poudre de graphite
- 2 à 3 cuillères à soupe de whisky, de vodka ou de vin rouge (composant méthanol/éthanol)
- Quelques gouttes de sauce soja (composant organique)
- Quelques gouttes de produit de nettoyage (composant ammoniac)
- Grand bol en plastique
- Seau pour éliminer les déchets
- Cuillère en bois
- Écran de sécurité transparent
- Contenant en polystyrène pour la glace sèche
- Gants de protection thermique
- Lunettes de sécurité pour tous les participants et pour l'enseignant effectuant la démonstration
- Blouse de laboratoire pour l'enseignant effectuant la démonstration (facultatif)
- Verres gradués



↑ Matériel expérimental

Santé et sécurité

- Lorsque vous manipulez de la glace sèche, portez toujours des gants de protection et des lunettes de sécurité. Ne touchez pas, n'avalez pas ou ne goûtez pas la glace sèche. Expliquez clairement les dangers aux élèves et indiquez-leur la distance à laquelle ils doivent s'asseoir pendant la démonstration, car la comète peut « cracher ».
- N'enfermez pas la glace sèche dans un contenant, car un dégazage explosif peut se produire !
- Éliminez la comète à l'extérieur, dans une zone bien ventilée à laquelle les élèves n'ont pas accès.
- Ne stockez jamais de la glace sèche dans un congélateur domestique.
- Réalisez l'expérience dans une zone bien ventilée.

Instructions

Veillez vous référer à la vidéo d'accompagnement : Teach with space – Cuisiner une comète | VC03.

1. Recouvrez le bol d'un sac poubelle. Nous vous suggérons de placer le bol à l'intérieur du sac et de le recouvrir avec la couche supérieure. Cela facilitera l'élimination de la comète par la suite. Assurez-vous que le sac est lisse sur la partie interne du bol.
2. Ajoutez les ingrédients suivants : eau, terre, poussière de carbone, vin/alcool, produit de nettoyage et sauce soja. Ils représentent certains des composants d'une véritable comète. Les élèves volontaires peuvent participer à l'expérience en incorporant certains des ingrédients. Mélangez bien à l'aide de la cuillère en bois.
3. Ajoutez la glace sèche au mélange. Mélangez à l'aide de la cuillère en bois. Nous vous conseillons de demander à un assistant d'incliner le bol pendant que vous mélangez. Puis, en portant des gants de protection, formez une boule avec la comète pendant environ 30 secondes. Si la comète ne s'agglomère pas facilement, ajoutez un peu d'eau. Ne la compressez pas trop, sinon la comète risque de se briser.
4. Une fois la démonstration terminée, placez la comète à l'intérieur du bol et retirez soigneusement le bol du sac poubelle, pour enfermer la comète dans le sac. Placez le sac poubelle dans le seau. Assurez-vous que le sac reste ouvert afin que les gaz puissent s'échapper. Éliminez le noyau à l'extérieur, dans un lieu où l'accès est limité. La glace sèche du noyau devrait se sublimer dans les 24 heures.

Conseil : si vous réalisez l'expérience le matin, les élèves peuvent revenir l'après-midi pour voir l'évolution de la comète.

N'hésitez pas à répéter l'expérience pour améliorer vos comètes ! Pour obtenir de meilleurs résultats, nous vous recommandons de répéter l'expérience plusieurs fois avant de la réaliser avec les élèves.

Discussion

Dans quelle mesure les ingrédients représentent-ils les matériaux qui composent les véritables noyaux de comètes ? Quelles sont les implications pour la vie sur notre planète ?

Les premières observations spectroscopiques de comètes ont eu lieu à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle. La spectroscopie a permis aux astronomes de commencer à connaître la composition chimique des comètes. Ces premières observations ont permis d'identifier le carbone diatomique, les ions sodium et une variété de molécules à base de carbone, d'oxygène et d'azote.

En 1950, l'astronome américain Fred Whipple proposa un nouveau modèle pour décrire les noyaux cométaires. Le modèle de la « boule de neige sale » de Whipple suggère que les comètes possèdent un noyau glacé constitué de traces de poussières, de roches et de composés volatils, gelés pour la plupart, tels que **l'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'ammoniac**. Par la suite, des observations au sol et dans l'espace ont confirmé le modèle de Whipple, bien que certaines petites modifications aient été nécessaires, car les observations ont montré que les noyaux cométaires étaient plus gros et plus sombres que ceux décrits dans le modèle.

Une récente étude de la comète 103P/Hartley a démontré que sa teneur en **eau** présente le même rapport isotopique deutérium/hydrogène (eau lourde) que les océans terrestres. Cette découverte est très importante. L'eau est une molécule essentielle pour créer la vie telle que nous la connaissons. Il s'agit d'un solvant universel capable de dissoudre divers composants chimiques. Les scientifiques estiment que l'eau est indispensable au développement de la vie. Les impacts de comètes au début de l'histoire terrestre ont sans doute constitué une source majeure pour les réserves d'eau initiales de la Terre.

La teneur en **carbone** des comètes est importante car toute vie telle que nous la connaissons est basée sur le carbone. Cet ingrédient essentiel pour la vie terrestre a pu être apporté par les impacts de comètes.

La **sauce soja** représente les acides aminés et les précurseurs d'acides aminés contenus dans les comètes. En 2004, la mission Stardust de la NASA a prélevé des échantillons de poussières dans la chevelure de la comète 81P/Wild, qui ont été renvoyés sur Terre. L'analyse de ces poussières a confirmé la présence de glycine, l'acide aminé le plus simple. Ces résultats sont d'une importance majeure. Les acides aminés sont les éléments constitutifs des protéines. Ils constituent donc les éléments constitutifs de la vie elle-même. La découverte de ces molécules biologiques (formule chimique $C_2H_5NO_2$) sur un corps autre que la Terre suggère aux scientifiques que certains des ingrédients nécessaires à la vie sur notre planète ont pu être apportés par des impacts de comètes il y a plusieurs milliards d'années.

Outre le **dioxyde de carbone** (glace sèche) utilisé lors de la démonstration, d'autres gaz ont été découverts dans les comètes, grâce à la spectroscopie. Il s'agit notamment des gaz mentionnés dans le tableau 1.

Qu'est-ce que la glace sèche ?

La glace sèche est du dioxyde de carbone (CO₂) gelé, qui est normalement à l'état gazeux dans des conditions normales de température et de pression.

Le processus de sublimation, au cours duquel le dioxyde de carbone passe directement de l'état solide à l'état gazeux, est responsable de la formation de la chevelure d'une comète. Le processus inverse s'appelle désublimation, ou condensation solide. À une pression atmosphérique normale, le dioxyde de carbone passe directement d'un gaz à un solide en formant de la glace sèche, à -78 °C.

Que sont les nuages blancs/la fumée blanche émis pendant la démonstration ?

À mesure que la glace sèche utilisée lors de la démonstration s'élève à une température supérieure à -78 °C, elle se sublime pour former un gaz froid. Cela a pour effet de refroidir la vapeur d'eau présente dans l'air environnant, qui se condense pour former les nuages blancs s'échappant de la glace.

Tableau A1	
C ₂ H ₄	éthylène
NH ₃	ammoniac
CH ₄	méthane
C ₂ H ₆	éthane
C ₂ H ₅ NH ₂	éthylamine
O ₂	oxygène
CH ₃ OH	méthanol
NH ₂ CH ₂ OH	aminométhanol
H ₂ O ₂	peroxyde d'hydrogène
H ₂	hydrogène
CH ₃ COOH	acide acétique
CH ₃ NH ₂	méthylamine
C ₂ H ₂	acétylène
HCN	cyanure d'hydrogène

↑ Gaz trouvés dans les noyaux cométaires.

Quelle est la cause du dégazage explosif observé pendant la démonstration ?

