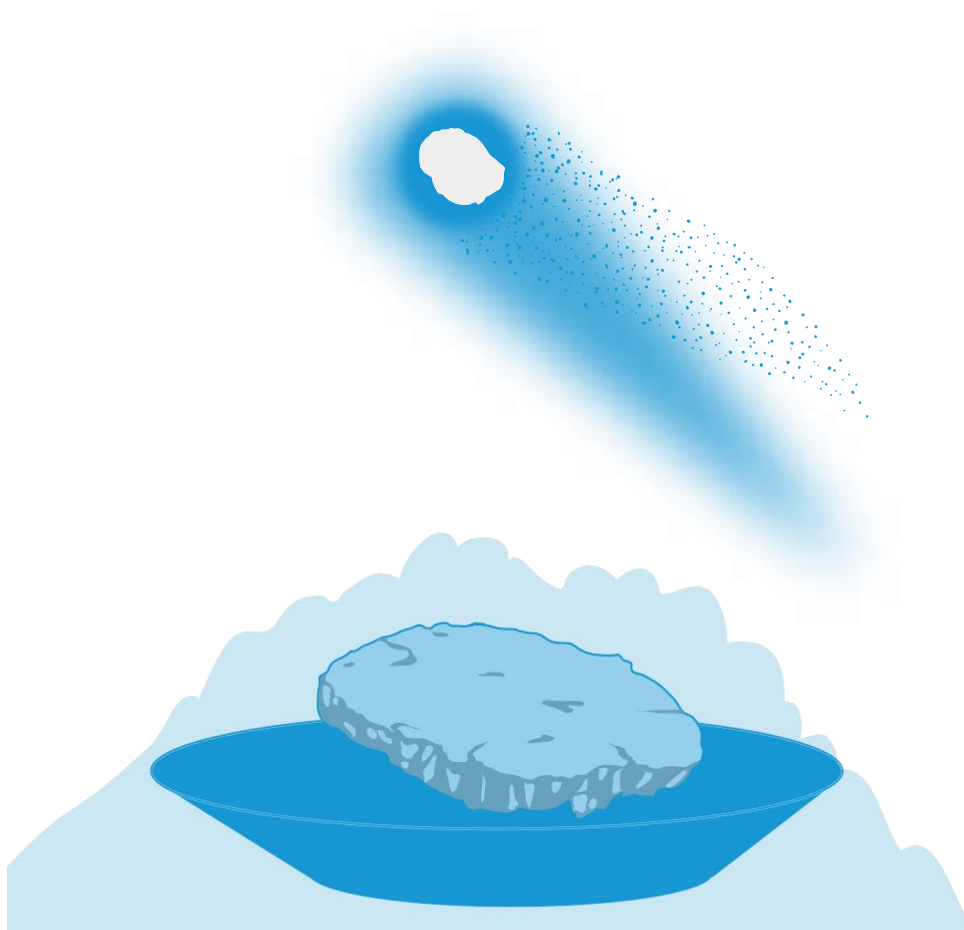


teach with space

→ CUISINONS UNE COMÈTE

Des ingrédients pour la vie ?



→ INTRODUCTION

Les comètes sont pour ainsi dire des capsules temporelles qui contiennent des informations sur les premiers temps du Système solaire. Pour comprendre ce que sont les comètes, d'où elles viennent et quelle est leur influence sur l'évolution de la Terre, il faut chercher à savoir de quelles matières elles sont faites. La démonstration par le professeur, l'activité pratique à accomplir par les élèves et la discussion qui en résulte donnent un aperçu des éléments chimiques qui composent les comètes. Une discussion et une activité complémentaires au sujet des impacts sur la Terre et les calculs de l'énergie cinétique que cela implique sont également incluses.

En bref	page 3
Connaissances de fond	page 4
Activité – Cuisinons une comète	page 12
Discussion	page 14
Extension de la discussion	page 18
Conclusion	page 21
Fiches de travail pour les élèves	page 22
Space context @ ESA	page 24
Giotto	page 24
SOHO	page 27
Comète 103P/Hartley et Herschel	page 28
Rosetta	page 29
Annexe	page 32
Glossaire	page 32
Réponses fiches de travail	page 33
Liens	page 36

→ CUISINONS UNE COMÈTE

Des ingrédients pour la vie ?

EN BREF

Tranche d'âge : 14-18 ans

Type : démonstration par l'enseignant et activité à accomplir par les élèves

Difficulté : facile

Durée de préparation pour l'enseignant : 20 minutes

Temps nécessaire pour la leçon : 20 minutes à 1 heure

Coûts par kit : moyens (5 - 25 euros)

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

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

Ce dont vous aurez également besoin



↑ Vidéo Cooking a comet (Cuisinons une comète). Voir la section Liens.

Ce que les élèves devraient déjà connaître

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

Résultats de l'apprentissage

1. Les élèves devraient comprendre les différences fondamentales entre les comètes et les astéroïdes.
2. Les élèves devraient être familiarisés avec les paramètres de la composition des comètes.
3. Les élèves devraient être en mesure de calculer de manière simple les conversions d'énergie qui se produisent au moment de l'impact entre une comète ou un astéroïde et une planète.

Liens pédagogiques

Physique

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

Astronomie

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

Chimie

- Changements de phase

Aperçu

Dans cette activité, les enseignants et les élèves simulent un noyau de comète dans la salle de classe. Les ingrédients utilisés reproduisent fidèlement les matières que l'on trouve dans un authentique noyau de comète, comme on peut le découvrir au moyen de la spectroscopie combinée avec les résultats des survols de différentes comètes effectués par des sondes spatiales.

→ CONNAISSANCES DE FOND

Que sont les comètes ?

Les comètes sont des petits mondes glacés qui proviennent principalement de deux régions du Système solaire (Figure 1). Les comètes à période courte (dont la **période orbitale*** est inférieure à 200 ans) viennent de la ceinture de Kuiper, une région juste au-delà de l'orbite de Neptune où des résidus gelés datant de la formation du Système solaire se sont assemblés sous la forme d'un disque. On suppose que les comètes à période longue (dont la période orbitale peut atteindre plusieurs dizaines de milliers d'années) ont leur origine dans un halo sphérique de matière glacée situé en bordure du Système solaire et appelé le nuage d'Oort. S'étendant jusqu'à une distance de plusieurs milliers d'**unités astronomiques (UA)***, le nuage d'Oort est bien trop éloigné pour qu'on puisse en obtenir directement des images. Au lieu de cela, nous devons remonter l'orbite d'une comète à période longue afin d'en trouver son origine (Figure 2).



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

La plupart des comètes font le tour du Soleil sur une orbite stable. Toutefois, 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, quant à eux, par les **perturbations gravitationnelles*** causées par les mouvements d'autres étoiles. Ces perturbations peuvent parfois modifier les orbites de ces petits mondes froids en les envoyant vers le centre du Système solaire.

Lorsque ces objets se rapprochent du Soleil, ils commencent à s'échauffer et la glace qu'ils contiennent se **sublime***. La structure originelle est ce qu'on appelle maintenant le « noyau ». À mesure que le noyau s'échauffe, il libère du gaz et de la poussière qui produisent une « atmosphère » ténue, mais très étendue, qu'on appelle la chevelure (Figure 3).

Lorsque la comète se rapproche du Soleil, l'interaction entre sa chevelure et les niveaux croissants de rayonnements solaires et le **vent solaire*** produit les spectaculaires « queues » qui leur sont le plus souvent associées. Parfois, la queue d'une comète est si lumineuse qu'un observateur placé sur la Terre peut la voir en plein jour.

***Période orbitale** : temps nécessaire pour parcourir une orbite complète.

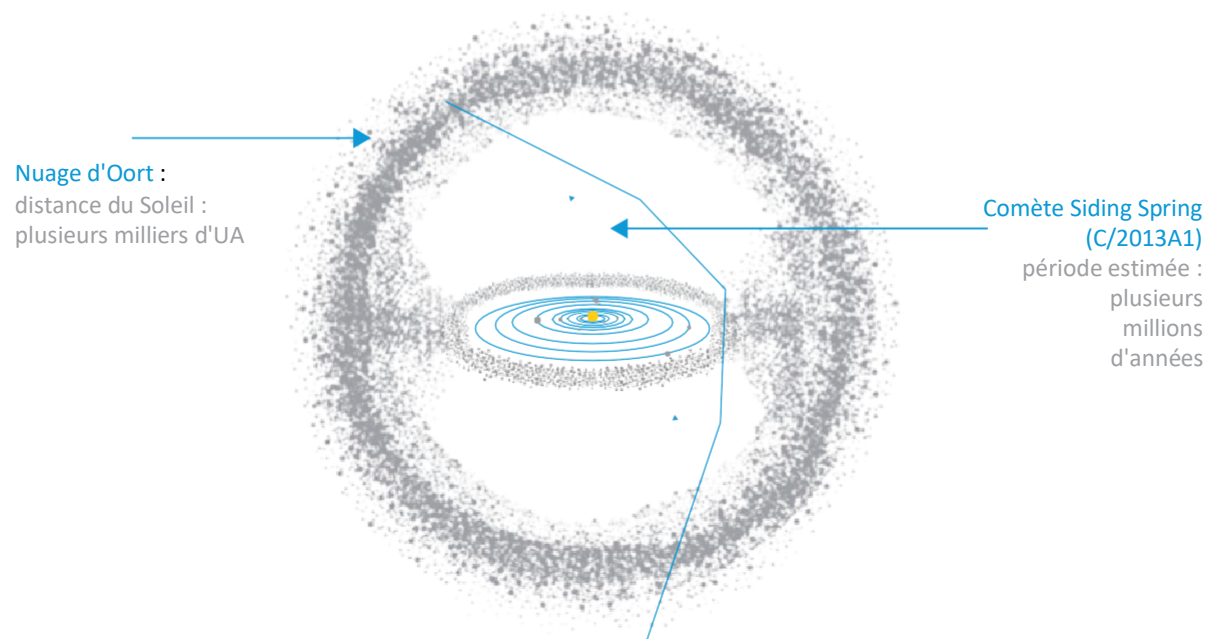
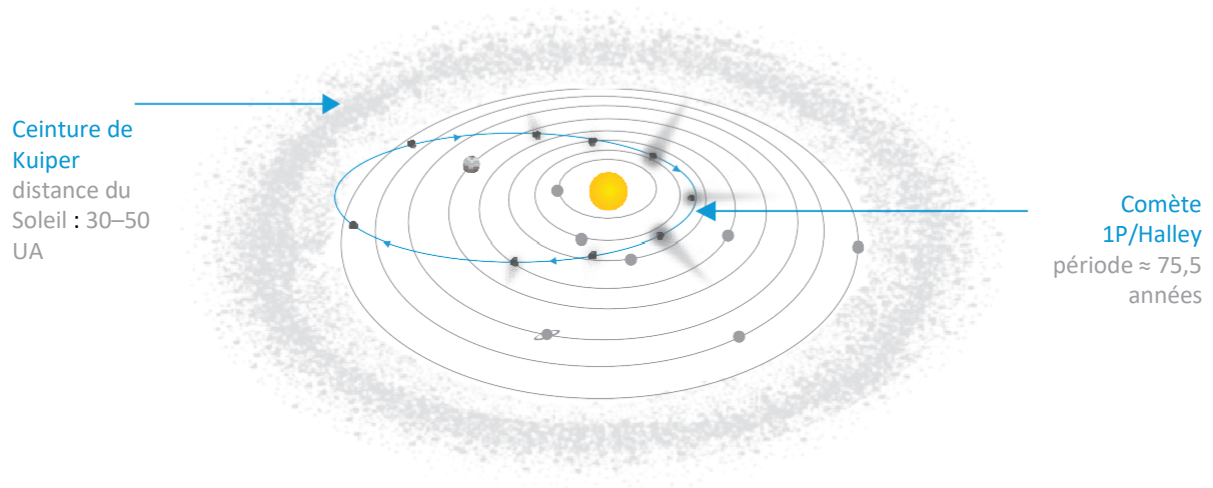
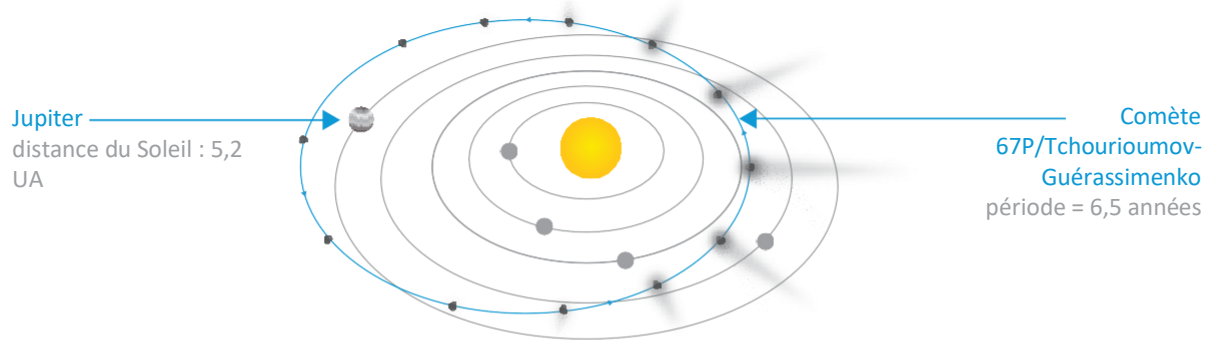
***Perturbations gravitationnelles** : changements imposés à l'orbite d'un objet céleste (par ex. une planète, une comète) par les interactions avec les champs gravitationnels d'autres corps célestes (par ex. des planètes géantes, d'autres étoiles).