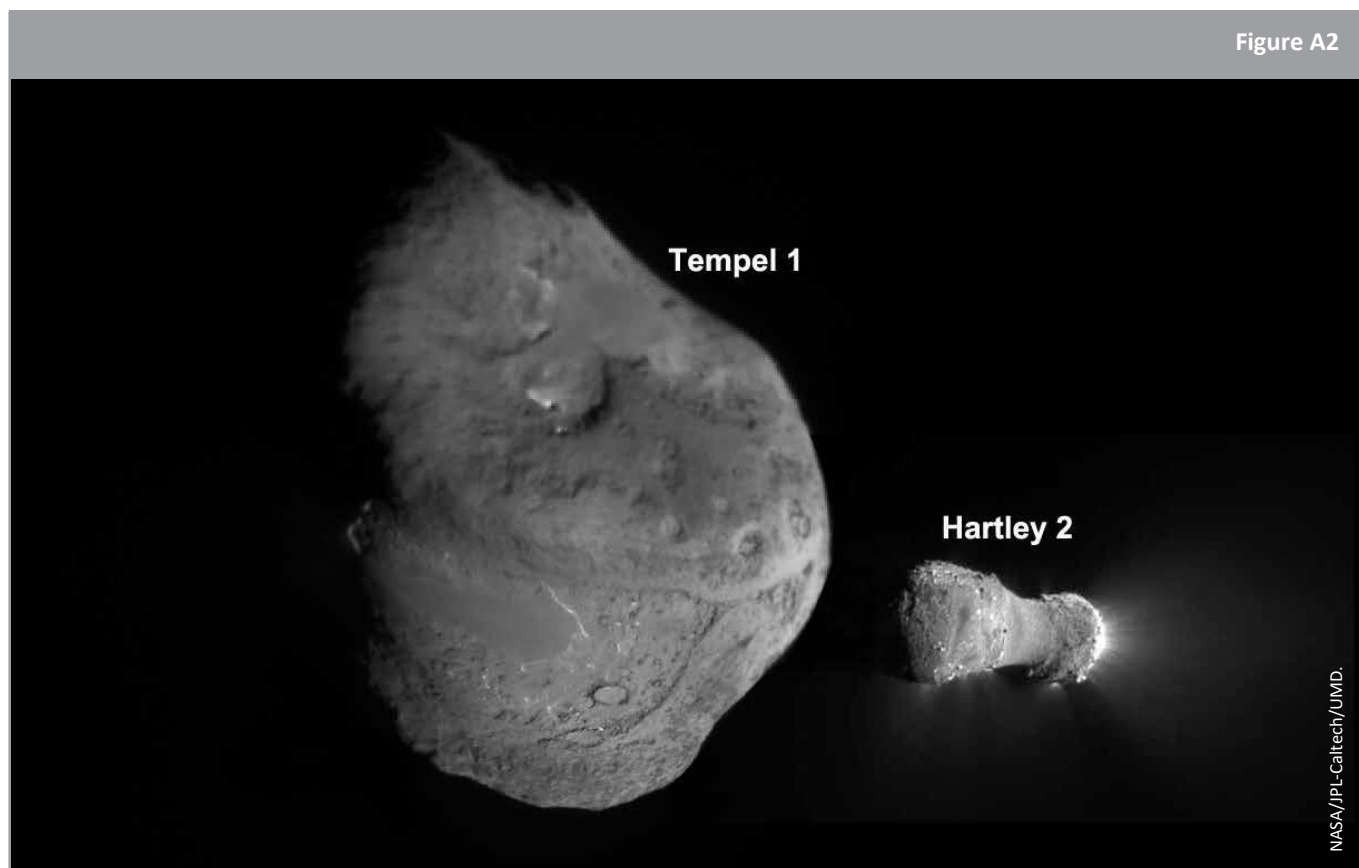
Dans cette activité, à mesure que se forme la représentation du noyau de la comète, deux facteurs entrent en concurrence. L'eau liquide entre en contact thermique avec la glace sèche, qui a une température inférieure à -78 °C ; l'eau liquide gèle en formant une « cage de glace » autour de la glace sèche. Étant donné que la glace sèche est mise en contact thermique avec un matériau dont la température est supérieure à -78 °C, elle commence à se sublimer. Lorsque la glace sèche passe de l'état solide à l'état gazeux, son volume augmente de plus de 600 fois par rapport à son volume initial. Cela signifie que la sublimation de poches de glace sèche génère parfois un dégazage explosif à travers la croûte de glace du noyau. Pour cette raison, nous vous recommandons fortement de porter une blouse de laboratoire, ainsi que des gants de protection et des lunettes de sécurité.

Quelle forme les noyaux des comètes ont-ils ? Et quelle taille mesurent-ils ?

Plusieurs **survol**s* effectués par des engins spatiaux ont confirmé la variété des formes et des tailles des noyaux de comètes. Ces survols comprennent les missions Giotto (ESA - comète 1P/Halley et comète 26P/Grigg-Skjellerup), Stardust (NASA - comète 81P/Wild et comète 9P/Tempel), Deep Impact (NASA - comète 9P/Tempel et comète 103P/Hartley) et Rosetta (ESA - comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko). Sur l'image d'échelle présentée en Figure A2, l'axe long du noyau de la comète 103P/Hartley mesure environ 2,2 km, et le noyau de la comète 9P/Tempel mesure environ 7,6 km à sa dimension la plus longue. Les mesures préliminaires effectuées par la mission Rosetta de l'ESA à son arrivée sur la comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko ont confirmé que sa plus longue dimension est de 4,1 km.

* **Survol** : passage d'un engin spatial à proximité d'une planète ou d'un autre corps céleste. Si l'engin spatial utilise le champ gravitationnel de la planète pour augmenter sa vitesse et modifier sa trajectoire, il s'agit d'un « effet de fronde gravitationnelle », également appelé « manœuvre d'assistance gravitationnelle ».

Le montage de la Figure 7 montre plusieurs photos de noyaux cométaires comparées aux images d'astéroïdes et de plusieurs lunes du Système solaire, prises par des engins spatiaux lors de différents survols (jusqu'en 2010). Les noyaux des comètes sont représentés en bas à droite de la Figure 7.

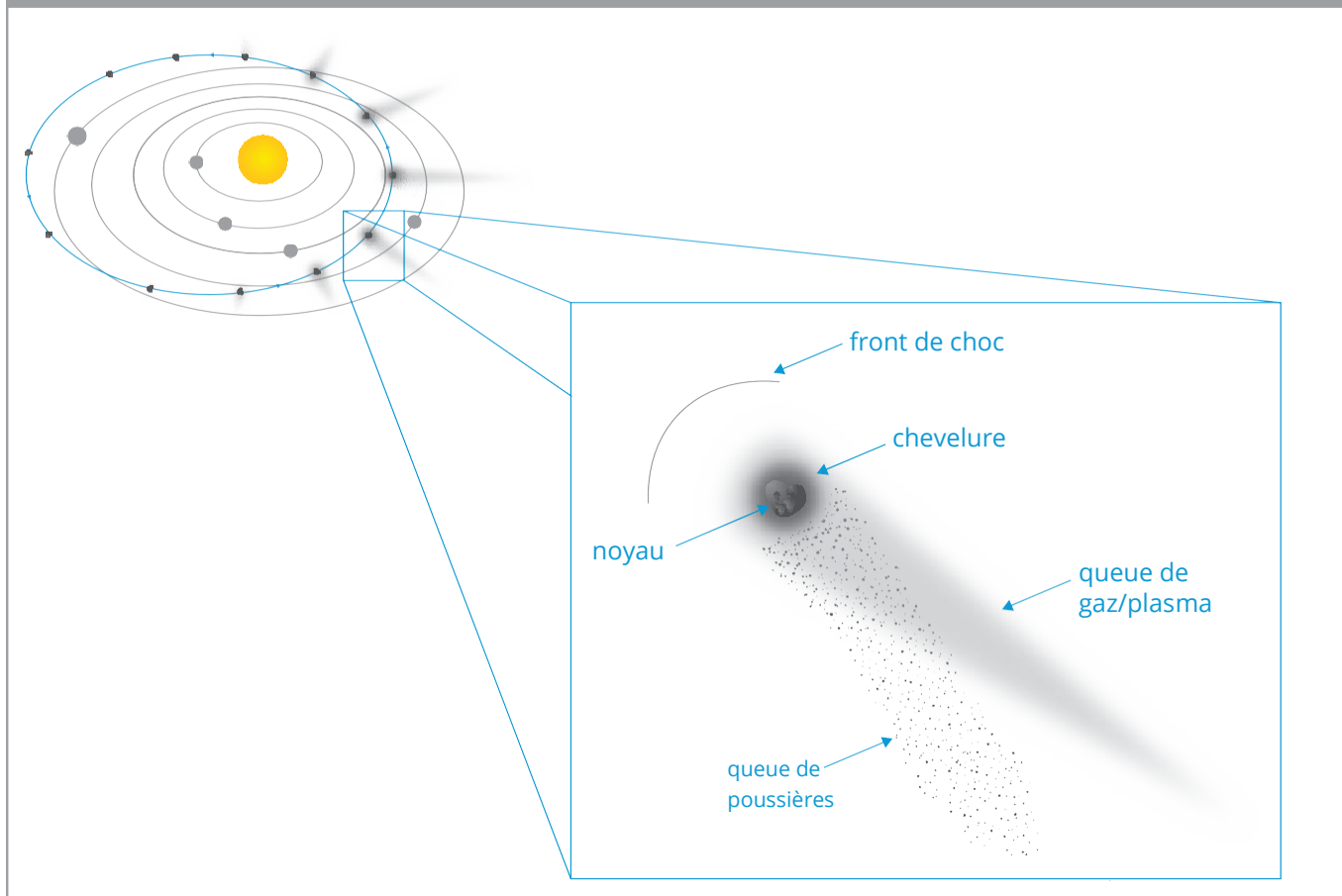


↑ Comparaison de la taille des noyaux de la comète 9P/Tempel et de la comète 103P/Hartley.

Pourquoi certaines queues de comètes ont-elles une forme si différente ?

La forme et l'apparence des queues de comètes sont le fruit de l'interaction entre le vent solaire et les radiations solaires avec les matériaux éjectés du noyau. On observe souvent deux queues qui pointent dans des directions différentes. L'une d'elle pointe toujours dans la direction opposée au Soleil. Il s'agit de la queue de plasma ou d'ions. La lumière ultraviolette émise par le Soleil ionise les gaz contenus dans la chevelure. Ces particules ionisées sont ensuite emportées loin de la comète par le vent solaire. L'autre queue est la queue de poussières, formée par la pression des radiations solaires qui pousse les petites particules solides de la chevelure loin du Soleil. La queue de poussières est légèrement incurvée dans la direction de la trajectoire de la comète (Figure A3). Étant donné que les taux d'activité solaire, la rotation du noyau et les vitesses de dégazage varient considérablement d'une comète à l'autre, on peut observer de nombreuses formes de queue de comète différentes.

Figure A3



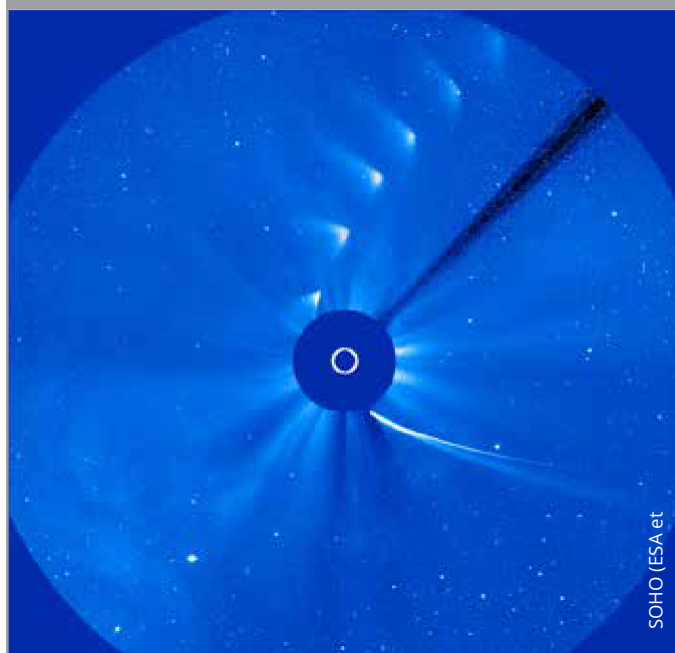
↑ Diagramme montrant les deux queues d'une comète et leur évolution au cours de l'orbite d'une comète autour du Soleil.

Combien de temps dure un noyau de comète ?

Les comètes perdent des composés volatils (par exemple : dioxyde de carbone, eau) et des poussières à chaque passage au périhélie, laissant derrière elles une traînée de débris. Cela signifie qu'un noyau peut avoir un nombre fini de passages au périhélie avant que tous ses composés volatils ne soient épuisés.

Par exemple, la comète 2012/S1 ISON est une comète rasante qui est passée au périhélie pour la première fois en 2013 (Figure A4). La comète 2012/S1 ISON semble avoir cessé de produire du gaz et de la poussière peu avant de dépasser le Soleil.

Figure A4



↑ Approche du Soleil par la comète ISON, image prise par le satellite SOHO de l'ESA et de la NASA du 28 au 30 novembre 2013.

Quels effets peuvent modifier l'orbite d'une comète lorsqu'elle s'approche au plus près du Soleil ?

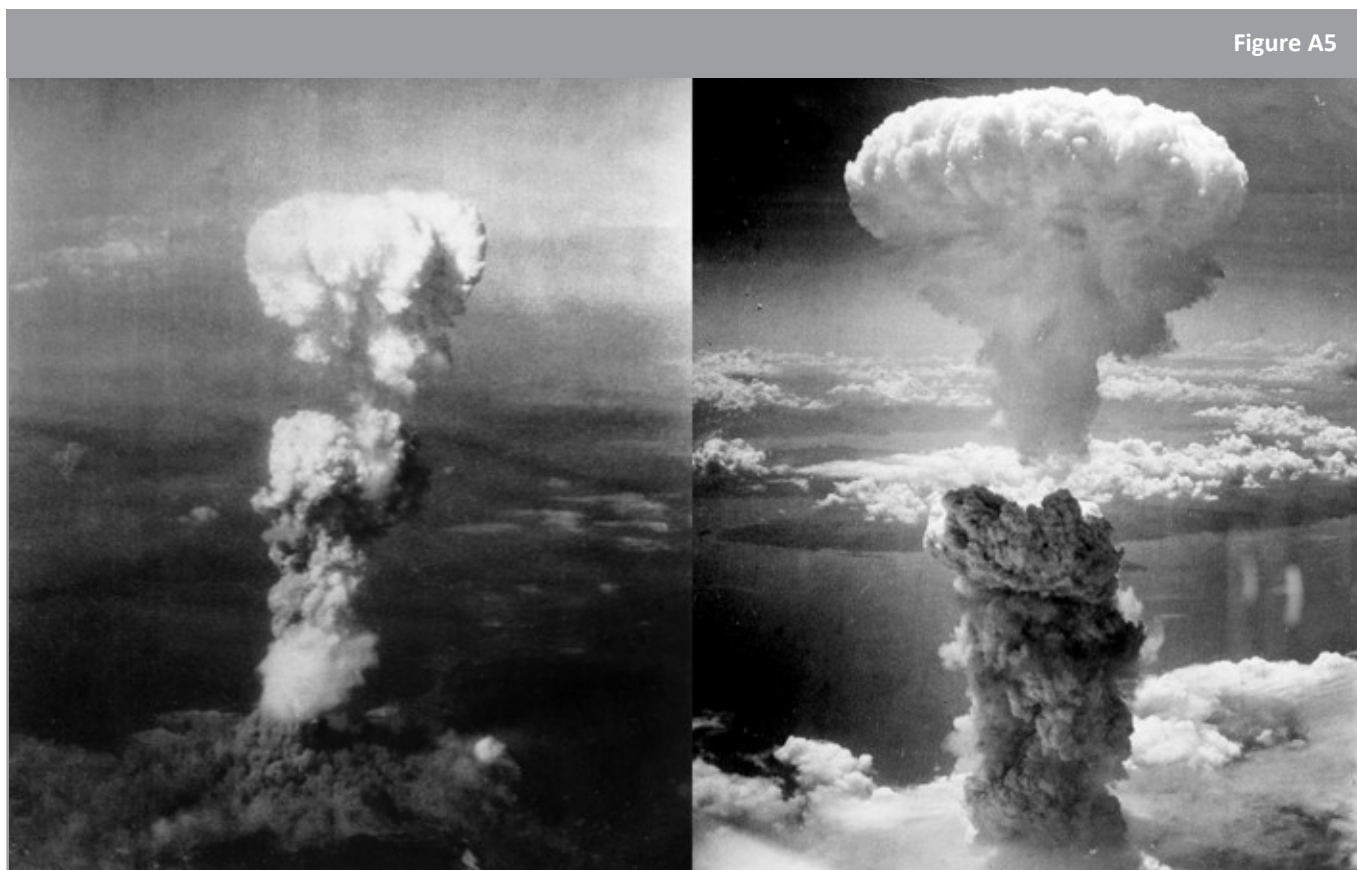
Lorsque les composés volatils d'un noyau de comète (comme le dioxyde de carbone et l'eau) commencent à chauffer à l'approche du Soleil, le dégazage peut créer un effet de recul. Tandis que le gaz est éjecté, il exerce une force égale et opposée (la troisième loi de Newton) sur la comète, lui donnant ainsi une très légère poussée. Il peut en résulter une légère modification de la trajectoire orbitale de la comète, mais également de sa période autour du Soleil, car le noyau est détourné de sa trajectoire prévue. Étant donné que la plupart des noyaux sont également en rotation (peut-être autour de plusieurs axes, en se déplaçant à la fois vers l'avant et sur le côté), les écarts peuvent varier considérablement d'une comète à l'autre.

Approfondissement de la discussion : est-il possible que des comètes ou des astéroïdes frappent la Terre ?