***Sublimer (sublimation)** : quand l'échauffement fait passer directement une substance de l'état solide à l'état gazeux, sans passer par la phase liquide. Lorsque le gaz est à nouveau refroidi, il forme habituellement un dépôt solide.

***Unité astronomique (UA)** : une unité astronomique est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, ou le rayon orbital de la Terre, soit approximativement 150 millions de km.

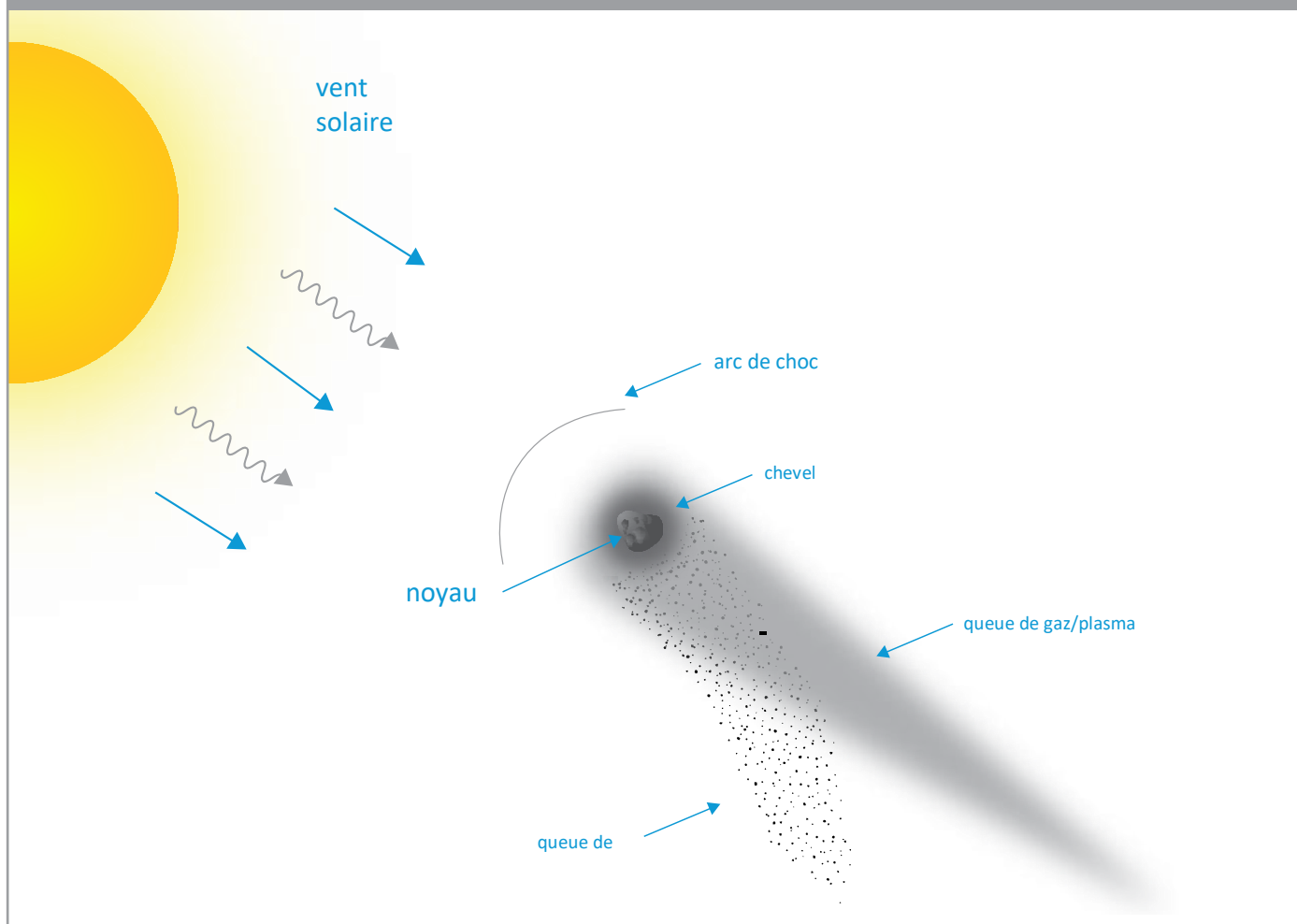
***Vent solaire** : un flux de particules hautement énergétiques (plasma) émises dans toutes les directions par la haute atmosphère du Soleil. Il contient essentiellement des électrons et des protons.

Figure 2



↑ Orbites de comètes dans le Système solaire.

Figure 3



↑ L'anatomie d'une comète.

Les queues de comètes ne sont pas toutes aussi spectaculaires que celles qui sont représentées dans la Figure 1, ou même visibles depuis la Terre. La taille du noyau, ses composants, la distance à laquelle la comète s'approche du Soleil et le nombre de fois qu'elle s'en est rapprochée dans le passé déterminent l'aspect spectaculaire de sa queue. Après être passée au plus près du Soleil (**périhélie***), la comète retourne dans les régions froides du Système solaire non sans avoir perdu irrémédiablement une petite partie de sa masse.

Les comètes parcourent une orbite elliptique avec le Soleil à l'emplacement de l'un de ses foyers (Figure 2) et elles ne sont donc visibles que pendant une brève période de temps, lorsqu'elles approchent du périhélie. Pour les comètes dont l'orbite est fortement elliptique, cette durée est très courte par rapport au temps passé à parcourir une orbite autour du Soleil. Elles passent la majeure partie de leur temps à décélérer lentement quand elles s'éloignent du Soleil jusqu'à ce qu'elles parviennent à leur **aphélie*** et à accélérer à nouveau en direction du Soleil jusqu'à leur périhélie à cause de l'effet de la gravité du Soleil.

Pour plus d'informations sur les orbites elliptiques et les orbites des comètes, reportez-vous à « ESA teach with space - les ellipses | P02 manuel de l'enseignant avec activités pour les élèves » (voir la section Liens).

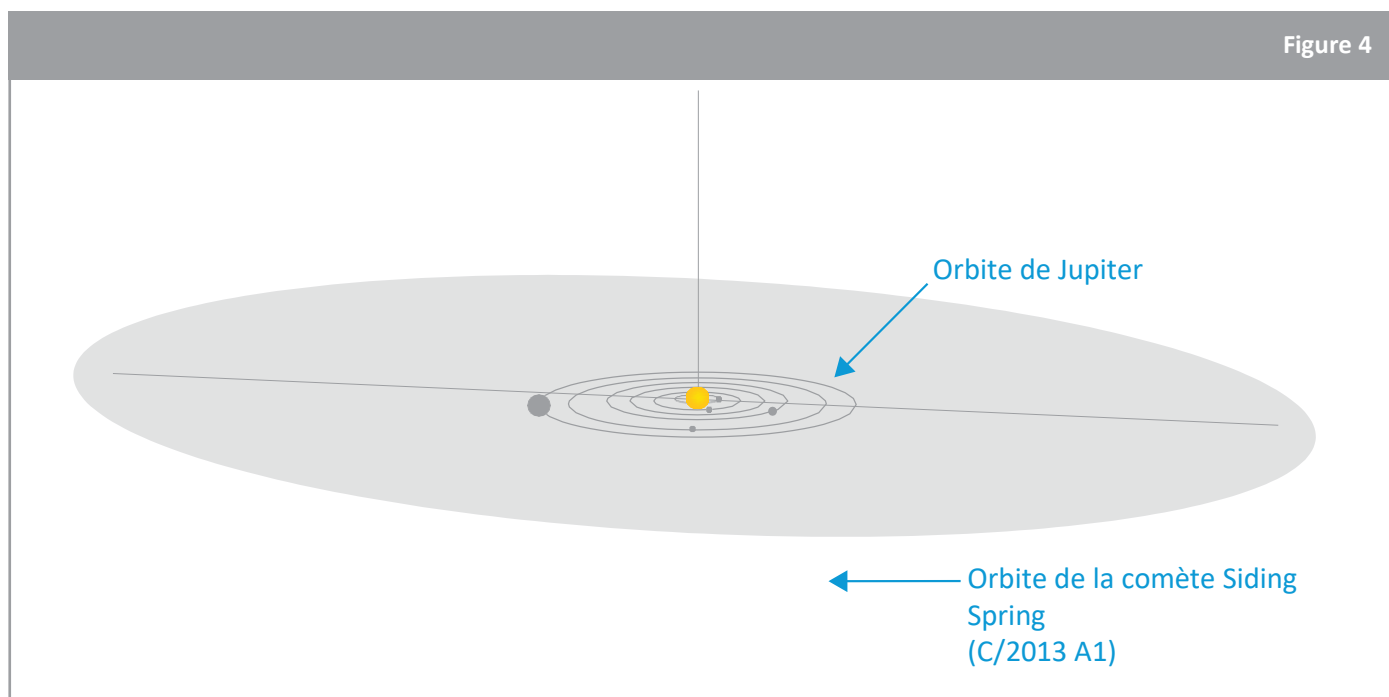
***Aphélie**: point d'une orbite le plus éloigné du Soleil.

***Arc de choc (comète)** : surface d'interaction entre les ions contenus dans la chevelure d'une comète et le vent solaire. L'arc de choc est dû à la nature supersonique de la vitesse orbitale relative de la comète et de la vitesse du vent solaire. L'arc de choc se forme en avant de la comète dans la direction du flux du vent solaire. Les grandes concentrations d'ions cométaires qui s'accumulent dans l'arc de choc chargent le champ magnétique solaire en plasma. Les lignes de champ s'incurvent alors autour de la comète, entraînent les ions cométaires et forment la queue de gaz / plasma / ions.

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

Impacts dans le Système solaire

La Figure 2 illustre les trajectoires orbitales de 3 différentes comètes qui semblent toutes croiser les orbites des planètes, suggérant que des collisions entre des comètes ou des astéroïdes et des planètes sont inévitables. Toutefois, les orbites de comètes en provenance du nuage d'Oort peuvent être fortement inclinées par rapport au plan du Système solaire (l'écliptique). Ainsi, en raison de la perspective, de nombreuses trajectoires semblant croiser directement des orbites planétaires sont en fait trompeuses. Par exemple, la trajectoire de la comète Siding Spring (C/2013 A1) pendant son approche du périhélie en 2014 est fortement inclinée par rapport au plan orbital de la Terre (Figure 4).

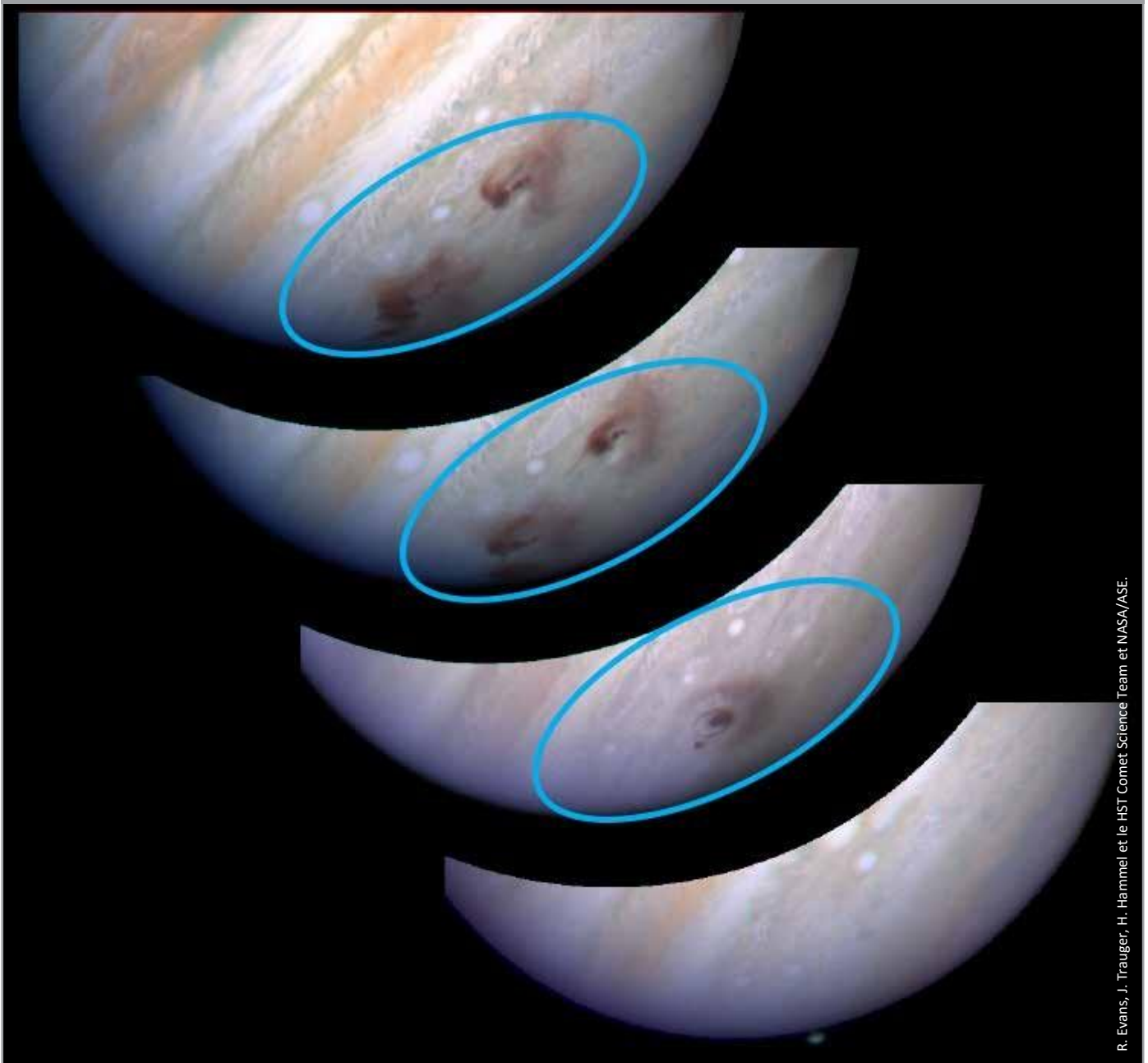


↑ Trajectoire de la comète Siding Spring (C/2013 A1) dans le Système solaire.

Néanmoins, il existe des preuves manifestes montrant (qu'à l'échelle de temps géologique) les planètes sont régulièrement frappées par des comètes et des astéroïdes. La plupart des cratères que l'on observe sur la surface des lunes et des planètes du Système solaire sont dus à des impacts. Les impacts ont été le plus fréquents très tôt dans l'histoire du Système solaire (période du grand bombardement tardif), mais il s'en produit encore de nos jours.

En 1994, de nombreux fragments de la comète Shoemaker-Levy 9 (D/1993 F2) ont percuté la surface de Jupiter. La plus grande trace d'impact observée avait plusieurs milliers de kilomètres de diamètre. Elle est due au fragment G de la comète dont la taille n'était que de quelques kilomètres. On peut voir dans la Figure 5 les effets de cet impact sur l'atmosphère de Jupiter. Ce montage est réalisé à partir d'images prises en time lapse par le télescope spatial Hubble.

Figure 5



R. Evans, J. Trauger, H. Hammel et le HST Comet Science Team et NASA/ASE.

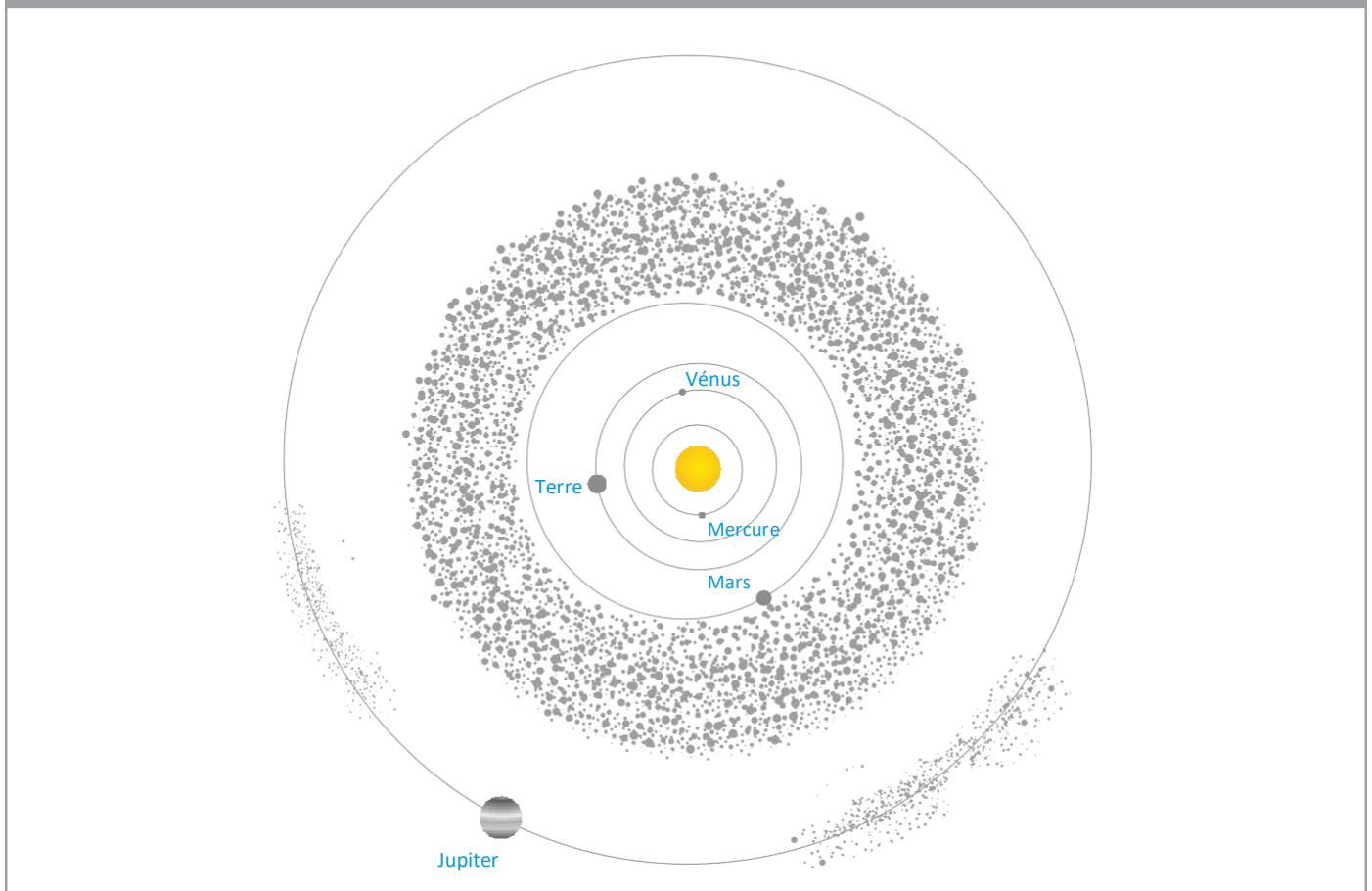
↑ Cette mosaïque d'images montre l'évolution du site d'impact G sur Jupiter (mis en évidence par l'ellipse bleue).

Astéroïdes

Les comètes ne sont pas les seuls objets qui percutent la Terre et d'autres corps du Système solaire. Les astéroïdes qui proviennent essentiellement de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter (Figure 6) sont de grands objets rocheux ou métalliques. Dans l'ensemble, les astéroïdes se sont formés beaucoup plus près du Soleil et ils contiennent donc moins d'éléments légers que les comètes. Les astéroïdes sont largement composés de métaux, d'oxydes de métaux, de minéraux et de silicates. Dans les comètes, les quantités plus importantes d'éléments légers comme le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le phosphore et le soufre permettent la formation de certains composés comme par exemple de l'eau, du méthane et du dioxyde de carbone.

Les plus grands astéroïdes connus sont Vesta et Pallas dont le diamètre dépasse 500 km. La Figure 7 est une comparaison des tailles de quelques astéroïdes et comètes. Les astéroïdes irréguliers de la Figure 7 sont bien plus petits que Vesta et Pallas, mais beaucoup d'entre eux sont bien plus grands que les noyaux de comètes qui ont été imagés.

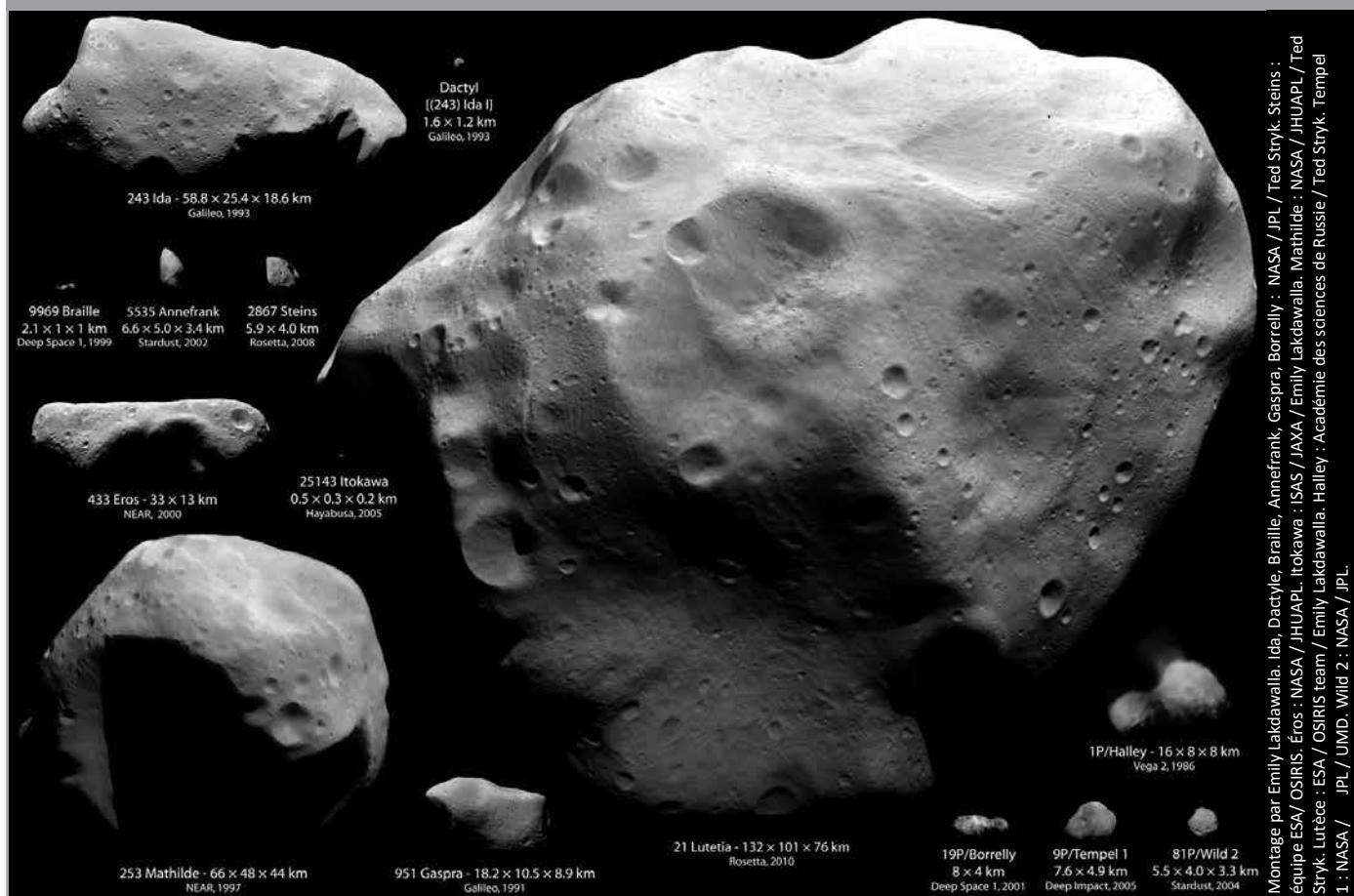
Figure 6



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

***Points de Lagrange** : chaque configuration orbitale comprend cinq points auxquels un objet qui est uniquement affecté par la gravité peut avoir une orbite stable. Pour plus d'informations, voir ESA teach with space - vidéo « gravity wells » | VP04 (voir la section Liens).

Figure 7



↑ Comparaison des tailles d'astéroïdes et de comètes.