En utilisant les enseignements tirés des explosions nucléaires menées par divers pays depuis 1945, ainsi que l'équation de l'énergie cinétique, il est possible d'obtenir une bonne estimation de la taille de l'impacteur qui a créé le Meteor Crater.

Les énergies nucléaires sont mesurées en kilotonnes (kt) : 1 kt est égale au rendement énergétique de 1000 tonnes de TNT. $1 \text{ kt} = 4,2 \times 10^{12} \text{ J}$.

Les bombes atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki (Figure A5) avaient chacune un rendement énergétique d'environ 20 kt.



↑ Image de gauche : de la fumée s'échappe de la première bombe atomique au-dessus d'Hiroshima. Image de droite : bombardement atomique de Nagasaki.

Pour créer un cratère de la taille du Meteor Crater, dans le type de roche que l'on trouve dans la région, il faudrait environ 2,5 Mt (2 500 kt), soit environ 125 bombes d'Hiroshima. Un modèle de simulation mathématique/informatique suggère que l'impacteur a frappé la Terre à environ 12,8 km/s. Cela nous donne suffisamment d'informations pour calculer la taille approximative de l'impacteur.

De nombreux fragments de l'impacteur qui a formé Meteor Crater sont dispersés aux alentours du cratère. L'analyse de ces fragments montre que l'impacteur était composé à 92 % de fer et à 7 % de nickel (les 1 % restants contenaient des inclusions de silicate et d'autres éléments traces). L'impacteur avait une densité moyenne d'environ $7\,000\text{ kg m}^{-3}$.

À l'aide de ces informations, il est possible de faire les calculs suivants, en supposant que toute l'énergie cinétique de l'impacteur ait été convertie en énergie de souffle pour former le cratère :

- Résumé des paramètres
 Énergie cinétique, $E_k = 2\,500\text{ kt}$
 Vitesse d'entrée = $12,8\text{ km/s}$
 $1\text{ kt} = 4,2 \times 10^{12}\text{ J}$
 Densité de la météorite de fer, $\rho = 7\,000\text{ kg m}^{-3}$
- Convertissez en joule l'énergie nécessaire à la création du cratère.
 $E_k = 2\,500\text{ kt} = 2\,500 \times 4,2 \times 10^{12}\text{ J} = 1,05 \times 10^{16}\text{ J}$
- Utilisez l'équation de l'énergie cinétique pour déterminer la masse de l'impacteur.
 $E_k = 1/2 mv^2$

En réorganisant pour m :

$$m = (2E_k)/v^2 = (2 \times 1,05 \times 10^{16}\text{ J})/(12\,800\text{ m s}^{-1})^2 = 128 \times 10^6\text{ kg} = 128\,000\text{ t}$$
- Utilisez l'équation de la densité pour déterminer le volume de l'impacteur.
 Étant donné que masse = densité x volume
 Volume = masse/densité = $(128 \times 10^6\text{ kg})/(7\,000\text{ kg m}^{-3}) = 1,83 \times 10^4\text{ m}^3$
- En supposant que l'impacteur est sphérique, utilisez l'équation de sphère pour déterminer le rayon de l'impacteur. Une alternative est de modéliser l'impacteur sous forme de cube.
 Et puisque le volume d'une sphère = $(4/3)\pi r^3$

En réorganisant,

$$r^3 = (3 \times 1,83 \times 10^4\text{ m}^3)/(4 \times \pi) = 4\,371\text{ m}$$

et donc $r = 16,4\text{ m}$

Les élèves peuvent alors étudier les limites/incertitudes des hypothèses formulées dans la modélisation, notamment :

- en supposant une conversion à 100 % de l'énergie cinétique. L'énergie aurait également été perdue sous d'autres formes, telles que le son et le chauffage thermique de l'atmosphère.
- l'incertitude quant à la vitesse d'impact. Cette valeur est déduite des observations d'un ancien cratère d'impact, elle pourrait donc être inexacte et conduire à un calcul incorrect de la taille.
- l'effet de l'angle d'impact. La quantité de roches qui serait vaporisée/éjectée varie selon l'angle d'entrée. Étant donné que plusieurs facteurs d'origine sont déduits de cette preuve, l'angle d'entrée influe de façon significative sur les résultats. L'expérimentation avec différents angles d'entrée pour le même impacteur à l'aide du simulateur d'impact Down2Earth (voir ci-dessous et la section Liens) pourrait aider à développer ce point.

Simulateur d'impact en ligne - Down2Earth

Down2Earth (voir la section Liens) est un simulateur d'impact en ligne à des fins éducatives, qui permet aux élèves de définir les paramètres d'un impact, tels que la composition de l'impacteur (astéroïde ou comète), l'angle d'entrée, la taille, le type de roche sur le site d'impact et l'emplacement de l'impact. Les élèves peuvent prévoir l'effet de ces facteurs sur la taille du cratère et les associer aux transferts d'énergie pendant l'impact. Les élèves peuvent ensuite tester leurs prédictions dans un environnement virtuel.

→ CONCLUSION

Les comètes fournissent un contexte intéressant pour aborder de nombreux thèmes différents, allant des champs gravitationnels et des orbites, de l'énergie cinétique et du transfert d'énergie, à la spectroscopie des comètes et aux ingrédients nécessaires au développement de la vie. Notre fascination pour ces mondes gelés offre de nombreuses d'opportunités d'apprentissage passionnantes.

→ FICHE ELEVE

Cuisiner une mini comète

Dans cette activité, vous reproduirez un noyau de comète en utilisant des ingrédients courants pour représenter les principaux groupes de matériaux qui composent les noyaux de comète. Certains matériaux, comme la glace sèche, sont dangereux.

⇒ Votre enseignant vous expliquera comment les utiliser.

Équipement

- Glace sèche (environ 100 ml)
- Eau (environ 100 ml)
- Petits sacs poubelle
- 3 cuillères à café de terre
- 1 cuillère à café de poussière/poudre de carbone ou de poudre de graphite
- 1 cuillère à café de whisky, de vodka ou de vin rouge (composant méthanol/éthanol)
- Quelques gouttes de sauce soja (composant organique)
- Une goutte de produit de nettoyage (composant ammoniac)
- Gobelet en plastique jetable
- Seau pour éliminer les déchets
- Cuillère à café
- Contenant en polystyrène pour la glace sèche
- Gants de protection thermique
- Lunettes de sécurité pour tous les participants
- Blouse de laboratoire

Instructions

1. Placez les ingrédients suivants dans un gobelet en plastique jetable recouvert d'un sac poubelle : eau, terre, poussière de carbone, vin/alcool, produit de nettoyage et sauce soja. Ils représentent certains des composants d'une véritable comète. Mélangez bien avec la cuillère à café.
2. Ajoutez la glace sèche. Mélangez l'eau et la glace sèche. Puis, en portant des gants de protection, formez une boule avec la comète pendant environ 30 secondes. Ne la compressez pas trop, sinon la comète risque de se briser.
3. Une fois l'activité terminée, mettez la comète dans un sac poubelle et placez-la dans le seau fourni par votre enseignant.

Calcul de la masse, de la vitesse et de l'énergie de la comète

Dans cette série de questions, vous étudierez les masses, les vitesses et les énergies des comètes à l'aide des données fournies dans le tableau ci-dessous.

Masse du Soleil	$m_{\text{Soleil}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
Densité de la glace	$r = 1000 \text{ kg m}^{-3}$
Constante de gravitation	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Questions

- Une comète a une énergie cinétique de $4,5 \times 10^{13} \text{ J}$. Elle voyage à une vitesse de 34 km/s. Calculez la masse de la comète.
- Une grande comète de masse $5,2 \times 10^8 \text{ kg}$ évite la Terre de justesse et frôle l'atmosphère. Au moment de la mesure, sa vitesse était de 49,0 km/s.
 - Calculez l'énergie cinétique de la comète (en J).
 - Si l'énergie libérée par l'explosion de 1 kilotonne (1000 tonnes) de TNT est de $4,2 \times 10^{12} \text{ J}$, combien de kilotonnes d'énergie cette comète aurait-elle eues si elle avait frappé la Terre ?
 - Après que la comète a frôlé la Terre, sa masse et sa trajectoire ont été modifiées. Donnez une raison pour cela.
- Une comète décrit une orbite elliptique autour du Soleil. Son point d'approche le plus proche du Soleil est à une distance de $4,9 \times 10^{10} \text{ m}$. Sa vitesse est alors de $8,9 \times 10^4 \text{ m/s}$. Elle provient du nuage d'Oort, bien au-delà de l'orbite de Neptune. Quelle est sa vitesse lorsqu'elle se trouve à $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$ du Soleil (soit la distance orbitale de la Terre par rapport au Soleil) ?
- À votre avis, dans quelle mesure les impacts de comètes et d'astéroïdes ont-ils affecté la Terre et la vie terrestre au cours de son histoire ?