Impacts sur la Terre

Sur la terre, l'activité tectonique et l'érosion en surface font que les cratères ne restent visibles que pendant quelques millions d'années avant de s'estomper progressivement. Toutefois, l'analyse géologique des roches souterraines ainsi que d'autres particularités peuvent permettre de déduire l'apparition d'un cratère dans le passé. Au début des années 1990, on a ainsi pu confirmer l'impact, il y a près de 65 millions d'années, d'une comète ou d'un astéroïde d'un diamètre de 10 km environ dans une région de la Terre appelée Yucatán, au Mexique. Cet impact a laissé un cratère de plus de 150 km de diamètre. Le changement climatique mondial qui s'en est suivi a largement contribué à l'une des plus grandes extinctions dans l'histoire géologique de la Terre, l'extinction Crétacé-Paléogène, qui s'est terminée par la disparition des dinosaures.

Beaucoup plus près de nous sur l'échelle du temps, des cratères de moins grande taille sont encore visibles aujourd'hui, comme Meteor Crater (connu également sous le nom de cratère Barringer) en Arizona aux USA - Figure 8.

Figure 8



↑ À gauche : Meteor Crater, Arizona, USA. À droite : Meteor Crater photographié depuis la Station spatiale internationale (ISS).

Meteor Crater a été formé il y a environ 50.000 ans par un astéroïde composé de fer et de nickel qui est venu s'écraser dans les plaines de l'Arizona, aux USA. L'impact a produit un cratère de 200 m env. de profondeur et 1,5 km de diamètre. Des fragments de l'impacteur originel sont disséminés partout dans les alentours.

En 1908, un astéroïde ou une comète dont on estime le diamètre à plus de 50 m a explosé à une altitude entre 5 et 10 km au-dessus d'une région boisée proche de la rivière Tunguska, dans ce qui est aujourd'hui la région de Krasnoïarsk, en Russie. Bien qu'on pense que l'astéroïde ou la comète n'a pas impacté la surface de la Terre, la violence de l'explosion a fait se coucher les arbres de la forêt sur une surface de plus de 2.000 km² (Figure 9).

Figure 9



↑ Arbres couchés sous l'effet de l'explosion de la Tunguska.

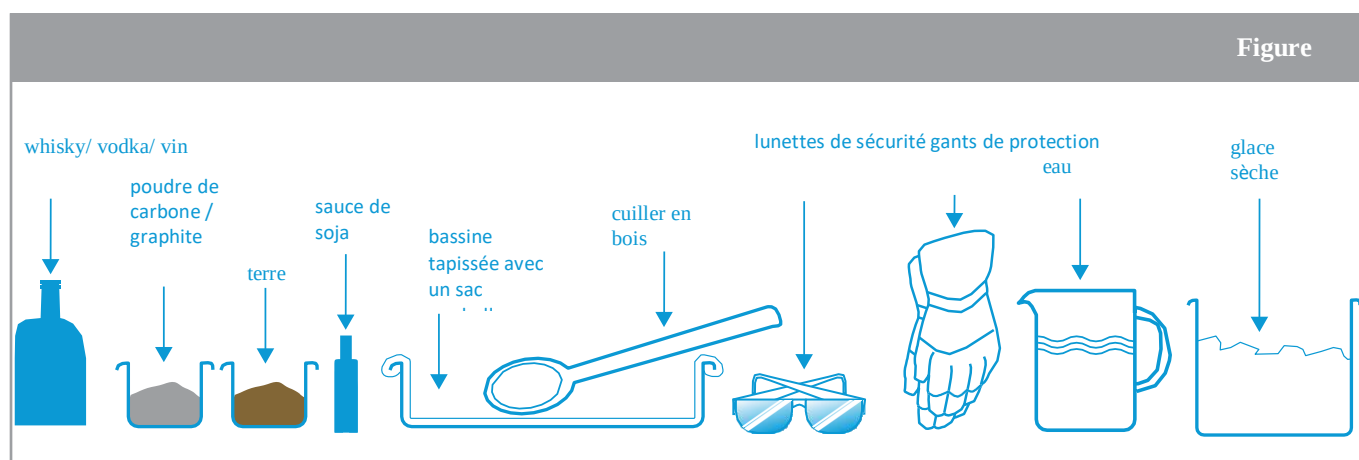
Cuisinons une comète

Dans cette démonstration, les enseignants simulent un noyau de comète dans la salle de classe. Les ingrédients utilisés simulent avec précision les matières que l'on trouve dans les noyaux des vraies comètes.

Une version de cette activité destinée aux élèves emploie des quantités plus réduites dans des gobelets en plastique. Il est important d'instruire clairement les élèves des risques et de suivre les consignes en matière de sécurité et de protection de la santé. Les instructions à destination des élèves sont données dans la fiche de travail à l'issue de l'activité.

Matériel

- Glace sèche (env. 0,75 litre, sous la forme la plus petite possible)
- Eau (env. 0,75 litre)
- Grands sacs poubelle / sacs à déchets
- 10 cuillers à soupe (4 très grandes cuillers en bois pleines) de terre (assurez-vous que la terre ne contienne des grumeaux, mais qu'elle ait une consistance régulière)
- 1 cuiller à soupe de poussière/poudre de carbone ou de poudre de graphite
- 2-3 cuillers à soupe de whisky, vodka, ou de vin rouge (composant méthanol/éthanol)
- Quelques gouttes de sauce de soja (composant organique)
- Quelques gouttes de produit de nettoyage (composant ammoniac)
- Grande bassine en plastique
- Seau pour jeter ensuite la comète
- Cuiller en bois
- Écran de sécurité
- Boîte en polystyrène pour la glace sèche
- Gants de protection thermique
- Lunettes de sécurité pour tous les participants et démonstrateurs
- Blouse de laboratoire pour le démonstrateur (optionnelle)
- Bols mesureurs



↑ Montage de l'expérience.

Santé et sécurité

- Veillez à toujours porter des gants de protection et des lunettes de sécurité quand vous manipulez de la glace sèche. Il est interdit de toucher, d'avaler ou de goûter de la glace sèche. Donnez aux élèves des instructions claires sur les risques et sur l'écart à respecter par rapport à la démonstration car la comète pourrait « cracher ».
- Ne conservez pas la glace sèche dans un récipient étanche car le dégagement de gaz peut être brutal.
- Mettez la comète aux déchets à l'extérieur, dans un endroit bien ventilé auquel les élèves n'ont pas accès.
- Ne stockez jamais de la glace sèche dans un congélateur de ménage.
- Effectuez les expériences dans un endroit bien ventilé.

Instructions

Veillez visionner la vidéo d'accompagnement : Teach with space – cooking a comet | VC03.

1. Tapissez la bassine avec un sac poubelle. Nous conseillons de placer la bassine à l'intérieur du sac poubelle et de la tapisser avec la couche supérieure. Mettre la comète aux déchets sera ensuite plus facile. Assurez-vous que le sac tapisse bien l'intérieur de la bassine.
2. Placez-y les ingrédients suivants : eau, terre, poussière de carbone, vin/alcool, produit de nettoyage et sauce de soja. Ces ingrédients représentent quelques-uns des composants d'une vraie comète. Des volontaires parmi l'assistance peuvent participer en ajoutant eux-mêmes des ingrédients. Mélangez bien avec la cuiller en bois.
3. Ajoutez la glace sèche au mélange. Mélangez avec la cuiller en bois. Il est utile de se faire aider par un assistant qui incline la bassine. Ensuite, en portant les gants de protection, formez la comète pendant env. 30 secondes pour obtenir un bloc. Ajoutez un peu d'eau si la comète ne s'agglomère pas facilement. Ne comprimez pas trop la comète sous peine de la briser.
4. Quand la démonstration est terminée, placez la comète dans la bassine et retirez la bassine précautionneusement du sac poubelle en laissant la comète dans le sac poubelle. Déposez le sac poubelle dans le seau. Assurez-vous que le sac poubelle soit ouvert afin que les gaz puissent s'échapper. Jetez le noyau dans un endroit à l'extérieur auquel personne n'a accès. La glace sèche du noyau devrait se sublimer en l'espace de 24 heures.

Conseil : si l'expérience se déroule le matin, les élèves pourraient revenir l'après-midi pour voir comment la comète a évolué.

Entraînez-vous pour faire de meilleures comètes ! Pour obtenir les meilleurs résultats, il est utile de s'entraîner plusieurs fois avant d'effectuer l'expérience avec les élèves.

Discussion

Comment les ingrédients simulent-ils ce que nous pouvons trouver dans les noyaux de vraies comètes ? Quelles sont les implications pour la vie sur notre planète ?

Les premières observations spectroscopiques de comètes datent de la fin du 19^e siècle et du début du 20^{ème} siècle. Grâce à la spectroscopie, les astronomes ont pu commencer à découvrir la composition chimique des chevelures des comètes. Ces premières observations ont permis d'identifier du carbone diatomique, des ions sodium ainsi que diverses molécules à base de carbone, d'oxygène et d'azote.

En 1950, l'astronome américain Fred Whipple proposa un nouveau modèle décrivant le noyau d'une comète. Le modèle de « boule de neige sale » de F. Whipple suggérait que les comètes auraient un noyau de glace composé de traces de poussières, de pierres et d'une majorité de composés volatiles comme **de l'eau, du dioxyde de carbone, du méthane et de l'ammoniac**. Les observations faites plus tard depuis le sol et dans l'espace ont confirmé, moyennant quelques petits changements, le modèle de Whipple car elles ont montré que les noyaux des comètes étaient plus grands et plus sombres que ce que le modèle décrivait.

Une étude récente de la comète 103P/Hartley a montré que **l'eau** qu'elle contient présente le même rapport isotopique entre le deutérium et l'hydrogène (eau lourde) que les océans de la Terre. Cette découverte a été extrêmement importante. L'eau est une molécule essentielle à la vie telle que nous la connaissons. C'est un solvant universel qui permet de dissoudre différents composants chimiques qu'elle contient. Les scientifiques disent que l'eau est indispensable au développement de la vie. Les impacts de comètes au début de l'histoire de la Terre lui ont apporté la majeure partie de son eau originelle.

Le **carbone** contenu dans les comètes est important car toute vie telle que nous la connaissons est basée sur le carbone. Cet ingrédient clé pour la vie sur la Terre peut y avoir été apporté par des impacts de comètes.

La **sauce de soja** symbolise les acides aminés et les précurseurs des acides aminés présents dans les comètes. En 2004, la mission Stardust de la NASA a prélevé des échantillons de poussières de la chevelure de la comète 81P/Wild et les a rapportés sur Terre. L'analyse de ces poussières a confirmé la présence de glycine, le plus simple des acides aminés. Ces résultats ont été d'une immense importance. Les acides aminés sont les éléments constitutifs des protéines. En tant que tels, ils sont le principal élément constitutif de la vie. Le fait de trouver ces molécules biologiques (formule chimique $C_2H_5NO_2$) sur un corps céleste qui n'est pas la Terre pourrait suggérer aux scientifiques que certains des ingrédients de la vie sur notre planète y ont été apportés par les comètes qui l'ont percutée il y a des milliards d'années.

En plus du **dioxyde de carbone** (glace sèche) utilisé dans la démonstration, la spectroscopie a encore permis de découvrir la présence d'autres gaz dans les chevelures des comètes. Ces gaz comprennent (sans limitation) ceux qui sont énumérés dans la Table 1.

Table 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

Qu'est-ce que la glace sèche ?

La glace sèche est du dioxyde de carbone CO₂ gelé qui se présente sous la forme de gaz dans des conditions de température et de pression normales.

Le processus de sublimation dans lequel le dioxyde de carbone passe directement de l'état solide à l'état gazeux est responsable de la formation de la chevelure des comètes. Le processus inverse est appelé désublimation ou dépôt. À la pression atmosphérique normale, le dioxyde de carbone passe directement de l'état gazeux à l'état solide et forme de la glace sèche à -78°C.

Que signifient ces nuages/fumées de couleur blanche qu'on voit dans la démonstration ?

Quand la température de la glace sèche monte au-dessus de -78°C, elle se sublime pour prendre la forme d'un gaz froid. Cela a pour effet de rafraîchir la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant qui se condense pour produire les épais nuages blancs que l'on peut observer.

↑ Gaz que l'on trouve dans les noyaux de comètes.

Quelle est l'origine de ce dégagement gazeux violent pendant la démonstration ?

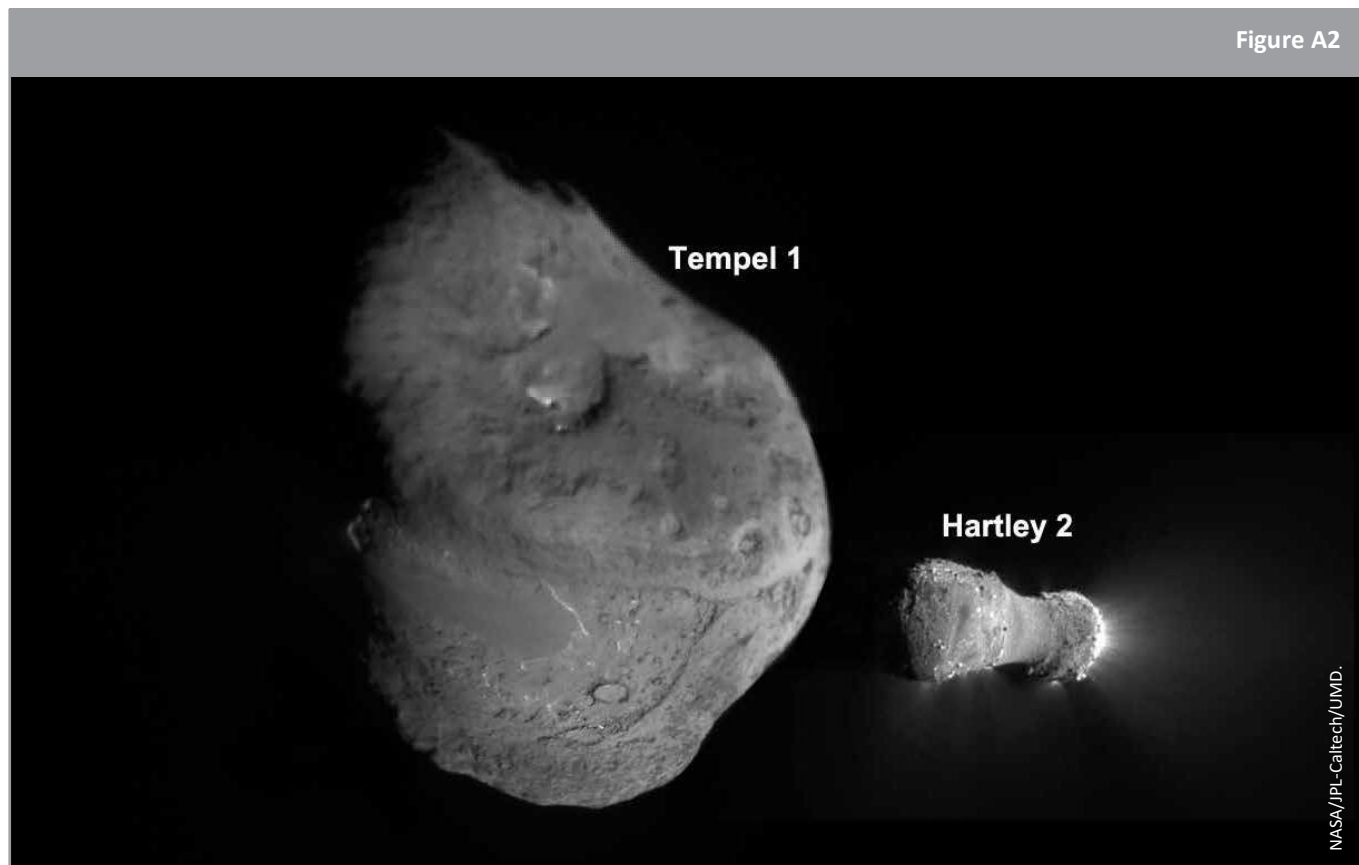
Dans cette activité, deux facteurs s'affrontent lorsque notre imitation de noyau cométaire se forme. L'eau liquide entre en contact thermique avec la glace sèche dont la température est inférieure à -78°C et l'eau liquide gèle alors pour emprisonner la glace sèche dans une « cage de glace ». Quand la glace sèche entre en contact thermique avec de la matière dont la température est supérieure à -78°C, elle commence à se sublimer. Le changement de phase de la glace sèche pour passer de l'état solide à l'état gazeux s'accompagne d'une augmentation de volume de plus de 600 fois. Cela signifie que les poches de glace sèche qui se subliment libèrent occasionnellement et brutalement du gaz à travers la croûte de glace d'eau du noyau. C'est pour cette raison qu'il est vivement recommandé de porter une blouse de protection ainsi que des gants et des lunettes de sécurité.

Quelles sont la forme et la taille des noyaux de comètes ?

Plusieurs **survol**s* effectués par des sondes spatiales ont confirmé une variété de formes et de tailles des noyaux de comètes. Au nombre de ces missions : Giotto (ASE – 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 (ASE – comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko). Dans l'image à l'échelle de la Figure A2, l'axe long du noyau de la comète 103P/Hartley a environ 2,2 km et le noyau de la comète 9P/Tempel fait environ 7,6 km dans sa dimension la plus longue. Les mesures préliminaires effectuées par la mission Rosetta de l'ASE à son arrivée près la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko a confirmé que sa dimension la plus longue était de 4,1 km.

* **Survol** : passage rapproché d'une sonde spatiale autour d'une planète ou d'un autre corps céleste. Si la sonde spatiale tire avantage du champ gravitationnel de la planète pour accélérer sa vitesse et changer sa trajectoire, on appelle cette manœuvre une « fronde gravitationnelle » ou une « assistance gravitationnelle ».

Le montage de la Figure 7 montre plusieurs noyaux de comètes comparés à des images prises par différentes sondes spatiales (jusqu'en 2010) à l'occasion des survols d'astéroïdes et de plusieurs lunes du Système solaire. Les noyaux de comètes sont montrés dans le coin inférieur droit de la Figure 7.

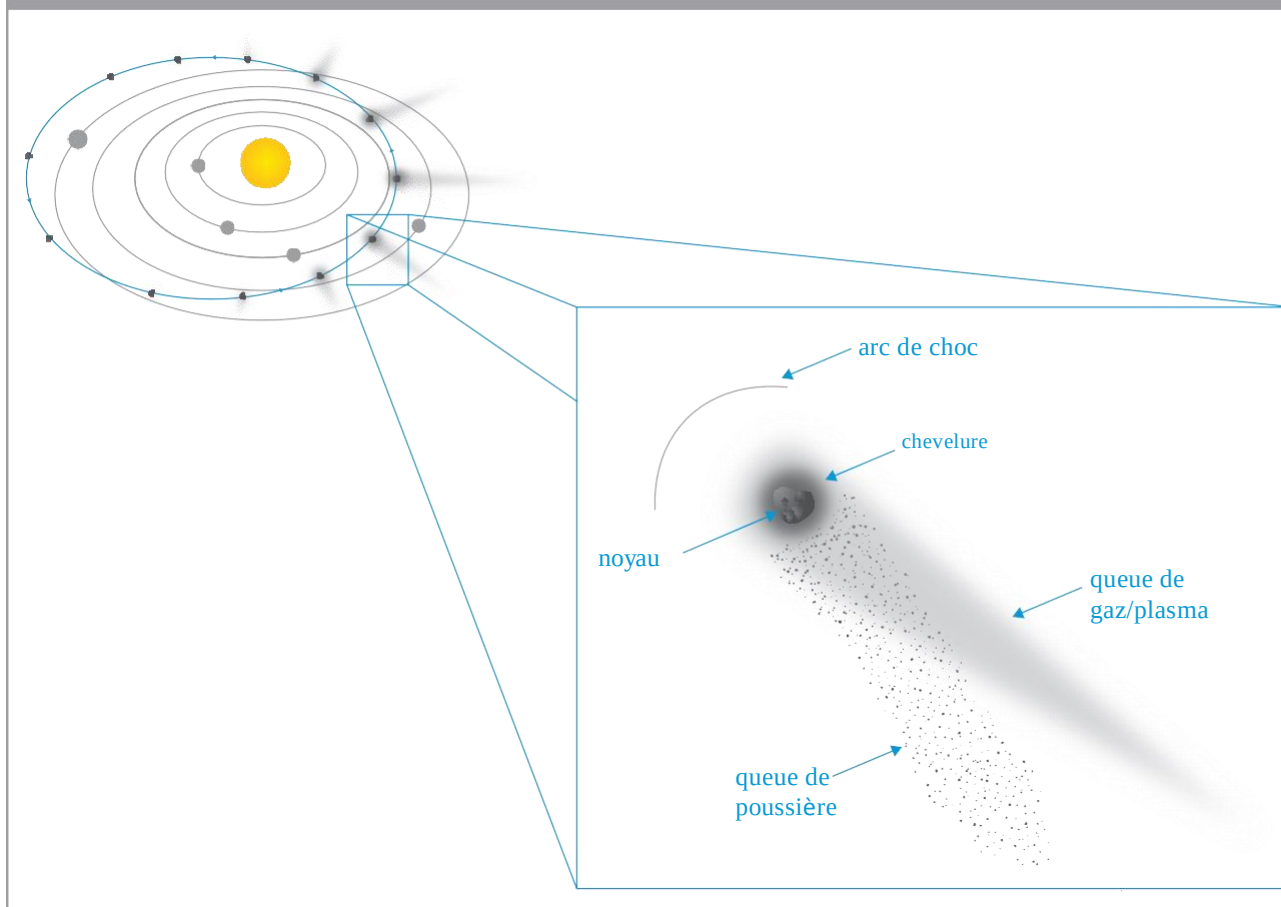


↑ Comparaison de la taille des noyaux de la comète 9P/Tempel et de la comète 103P/Hartley.

Pourquoi les queues de certaines comètes ont-elles des formes si différentes ?

La forme et l'apparence des queues de comètes sont dues aux interactions entre le vent solaire et les rayons solaires et la matière éjectée du noyau. On voit souvent deux queues pointant dans des directions différentes. L'une des queues est exactement à l'opposé du soleil. C'est la queue de plasma ou d'ions. La lumière ultraviolette du Soleil provoque une ionisation des gaz de la chevelure. Ces particules ionisées sont entraînées loin de la comète par le vent solaire. L'autre queue est la queue de poussières due à la pression des rayons solaires qui poussent les petites particules solides de la chevelure et les éloignent ainsi du Soleil. La queue de poussières est légèrement incurvée ou arquée dans la direction d'où vient la comète (Figure A3). Étant donné que l'activité solaire, la vitesse de rotation du noyau et la vitesse d'éjection des gaz varient énormément d'une comète à l'autre, on peut observer une immense variété de formes de queues.

Figure

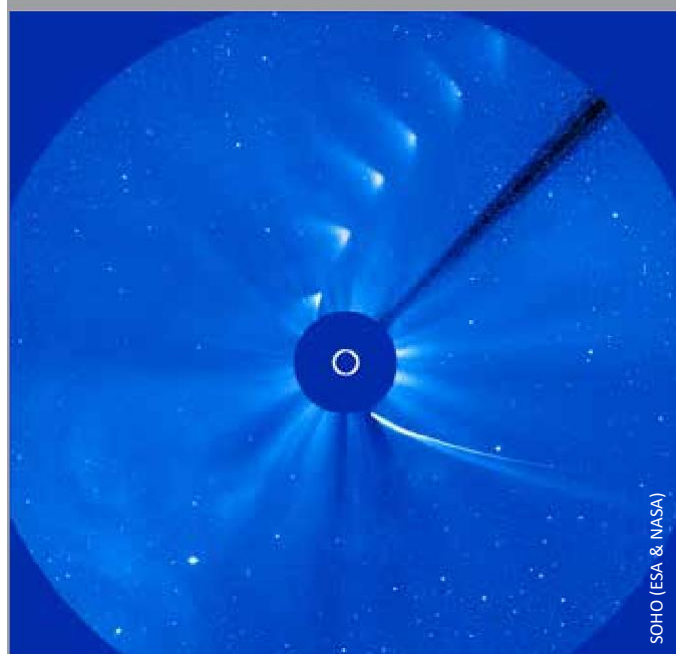


↑ Diagramme illustrant les deux queues d'une comète et la manière dont elles varient tout au long de sa trajectoire en orbite autour du Soleil.

Quelle est la durée de vie d'un noyau de comète ?

Les comètes perdent des substances volatiles (par ex. du dioxyde de carbone et de l'eau) et de la poussière pendant leur passage au périhélie et laissent derrière elles des traînées de débris. Cela signifie qu'un noyau donné peut avoir un nombre fini de passages au périhélie avant que toutes ses substances volatiles soient épuisées. La comète 2012/S1 ISON en est un exemple. Il s'agissait d'une comète rasante qui a effectué son premier passage proche au périhélie en 2013 (Figure A4). La comète 2012/S1 ISON sembla cesser de produire des gaz et des poussières peu de temps avant de passer à côté du Soleil.

Figure A4



↑ La queue de la comète ISON telle que l'a observée le satellite SOHO de l'ASE/NASA du 28-30 novembre 2013.

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

Quand les substances volatiles d'un noyau de comète (comme le dioxyde de carbone et l'eau) commencent à s'échauffer à l'approche du Soleil, le dégagement de gaz peut provoquer un effet de recul. Le gaz éjecté engendre une force égale et de sens opposé (troisième loi de Newton) qui applique une très légère poussée sur la comète. Cet effet peut légèrement modifier la trajectoire orbitale de la comète ainsi que la durée de sa période autour du Soleil car le noyau est écarté de la trajectoire qui avait été prévue. Étant donné aussi que la plupart des noyaux sont en rotation (peut-être sur plusieurs axes, tournant en avant et sur le côté), la déviation peut varier fortement d'une comète à l'autre.