→ CONTEXTE SPATIAL À L'ESA

Giotto

La comète 1P/Halley a une période orbitale d'environ 75,5 ans (ce chiffre varie légèrement d'une orbite à l'autre en raison d'un dégazage de son noyau et des perturbations gravitationnelles). Elle a régulièrement été observée depuis la Terre (à l'œil nu) et des observations de cette comète sont signalées depuis environ 240 av. J.-C. Les enregistrements de ces observations ont permis aux astronomes de circonscrire l'orbite de la comète 1P/Halley à quelques mois autour du périhélie. Une représentation célèbre de la comète 1P/Halley visible depuis la Terre a été réalisée sur la Tapisserie de Bayeux, qui dépeint la bataille d'Hastings en 1066 (Figure 10).

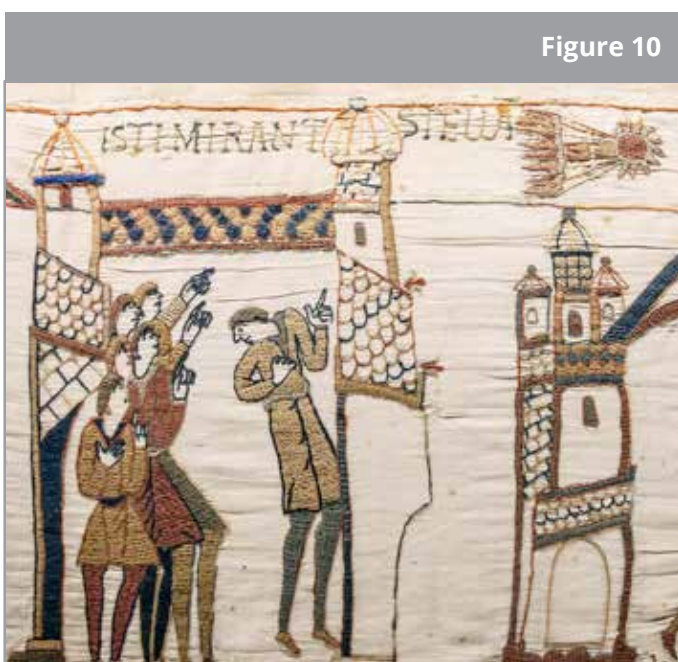


Figure 10

↑ La comète 1P/Halley représentée sur la Tapisserie de Bayeux.

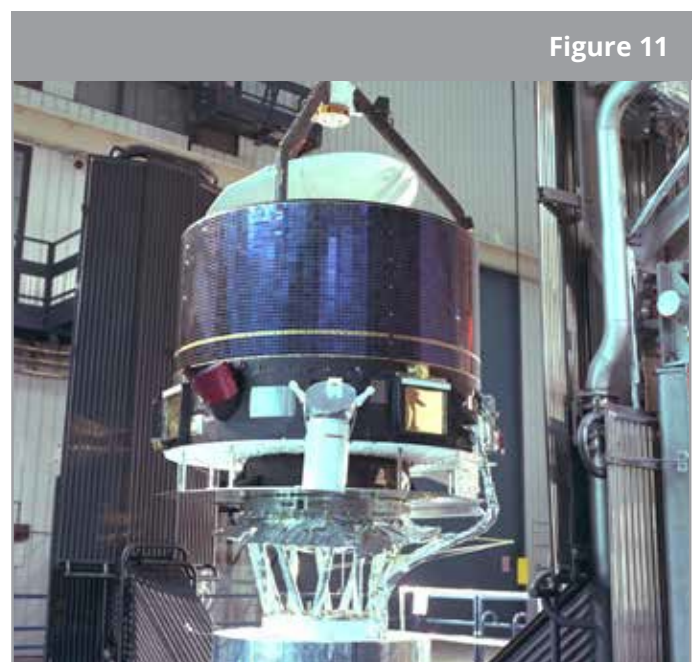


Figure 11

↑ Giotto prêt pour le test de simulation solaire. Copyright : ESA

Plus récemment, en 1986, la comète 1P/Halley a fait sa première approche du Soleil depuis le début de l'ère spatiale. La sonde spatiale Giotto de l'ESA (Figure 11) a survolé son noyau à une distance inférieure à 600 km et a obtenu les premières images en gros plan d'un noyau cométaire (Figures 12 et 13). Ces observations ont transformé la compréhension que les scientifiques avaient de ces objets glacés.

Giotto a observé que la surface du noyau était très sombre, plus noire que le charbon : cela suggérait qu'elle était recouverte d'une couche de poussière. Les données ont montré que l'abondance ou le rapport des éléments légers (hydrogène, carbone et oxygène) présents dans la comète 1P/Halley était semblable à celui du Soleil, ce qui signifie que cette comète est constituée des matériaux originels ayant permis la formation du Système solaire.

Sur le montage d'images de la Figure 12, on peut observer les caractéristiques de la comète devenant de plus en plus visibles à mesure que la sonde se rapproche du noyau.

Figure 12

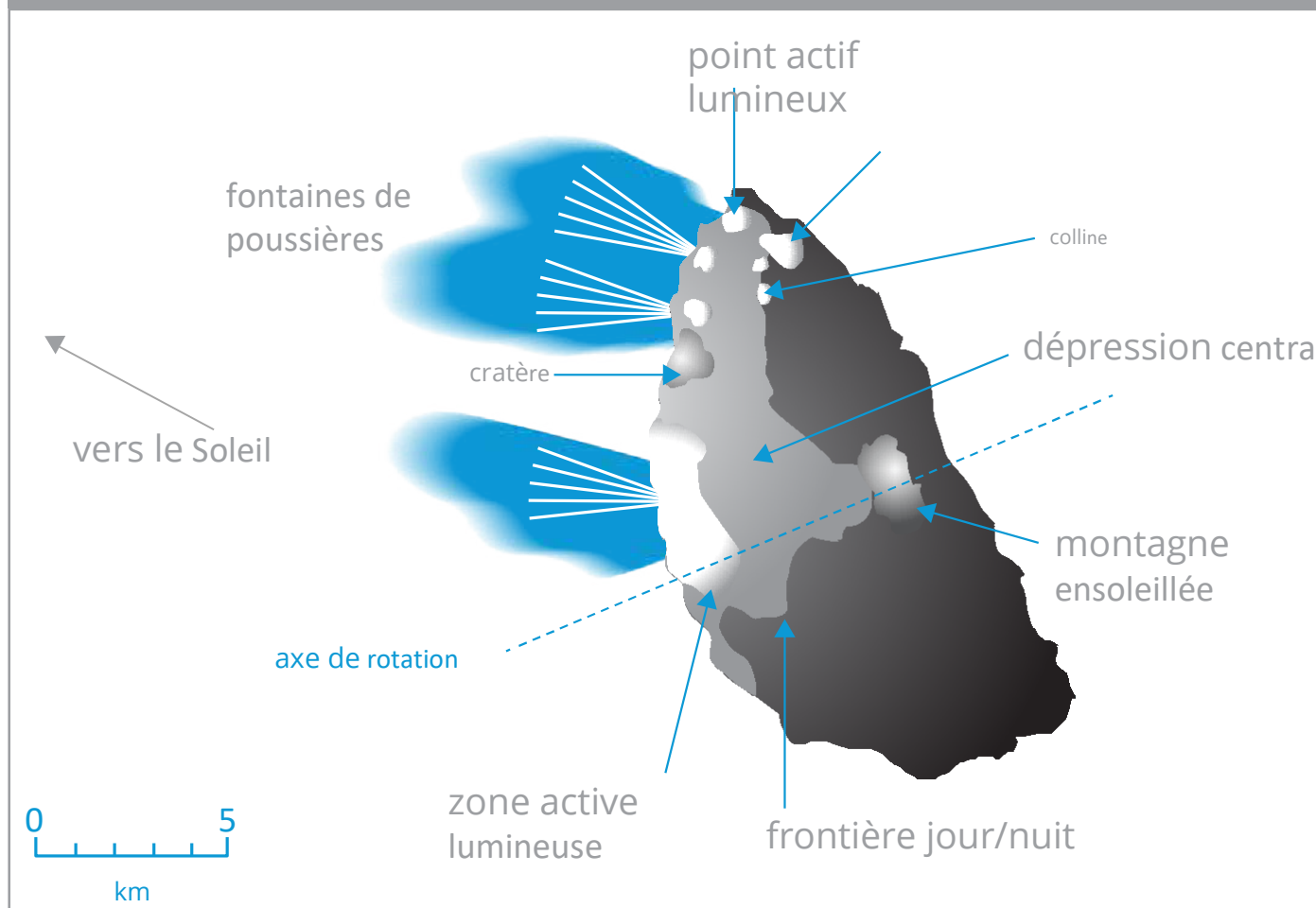


↑ Le noyau de la comète 1P/Halley, vu par Giotto lors de son approche la plus proche.