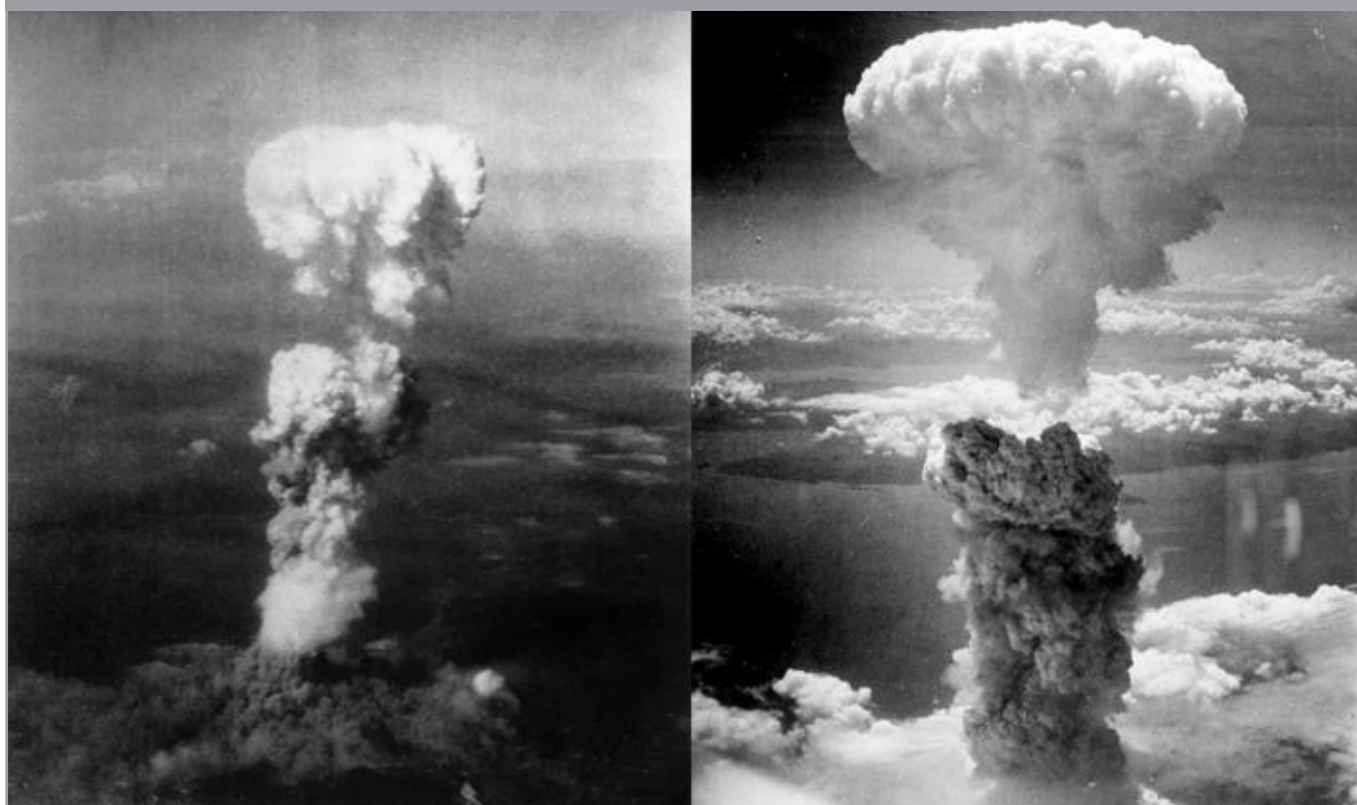
Extension de la discussion - des comètes ou des astéroïdes peuvent-ils percuter la Terre ?

Connaissant les enseignements recueillis à la faveur des essais d'explosions nucléaires conduits par différentes nations depuis 1945 et en s'aidant de l'équation de l'énergie cinétique, on peut obtenir une bonne approximation de la taille de l'impacteur à l'origine de Meteor Crater.

L'énergie des armes nucléaires est mesurée en kilotonnes (kt) – avec 1 kt équivalant à l'énergie libérée par 1.000 tonnes de TNT. $1 \text{ kt} = 4,2 \times 10^{12} \text{ J}$.

Les bombes atomiques de Hiroshima et de Nagasaki (Figure A5) possédaient chacune une puissance de 20 kt environ.

Figure A5



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

Pour créer un cratère de la taille de Meteor Crater dans le type de roche qu'on trouve dans cette région, il faudrait environ 2,5 Mt (2.500 kt), ou près de 125 bombes d'Hiroshima. L'un des modèles mathématiques/de simulation par ordinateur suggère que l'impacteur a percuté la Terre à près de $12,8 \text{ km s}^{-1}$. On obtient suffisamment d'informations pour calculer la taille approximative de l'impacteur.

De nombreux fragments de l'impacteur se trouvent dans les alentours de Meteor Crater. L'analyse de ces fragments montre que l'impacteur était composé à 92% de fer et à 7% de nickel (le reste étant composé pour 1% d'inclusions de silicate et d'autres éléments à l'état de traces). La densité moyenne de l'impacteur était d'environ 7.000 kg m^{-3} .

Avec cette information, nous pouvons effectuer les calculs suivants, en supposant que toute l'énergie cinétique de l'impacteur a été convertie en énergie de souffle pour former le cratère.

1. Résumé des paramètres

Énergie cinétique, $E_c = 2.500 \text{ kt}$

Vitesse d'entrée = $12,8 \text{ km s}^{-1}$

$1 \text{ kt} = 4,2 \times 10^{12} \text{ J}$

Densité d'une météorite ferreuse, $\rho = 7.000 \text{ kg m}^{-3}$

2. Convertissez en Joules l'énergie nécessaire à la formation du cratère.

$$E_c = 2.500 \text{ kt} = 2.500 \times 4,2 \times 10^{12} \text{ J} = 1,05 \times 10^{16} \text{ J}$$

3. Avec l'équation de l'énergie cinétique, déterminez la masse de l'impacteur.

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

En réarrangeant d'après m :

$$m = (2E_c)/v^2 = (2 \times 1,05 \times 10^{16} \text{ J}) / (12.800 \text{ m s}^{-1})^2 = 128 \times 10^6 \text{ kg} = 128.000 \text{ t}$$

4. Avec l'équation de densité, déterminez le volume de l'impacteur.

Puisque masse = densité x volume

$$\text{Volume} = \text{masse}/\text{densité} = (128 \times 10^6 \text{ kg}) / (7.000 \text{ kg m}^{-3}) = 1,83 \times 10^4 \text{ m}^3$$

5. En supposant que l'impacteur ait une forme sphérique, utilisez l'équation de la sphère pour trouver le rayon de l'impacteur. Une alternative consiste à modéliser l'impacteur sous la forme d'un cube.

Et puisque le volume d'une sphère est $(4/3)\pi r^3$

Après réarrangement,

$$r^3 = (3 \times 1,83 \times 10^4 \text{ m}^3) / (4 \times \pi) = 4.371 \text{ m}$$

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

Les élèves peuvent rechercher les limitations/incertitudes dans les suppositions pour la modélisation, parmi celles-ci :

- En supposant que l'énergie cinétique soit convertie à 100%. De l'énergie aurait aussi pu être perdue sous d'autres formes, comme du son ou un échauffement thermique de l'atmosphère.
- Incertitude concernant la vitesse d'impact. Cette valeur est déduite à partir des observations faites sur un vieux cratère d'impact et elle pourrait donc être inexacte et déboucher sur un calcul incorrect de la taille.
- Effet de l'angle d'impact. La quantité de roche vaporisée/éjectée dépend de l'angle de rentrée. Puisque de nombreux facteurs originaux sont déduits de ces faits, l'angle de rentrée exerce une grande différence sur les résultats. L'expérimentation avec différents angles de rentrée pour le même impacteur en utilisant le simulateur d'impact Down2Earth (voir plus bas et dans la section Liens) pourrait aider à développer sur ce point.

Simulateur d'impact en ligne – « Down2Earth »

Down2Earth (voir la section Liens) est un simulateur d'impact basé sur le Web à des fins pédagogiques. Il permet aux élèves de définir les paramètres d'un impact comme la composition de l'impacteur (astéroïde ou comète), l'angle de rentrée, la taille, le type de roche sur le site d'impact et l'emplacement de l'impact. Les élèves prédisent les effets de ces facteurs sur la taille du cratère et établissent le lien avec des transferts d'énergie pendant l'impact. Les élèves peuvent alors tester leurs prédictions dans un environnement virtuel.

→ CONCLUSION

Les comètes sont un contexte intéressant pour l'enseignement de nombreux sujets différents comme les champs gravitationnels et les orbites, l'énergie cinétique et le transfert d'énergie, jusqu'à la spectroscopie des comètes et les ingrédients de la vie. Notre fascination pour ces mondes glacés nous permet d'apprendre une multitude de choses passionnantes.

Cuisinons une mini comète

Dans cette activité, vous simulerez un noyau de comète avec des ingrédients communs qui symboliseront les principaux groupes de matières que l'on trouve dans les noyaux de comètes. Certains matériaux comme la glace sèche sont dangereux, votre professeur vous expliquera comment les utiliser.

Matériel

- Glace sèche (env. 100 ml)
- Eau (env. 100 ml)
- Petits sacs poubelle
- 3 cuillers à café de terre
- 1 cuiller à café de poussière/poudre de carbone ou de poudre de graphite
- 1 cuiller à café de whisky, de vodka ou de vin rouge (composant méthanol/éthanol)
- Quelques gouttes de sauce de soja (composant organique)
- Une goutte de produit de nettoyage (composant ammoniac)
- Gobelet en plastique jetable
- Seau pour jeter ensuite la comète
- Cuiller à café
- Boîte 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 doublé : eau, terre, poussière de carbone, vin/alcool, produit de nettoyage et sauce de soja. Ces ingrédients symbolisent certains des composés d'une vraie comète. Mélangez bien avec la cuiller à café.
2. Ajoutez la glace sèche. Mélangez le mélange d'eau et de glace sèche. Ensuite, en portant les gants de protection, moulez la matière de la comète en bloc pendant env. 30 secondes. Ne comprimez pas trop la comète sous peine de la briser.
3. Quand l'activité est terminée, placez la comète dans un sac poubelle que vous déposerez dans le seau que votre professeur vous aura donné.

Calcul de la masse de la comète, de sa vitesse et de son énergie

À travers cette série de questions, vous rechercherez la masse, les vitesses et les énergies de comètes en vous aidant des données de la table ci-dessous.

Masse du Soleil	$m_{\text{Soleil}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
Densité de la glace	$\rho = 1.000 \text{ kg m}^{-3}$
Constante gravitationnelle	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Questions

1. Une comète possède une énergie cinétique de $4,5 \times 10^{13} \text{ J}$. Elle se déplace à une vitesse de 34 km s^{-1} .
Calculez la masse de la comète.
2. Une grande comète d'une masse de $5,2 \times 10^8 \text{ kg}$ manque de percuter la Terre et frôle l'atmosphère. Au moment de la mesure, sa vitesse était de $49,0 \text{ km s}^{-1}$.
 - a) Calculez l'énergie cinétique de la comète (en J).
 - b) Si l'énergie libérée par l'explosion de 1 kilotonne (1.000 tonnes) de TNT est de $4,2 \times 10^{12} \text{ J}$, combien de kilotonnes d'énergie cette comète aurait-elle si elle avait percuté la Terre ?
 - c) Après la quasi-collision, la masse et la trajectoire de la comète ont été modifiées. Proposez une raison à cela.
3. Une comète parcourt une orbite elliptique autour du Soleil. À son point le plus proche du Soleil, elle se trouvera à une distance de $4,9 \times 10^{10} \text{ m}$. À cet endroit, sa vitesse est de $8,9 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$. Elle vient du nuage d'Oort, loin au-delà de l'orbite de Neptune. Quelle est sa vitesse quand elle se trouve à $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$ du Soleil (il s'agit de la distance orbitale entre la Terre et le Soleil) ?
4. De quelle manière pensez-vous que les impacts d'astéroïdes ont affecté la Terre et la vie sur Terre au cours de son histoire ?

→ SPACE CONTEXT @ ESA

Giotto

La comète 1P/Halley a une période orbitale d'env. 75,5 années (ce chiffre varie légèrement d'une orbite à l'autre en raison des pertes de gaz de son noyau et des perturbations gravitationnelles). Cette comète a été observée régulièrement depuis la Terre (à l'œil nu) ; des observations remontent même jusqu'aux alentours de l'an 240 avant JC. Les relations des observations ont permis aux astronomes de localiser l'orbite de la comète 1P/Halley à quelques mois près autour du périhélie. La tapisserie de Bayeux, qui retrace la bataille d'Hastings en 1066, est un témoignage célèbre qui nous apprend que la comète 1P/Halley fut observée depuis la Terre (Figure 10).

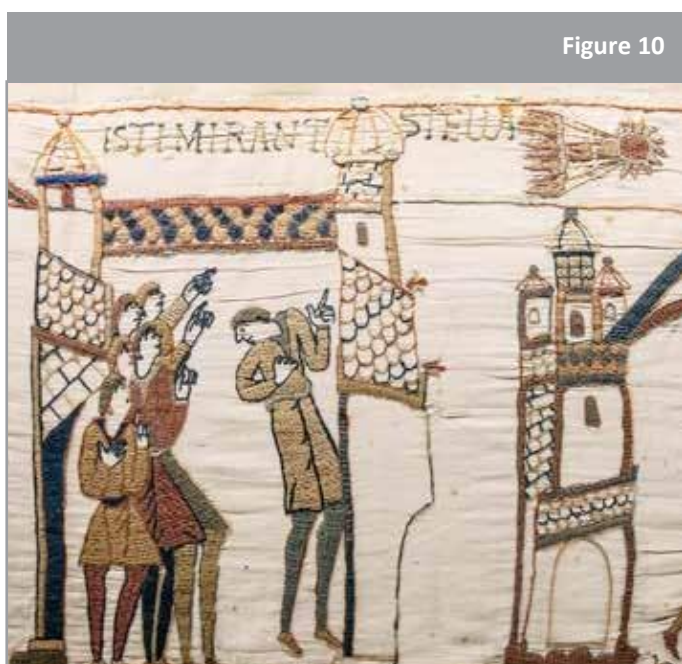


Figure 10



Figure 11

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

↑ Giotto prête pour le test de simulation solaire. Copyright : ASE

Plus récemment, en 1986, la comète 1P/Halley s'approchait pour la première fois du Soleil depuis le début de l'ère spatiale. La sonde Giotto de l'ASE (Figure 11) a survolé son noyau à une distance de moins de 600 km et a pris les premières photos rapprochées jamais obtenues d'un noyau de comète (Figures 12 et 13). Ces observations ont bouleversé la manière dont les scientifiques concevaient ces objets glacés.

Giotto a observé que la surface du noyau était très sombre, plus noire que du charbon : cela suggérait qu'il était recouvert d'une couche de poussière. Les données ont montré que l'abondance ou le rapport d'éléments légers (hydrogène, carbone et oxygène) dans la comète 1P/Halley était similaire à ceux du Soleil, ce qui signifie qu'elle est composée des matières originales à partir desquelles le Système solaire s'est formé.

Le montage d'images de la Figure 12 montre les détails qui devenaient visibles à mesure que la sonde se rapprochait du noyau.

Figure 12



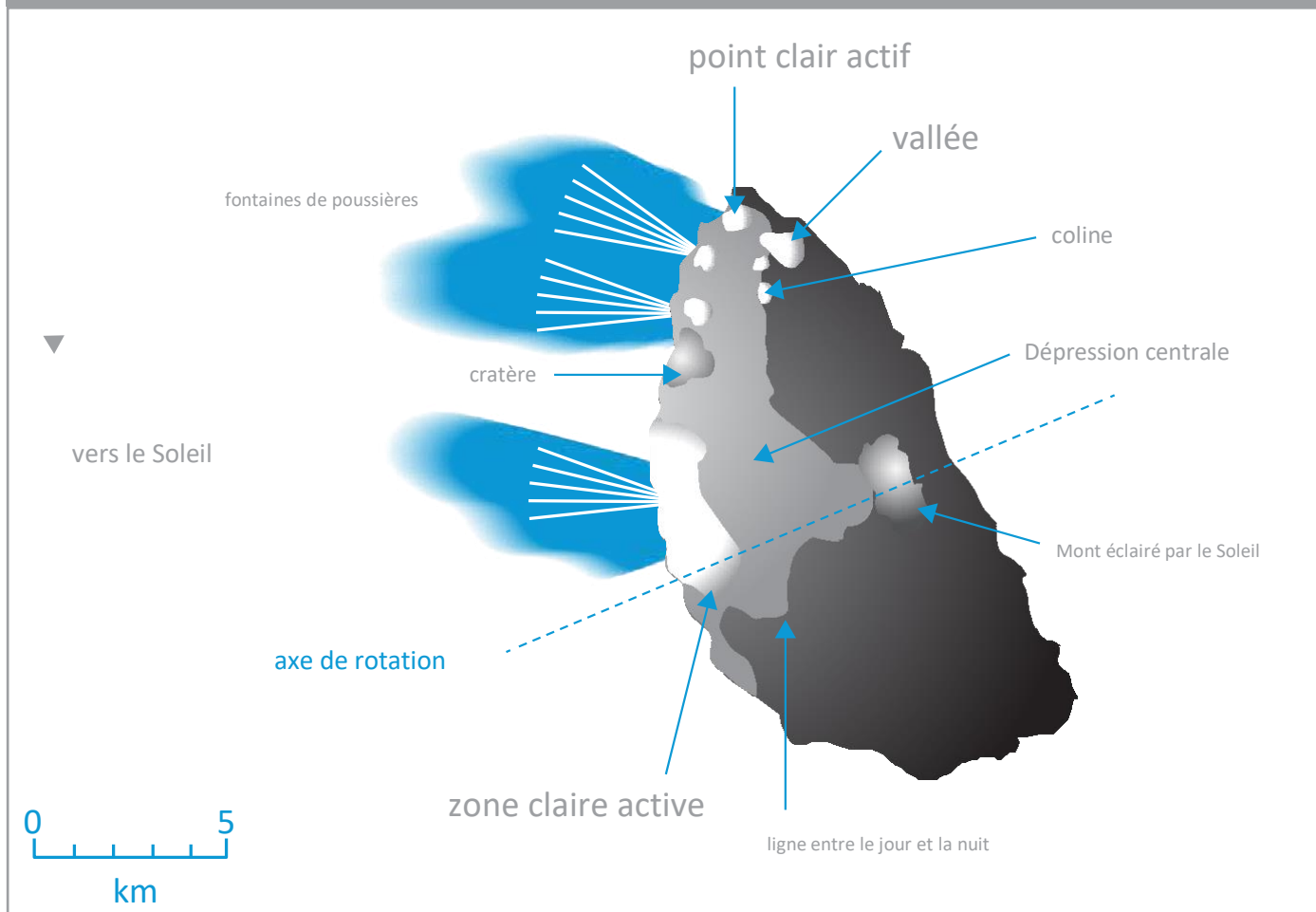
↑ Le noyau de la comète 1P/Halley tel que l'a vu Giotto à son passage le plus proche.

Figure 13



↑ Image du noyau de la comète 1P/Halley telle que l'a vue Giotto.

Figure 14



↑ Les principaux éléments identifiés sur les images de la comète 1P/Halley envoyées par la sonde Giotto de l'ASE.

La Figure 14 montre des éléments identifiés à partir de l'interprétation d'une image du noyau de la comète 1P/Halley (Figure 13). Des jets de matière ou des fontaines de poussières peuvent être vus à la surface du noyau. Cela est dû à la rapidité de la sublimation des substances volatiles sur et près de la surface du noyau. La pression des substances volatiles en expansion augmente jusqu'à ce qu'elles soient finalement relâchées dans un processus appelé dégazage.

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

L'Observatoire solaire et héliosphérique (SOHO) de l'ASE/NASA observe le Soleil à une distance de 1,5 million de kilomètres de la Terre (Figure 15). À cet endroit, les forces de gravité exercées par la Terre et par le Soleil maintiennent la sonde spatiale sur une orbite stable entre la Terre et le Soleil. Depuis cette position, SOHO peut observer le Soleil sans interruption et peut donc faire des observations 24/24 heures.

SOHO a été conçu pour étudier la structure interne du Soleil, son atmosphère extérieure étendue (la couronne solaire) ainsi que l'origine du vent solaire. Lancé en 1995, SOHO a observé le Soleil tout au long d'un cycle solaire complet et a fourni aux scientifiques des données précieuses qui leur ont permis de comprendre les maximas et les minimas du comportement du Soleil sur le long terme.

Depuis son point d'observation privilégié, SOHO a aussi pu observer des milliers de comètes rasantes, y compris la comète 2012/S1 ISON, une comète rasante qui s'est approchée du périhélie en 2013. SOHO est l'un des plus grands découvreurs de comètes de tous les temps puisqu'il en a trouvé plus de 2.700 depuis son lancement.

Figure 15



↑ Vue d'artiste de SOHO.

Comète 103P/Hartley et Herschel

L'observatoire spatial infrarouge de l'ASE, Herschel (Figure 16), qui a été lancé en 2009 embarquait le télescope infrarouge le plus grand et le plus puissant à avoir jamais été dans l'espace. C'était le premier observatoire à couvrir la plage d'ondes complète depuis l'infrarouge lointain jusqu'aux longueurs d'ondes submillimétriques. Les observations de Herschel sont allées plus loin dans l'infrarouge lointain que toutes les autres missions précédentes en étudiant les régions poussiéreuses et froides du cosmos proche et lointain qui seraient autrement invisibles.



Figure 16

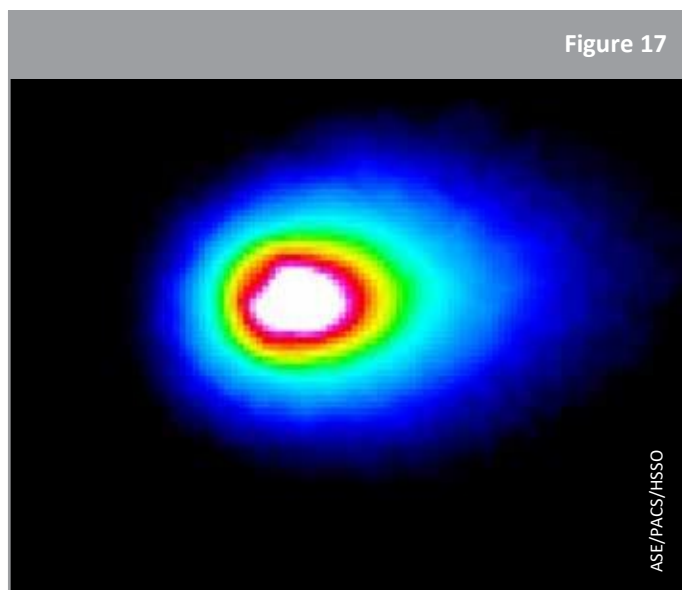


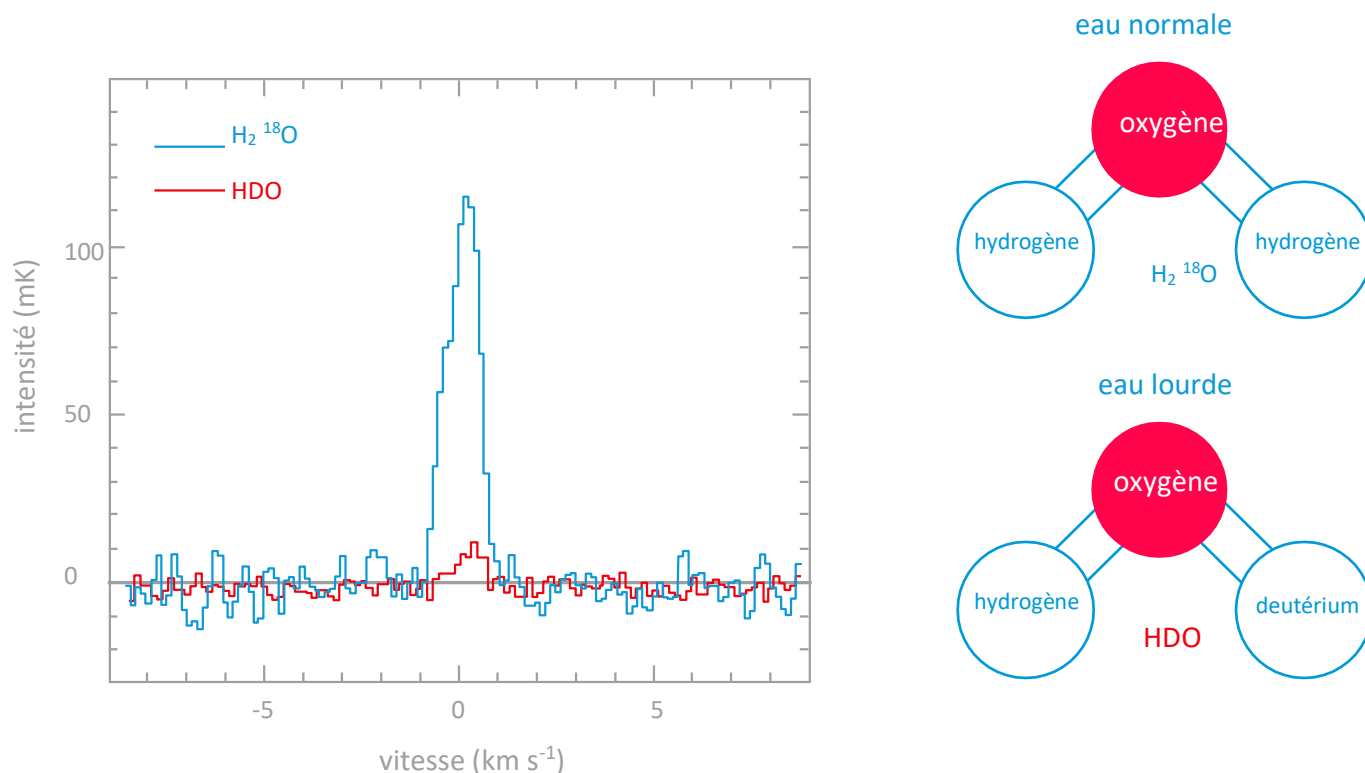
Figure 17

↑ La comète 103P/Hartley telle que la voit l'instrument PACS de l'observatoire spatial infrarouge Herschel.