Figure 13



↑ Image du noyau de la comète 1P/Halley vu par Giotto.



↑ Principales caractéristiques identifiées sur les images de la comète 1P/Halley envoyées par la sonde Giotto de l'ESA.

La Figure 14 montre les caractéristiques interprétées à partir d'une image du noyau de la comète 1P/Halley (Figure 13). On peut observer des jets de matière, ou fontaines de poussières, qui jaillissent de la surface du noyau. Ils sont le fruit de la sublimation rapide des composés volatils sur la surface du noyau et à proximité de celle-ci. À mesure que la pression de ces composés volatils en expansion augmente, ils sont libérés lors d'un processus appelé dégazage.

SOHO - Solar and Heliospheric Observatory (observatoire solaire et héliosphérique)

Exploité conjointement par l'ESA et la NASA, l'Observatoire solaire et héliosphérique, ou SOHO, surveille le Soleil à une distance de 1,5 million de kilomètres de la Terre (Figure 15). Là-bas, la gravité combinée de la Terre et du Soleil maintient l'engin spatial sur une orbite suivant la ligne Terre-Soleil. Depuis cette position, SOHO bénéficie d'une vue ininterrompue du Soleil et peut donc effectuer des observations 24 heures sur 24.

SOHO a été conçu pour étudier la structure interne du Soleil, son atmosphère externe étendue (la couronne) ainsi que l'origine du vent solaire. Lancé en 1995, SOHO a observé le Soleil durant un cycle solaire complet, fournissant aux scientifiques des données précieuses pour les aider à comprendre les hauts et les bas du comportement du Soleil sur le long terme.

Depuis son point de vue unique, SOHO a également pu observer des milliers de comètes rasantes, y compris la comète 2012/S1 ISON, une comète rasante qui est passée au périhélie en 2013. SOHO est l'un des plus grands découvreurs de comètes de tous les temps et a découvert plus de 2 700 comètes depuis son lancement.

Figure 15



↑ Vue d'artiste de SOHO.

Comète 103P/Hartley et Herschel

L'observatoire spatial infrarouge Herschel de l'ESA (Figure 16) a été lancé en 2009 et transporte le télescope infrarouge le plus grand et le plus puissant jamais utilisé dans l'espace. Il a été le premier observatoire à couvrir tout le spectre, de l'infrarouge lointain aux longueurs d'onde submillimétriques. Les observations de Herschel ont exploré l'infrarouge lointain en profondeur, plus que toute autre mission précédente, en étudiant les régions poussiéreuses et froides du cosmos, proches ou éloignées de nous.



Figure 16

↑ Vue d'artiste de l'observatoire spatial infrarouge Herschel.

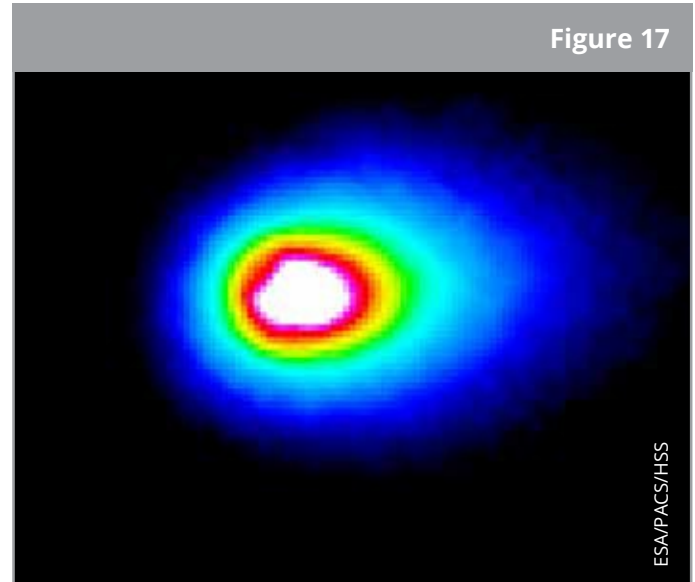


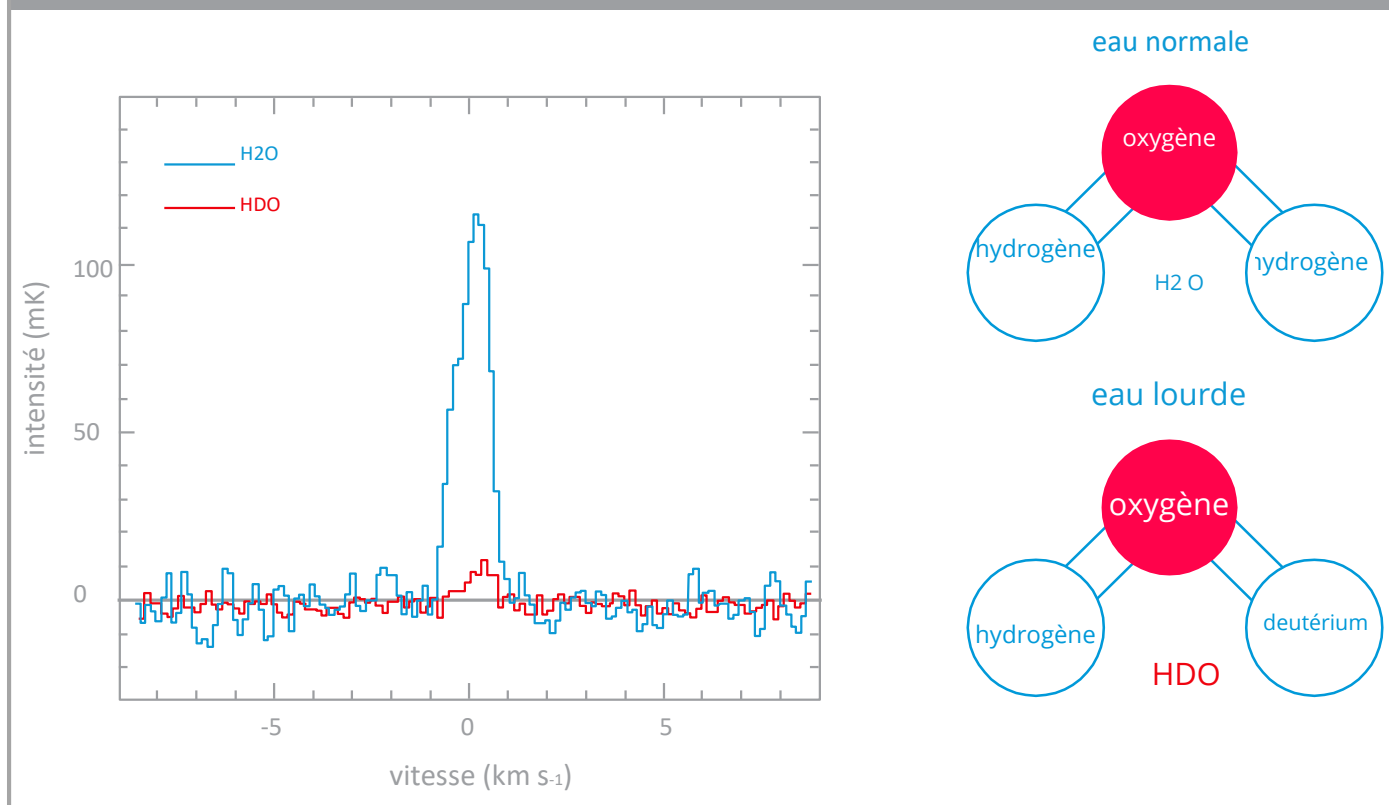
Figure 17

↑ Comète 103P/Hartley vue par l'instrument PACS de l'observatoire spatial infrarouge Herschel.

En 2010, Herschel a effectué des observations spectroscopiques à infrarouge lointain de la comète 103P/Hartley et a observé l'émission par son noyau de grandes quantités d'eau, comme le montrent les zones rouge et blanche sur la Figure 17. Ces observations ont été effectuées près du périhélie de la comète (approche la plus proche du Soleil).

Les mesures de spectroscopie infrarouge, effectuées par l'instrument HIFI à bord de Herschel, ont permis d'estimer le rapport entre le deutérium (hydrogène lourd, des atomes d'hydrogène avec un neutron et un proton dans leur noyau) et l'hydrogène présents dans l'eau émise par le noyau de la comète (c'est-à-dire le rapport entre l'eau normale et l'eau lourde ; Figure 18). On a constaté que la teneur en eau de cette comète, contrairement à celle d'autres comètes étudiées, présente un rapport identique à la teneur en eau des océans terrestres. Ces analyses ont apporté la première preuve directe permettant d'étayer la théorie selon laquelle la teneur en eau initiale de la Terre proviendrait de la même source que certaines comètes.

Figure 18



↑ Avec un neutron supplémentaire dans l'un des composants hydrogène de la molécule, l'eau lourde produit un pic spectral plus petit.

Rosetta

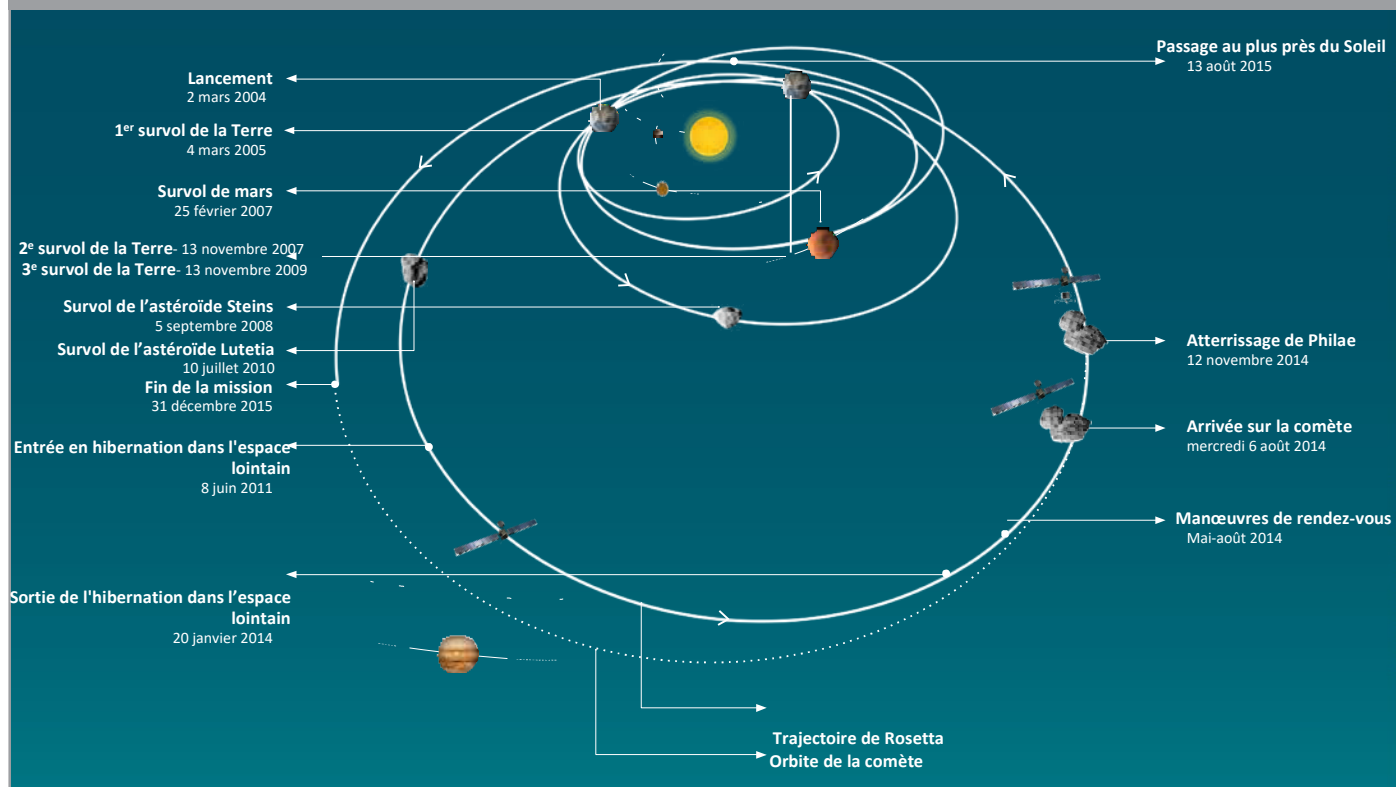
La sonde spatiale de la mission Rosetta de l'ESA a été lancée en 2004 et a parcouru l'espace pendant 10 ans avant de rejoindre la comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko – et, au final, de se poser sur son noyau.

Le principal objectif de Rosetta est de contribuer à la compréhension de l'origine et de l'évolution du Système solaire. La composition d'une comète reflète celle de la nébuleuse pré-solaire qui a donné naissance au Soleil et aux planètes du Système solaire, il y a plus de 4,6 milliards d'années. Une analyse approfondie de la comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko par Rosetta et son atterrisseur fournira des informations cruciales pour comprendre la formation du Système solaire.

Il existe des éléments probants sur le rôle essentiel que les comètes ont joué dans l'évolution des planètes, car au début du Système solaire, les collisions de comètes avec d'autres corps célestes étaient beaucoup plus fréquentes qu'aujourd'hui. Par exemple, les comètes ont pu amener l'eau sur Terre. La composition chimique de l'eau de la comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko sera analysée pour voir si elle est identique à celle des océans terrestres. Outre la glace et les poussières, les comètes contiennent de nombreuses molécules complexes, dont des matériaux organiques qui ont pu jouer un rôle crucial dans l'évolution de la vie sur Terre.

Pour atteindre la comète, Rosetta a dû effectuer une série d'« effets de fronde » gravitationnelle. Lors de cette manœuvre, un engin spatial utilise la gravité d'un corps céleste pour accélérer (Figure 19). Afin de pouvoir s'enfoncer plus profondément dans l'espace, Rosetta a dû effectuer quatre effets de fronde gravitationnelle, dont trois survols rapprochés de la Terre et un survol de Mars. Chaque effet de fronde gravitationnelle a modifié l'énergie cinétique de Rosetta, et donc la vitesse de la sonde spatiale, en modifiant les dimensions de l'orbite elliptique.

Figure 19



↑ La sonde spatiale Rosetta de l'ESA a effectué une série d'« effets de fronde » gravitationnelle planétaires afin d'atteindre sa destination.

En raison de la durée du voyage, Rosetta a été mise en mode hibernation en juin 2011 pour limiter sa consommation d'énergie et de carburant, et pour minimiser ses coûts d'exploitation. Quasiment tous les systèmes électriques de Rosetta ont été éteints, à l'exception de l'ordinateur et de plusieurs appareils de chauffage.

En janvier 2014, le « réveil » interne pré-programmé de Rosetta a délicatement réveillé la sonde en vue de son rendez-vous avec la comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko. Après le réveil, les 11 instruments scientifiques de la sonde orbitale et les 10 instruments de son atterrisseur ont été réactivés et préparés pour les observations scientifiques. Ensuite, une série de dix manœuvres critiques de correction orbitale ont été réalisées afin de réduire la vitesse de la sonde spatiale par rapport à la vitesse de la comète, et de faire ainsi coïncider leurs orbites elliptiques.

Après être arrivée à proximité de la comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko, le 6 août 2014, Rosetta a entamé de nouvelles manœuvres pour se placer en « orbite » autour du noyau de la comète. Depuis ce point de vue, la suite d'instruments de Rosetta peut effectuer une étude scientifique détaillée de la comète en examinant et en cartographiant sa surface, avec une précision inégalée (Figure 20).

Figure 20



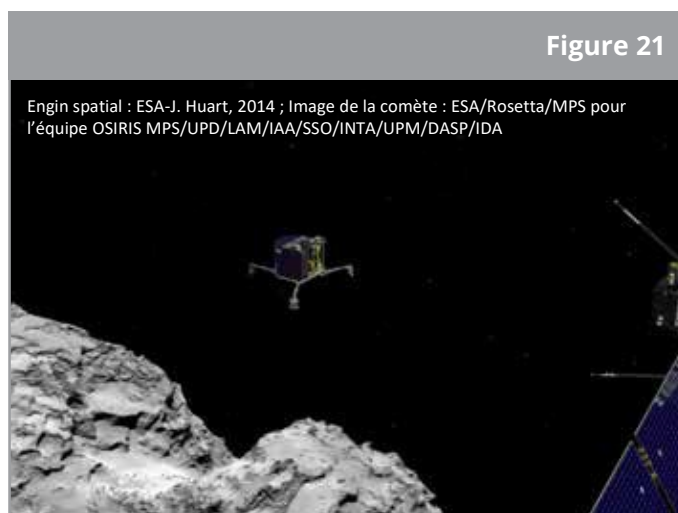
↑ Mosaïque NAVCAM de quatre images de la comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko prises le 19 septembre 2014 lorsque Rosetta était à 28,6 km de la comète.

Après l'atterrissage, Rosetta a continué d'accompagner la comète sur sa trajectoire elliptique. Rosetta a accompagné la comète tandis qu'elle accélérât de nouveau vers le Système solaire interne et a continué d'étudier et d'observer de près le réchauffement du noyau à mesure que la comète glacée s'approchait du Soleil.

En novembre 2014, après avoir cartographié et analysé le noyau de la comète pendant plusieurs mois, Rosetta a déployé son atterrisseur Philae pour tenter le tout premier atterrissage sur le noyau d'une comète. En raison de la très faible gravité de la comète, Philae a utilisé des harpons et des vis à glace pour s'accrocher à sa surface. La Figure 21 montre une vue d'artiste de la sonde déployant Philae sur la surface de la comète.

L'atterrisseur Philae utilise 10 instruments, dont un foret, pour collecter des échantillons de surface, et des **spectromètres*** pouvant analyser directement la structure et la composition de la comète.

Figure 21



Engin spatial : ESA-J. Huart, 2014 ; Image de la comète : ESA/Rosetta/MPS pour l'équipe OSIRIS MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

↑ L'atterrisseur Philae fournira des informations inédites sur la surface et la structure interne d'une comète.

*Spectromètre : instrument qui permet de diviser la lumière en ses longueurs d'onde constitutives afin de pouvoir mesurer les propriétés de la source lumineuse.

→ ANNEXES

Glossaire

Aphélie : point d'une orbite le plus éloigné du Soleil.

Unité astronomique (UA) : 1 UA est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, soit le rayon orbital de la Terre, qui est d'environ 150 millions de km.

Front de choc (comète) : surface d'interaction entre les ions contenus dans la chevelure de la comète et le vent solaire. Le front de choc se forme sous l'effet de la vitesse orbitale relative de la comète et du vent solaire supersoniques. Il se forme en amont de la comète, dans la direction d'écoulement du vent solaire. Dans le front de choc, de grandes concentrations d'ions cométaires s'accumulent et chargent le champ magnétique solaire avec du plasma. Il en résulte des lignes de champ qui se courbent autour de la comète, emprisonnant les ions cométaires et formant une queue de gaz, de plasma et d'ions.

Survол : passage d'un engin spatial à proximité d'une planète ou d'un autre corps céleste. Si l'engin spatial utilise le champ gravitationnel de la planète pour augmenter sa vitesse et modifier sa trajectoire, il s'agit d'un « effet de fronde gravitationnelle », également appelé « manœuvre d'assistance gravitationnelle ».

Perturbations gravitationnelles : modifications de l'orbite d'un corps céleste (par exemple : planète, comète) dues à des interactions avec les champs gravitationnels d'autres corps célestes (par exemple : planètes géantes, autres étoiles).

Points de Lagrange : dans toute configuration orbitale, il existe cinq points où un objet, affecté uniquement par la gravité, peut demeurer en orbite de façon stable. Pour plus d'informations, veuillez vous reporter à la vidéo « ESA : teach with space - les puits de gravité | VP04 » (voir la section Liens).

Période orbitale : temps nécessaire à un corps céleste pour effectuer une orbite complète.

Périhélie : point d'une orbite le plus proche du Soleil.

Mouvement rétrograde d'une planète : mouvement apparent d'une planète dans le ciel nocturne dans la direction opposée au mouvement qui est normalement observé (mouvement prograde).

Vent solaire : flux de particules de haute énergie (plasma) émis par l'atmosphère supérieure du Soleil dans toutes les directions. Il contient surtout des électrons et des protons.

Se sublimer (sublimation) : lorsque, sous l'effet de la chaleur, une substance passe directement de l'état solide à l'état gazeux, sans passer par l'état liquide. Lorsque le gaz est refroidi, il forme généralement un dépôt solide.

→ Liens

Rosetta

Site web du CNES sur Rosetta : <https://rosetta.cnes.fr/fr>

Site Web de l'ESA sur Rosetta : www.esa.int/rosettaBlog de l'ESA sur Rosetta : blogs.esa.int/rosetta/

ESA Rosetta website: www.esa.int/rosetta

Vidéos et animations sur Rosetta : www.esa.int/spaceinvideos/Missions/Rosetta

Images de Rosetta : [www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/\(class\)/image](http://www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/(class)/image)

Fiche d'informations de Rosetta, incluant le calendrier de la mission :

www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Rosetta_factsheet

L'histoire de Rosetta à ce jour : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_the_story_so_far

À la poursuite des comètes : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Chasing_a_comet

12 ans à travers l'espace : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2013/10/Rosetta_s_twelve-year_journey_in_space

Rosetta en orbite autour d'une comète : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Procédure de mise sur orbite autour d'une comète : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/08/How_to_orbit_a_comet

Comètes

Articles sur les comètes du site ESA Kids :

www.esa.int/esaKIDSen/SEMWK7THKHf_OurUniverse_0.html

Site Web de l'ESA sur Rosetta (technique) : www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta

Articles sur notre univers du site ESA Kids : www.esa.int/esaKIDSen/SEMYC9WJD1E_OurUniverse_0.html

Giotto

Site Web de l'ESA sur Giotto :

sci.esa.int/giotto/

Présentation de Giotto : www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Giotto_overview

Herschel

Site web du CNES sur Herschel : <https://herschel.cnes.fr/fr>

Site de l'ESA sur l'Observatoire spatial Herschel : www.esa.int/herschel

Les océans terrestres proviennent-ils des comètes ? :

www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Did_Earth_s_oceans_come_from_comets

SOHO

Site web du CNES sur SOHO : <https://soho.cnes.fr/fr>

Site de l'ESA sur SOHO : soho.esac.esa.int

Vidéo de l'approche du Soleil par la comète ISON, vue par le satellite SOHO de l'ESA et de la NASA :

sci.esa.int/soho/54346-soholasco-view-of-comet-ison-27-30-november-2013/

Impact terrestre

Simulateur d'impact Down2Earth : education.down2earth.eu/

Collection « Teach with space »

Guide de l'enseignant et activités pour les élèves ESA : teach with space – Les puits de gravité | P04a et P04b :

En français : <https://esero.fr/wp-content/uploads/2020/12/P04a-Gravity-Wells-Teacher-guide-FR.pdf>

En français : <https://esero.fr/wp-content/uploads/2020/12/P04b-Gravity-Wells-Student-activity-FR.pdf>

Vidéo ESA : teach with space - Les puits de gravité | VP04 :

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/07/Gravity_wells_-_classroom_demonstration_video_VP04

Guide de l'enseignant et activités pour les élèves ESA : teach with space - Les ellipses | P02 :

En anglais : esamultimedia.esa.int/docs/edu/P02_Marble-ous_ellipses_teacher_guide.pdf

En français : https://esero.fr/wp-content/uploads/2020/12/P02_Marble-ous-ellipses-teacher-guide-and-student-worksheet-answers_FR.pdf

Vidéo ESA : teach with space - Les ellipses | VP02 :

https://www.esa.int/Education/Teach_with_Rosetta/Marble-ous_ellipses_-_speed_and_time_of_orbiting_bodies_Teach_with_space_P02

Guide de l'enseignant et activités pour les élèves ESA : teach with space – Balles barycentriques | P07 :

En français : <https://esero.fr/wp-content/uploads/2020/12/P07-Barycentric-balls-FR.pdf>

Vidéo ESA : teach with space - Cuisiner une comète | VP06 :

https://www.esa.int/Education/Teach_with_Rosetta/Cooking_a_comet_-_ingredients_for_life_Teach_with_space_P06

<https://esero.fr/tutoriels-en-ligne/>

Ressources éducatives du CNES

Mieux connaître notre système solaire :

<https://enseignants-mediateurs.cnes.fr/fr/enseignants-et-mediateurs/ressources/connaitre-notre-systeme-solaire>

Exposition et malette pédagogique sur la mission Rosetta :

<https://enseignants-mediateurs.cnes.fr/fr/enseignants-et-mediateurs/ressources/mallettes-pedagogiques>

<http://www.fermedesetoiles.com/pages/49>

Explorer l'Univers : Comètes, Astéroïdes et autres corps

<https://jeunes.cnes.fr/fr/spatiotheque/explorer-lunivers/cometes-asteroides-et-autres-corps>

teach with space – Cuisiner une comète | P06

www.esa.int/education

<https://esero.fr>

Développé pour l'ESA par la National Space Academy,
Royaume-Uni Illustrations par Kaleidoscope Design, NL

Traduction et adaptation par ESERO France, CNES

Contact : esero.france@cnes.fr

Une production ESA Education

Copyright © European Space Agency 2014

Copyright © ESA, ESERO France, CNES 2021