En 2010, Herschel a effectué des observations spectroscopiques dans l'infrarouge lointain de la comète 103P/Hartley et a observé l'émission de vastes quantités d'eau hors de son noyau comme le montre en rouge et blanc la Figure 17. Ces observations ont été effectuées près du périhélie de la comète (point le plus proche du Soleil).

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

Les mesures de spectroscopie infrarouge effectuées par l'instrument HIFI embarqué dans Herschel ont permis de faire des estimations du rapport entre le deutérium (« hydrogène lourd » – atomes d'hydrogène avec un neutron et un proton dans leur noyau) et l'hydrogène dans l'eau émise par le noyau de la comète (par ex. le rapport entre l'eau normale et l'« eau deutérée » ; Figure 18). On a trouvé que, contrairement aux autres observations, l'eau contenue dans cette comète particulière présentait un rapport identique à celui de l'eau des océans de la Terre. Cela a ainsi fourni la première preuve directe confortant la théorie selon laquelle l'eau originelle sur la Terre provenait de la même source que certaines comètes.



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

Rosetta

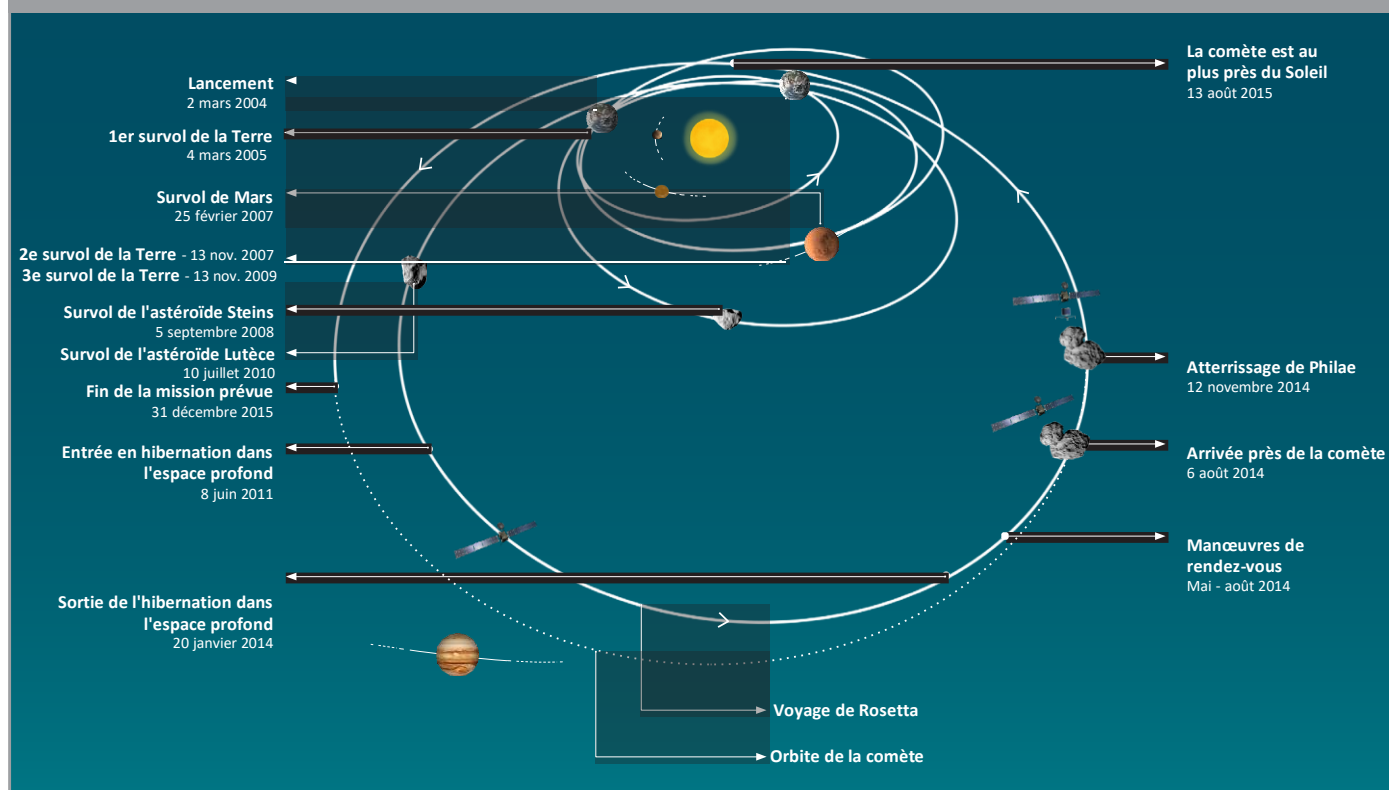
La mission Rosetta de l'ASE vers la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko a été lancée en 2004 pour rejoindre une comète après un voyage de 10 ans et atterrir sur son noyau.

L'objectif principal de Rosetta était d'aider à comprendre l'origine et l'évolution du Système solaire. La composition d'une comète reflète celle de la nébuleuse pré-solaire à l'origine du Soleil et des planètes du Système solaire il y a plus de 4,6 milliards d'années. Une analyse approfondie de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko par Rosetta et son atterrisseur fournira des informations cruciales qui permettront de comprendre comment le Système solaire s'est formé.

Des preuves convaincantes attestent que les comètes ont joué un rôle clé dans l'évolution des planètes car on sait que les impacts cométaires ont été bien plus fréquents dans les premiers temps du Système solaire qu'aujourd'hui. Des comètes par exemple pourraient avoir apporté de l'eau sur la Terre. La chimie de l'eau de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko sera analysée pour voir si elle est la même que celle des océans de la Terre. En plus de la glace et de la poussière, les comètes peuvent contenir de nombreuses molécules complexes, y compris des matières organiques qui peuvent avoir joué un rôle primordial dans l'évolution de la vie sur la Terre.

Pour rejoindre la comète, Rosetta a dû accomplir plusieurs fois des manœuvres d'assistance gravitationnelle par lesquelles la sonde spatiale tire avantage de la gravité d'un corps céleste pour accélérer sa vitesse (Figure 19). Afin d'aller plus loin dans l'espace, Rosetta a dû accomplir quatre manœuvres d'assistance gravitationnelle, comprenant trois survols de la Terre et un de Mars. Chacune de ces manœuvres a modifié l'énergie cinétique de Rosetta et donc la vitesse de la sonde ainsi que les dimensions de son orbite elliptique.

Figure 19



↑ Rosetta, la sonde spatiale de l'ASE, a effectué une série de manœuvres d'assistance gravitationnelle pour atteindre sa destination.

Compte tenu de la durée du voyage à accomplir, Rosetta a été placée en mode d'hibernation en juin 2011 dans le but de limiter sa consommation d'électricité et de carburant et pour minimiser ses coûts d'exploitation. Presque tous les systèmes électriques de Rosetta ont été coupés, à l'exception de l'ordinateur et de quelques dispositifs de chauffage.

En janvier 2014, le « réveil matin » interne préprogrammé de la sonde Rosetta l'a sortie de son sommeil avec mille précautions pour préparer son rendez-vous avec la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko. Après le réveil, les 11 instruments scientifiques de l'orbiteur et les 10 de l'atterrisseur ont été réactivés et préparés pour les observations scientifiques. Ensuite, une série de dix manœuvres de correction orbitale cruciales ont été effectuées pour réduire la vitesse de la sonde par rapport à la comète et pour suivre son orbite elliptique.

Après son arrivée près de la comète 67/ Tchourioumov-Guérassimenko, le 6 août 2014, Rosetta a entamé de nouvelles manœuvres pour se placer sur une orbite autour du noyau de la comète. Depuis cet emplacement, la panoplie d'instruments de Rosetta est en mesure de se livrer à une étude scientifique détaillée de la comète, d'examiner et de cartographier sa surface avec un niveau de détail inédit (Figure 20).

Figure 20



↑ Mosaïque NAVCAM de quatre images de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko, réalisée avec des images prises le 19 septembre 2014 quand Rosetta était à 28,6 km de la comète.

Après l'atterrissage, Rosetta continuera d'accompagner la comète dans son voyage elliptique. Rosetta reprendra de la vitesse avec la comète vers l'intérieur du Système solaire et continuera de l'étudier et de l'observer de très près quand le noyau glacé de la comète s'échauffera à mesure qu'elle s'approchera du Soleil.

En novembre 2014, après avoir cartographié et analysé le noyau de la comète pendant plusieurs mois, Rosetta déploiera son atterrisseur Philae pour tenter le premier atterrissage de tous les temps sur un noyau de comète. La force d'attraction exercée par la comète étant tellement faible, Philae emploiera des harpons et des vis à glace pour s'accrocher à sa surface. La Figure 21 est une vue d'artiste du déploiement de Philae sur la surface.

L'atterrisseur Philae emploiera 10 instruments, dont une foreuse, pour collecter des échantillons de la surface et des **spectromètres*** pour analyser directement la structure et la composition de la comète.

Figure 21



Sonde : ASE-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 sur la structure interne d'une comète.

* **Spectromètre** : instrument qui sépare les longueurs d'ondes constituant la lumière afin de pouvoir mesurer les propriétés de la source lumineuse.

→ ANNEXE

Glossaire

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

Arc de choc (comète) : surface d'interaction entre les ions contenus dans la chevelure d'une comète et le vent solaire. L'arc de choc est dû à la nature supersonique de la vitesse orbitale relative de la comète et de la vitesse du vent solaire. L'arc de choc se forme en avant de la comète dans la direction de flux du vent solaire. Les grandes concentrations d'ions cométaires qui s'accumulent dans l'arc de choc chargent le champ magnétique solaire en plasma. Les lignes de champ s'incurvent alors autour de la comète, entraînent les ions cométaires et forment la queue de gaz / plasma / ions.

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

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

Période orbitale : temps nécessaire pour parcourir une orbite complète.

Perturbations gravitationnelles : changements imposés à l'orbite d'un objet céleste (par ex. une planète, une comète) par les interactions avec les champs gravitationnels d'autres corps célestes (par ex. des planètes géantes, d'autres étoiles).

Points de Lagrange : chaque configuration orbitale comprend cinq points auxquels un objet qui est affecté uniquement par la gravité peut avoir une orbite stable. Pour plus d'informations, voir ESA teach with space - vidéo « gravity wells » | VP04 (voir la section Liens).

Sublimer (sublimation) : quand l'échauffement fait passer directement une substance de l'état solide à l'état gazeux, sans passer par la phase liquide. Lorsque le gaz est à nouveau refroidi, il forme habituellement un dépôt solide.

Survol : passage rapproché d'une sonde spatiale autour d'une planète ou d'un autre corps céleste. Si la sonde spatiale tire avantage du champ gravitationnel de la planète pour accélérer sa vitesse et changer sa trajectoire, on appelle cette manœuvre une « fronde gravitationnelle » ou une « assistance gravitationnelle ».

Unité astronomique (UA) : une unité astronomique est la distance moyenne entre la Terre et le Soleil, ou le rayon orbital de la Terre, soit approximativement 150 millions de km.

Vent solaire : un flux de particules hautement énergétiques (plasma) émises dans toutes les directions par la haute atmosphère du Soleil. Il contient essentiellement des électrons et des protons.

Calcul de la masse de la comète, de sa vitesse et de son énergie

À travers cette série de questions, vous rechercherez la masse, les vitesses et les énergies de comètes en vous aidant des données de la table ci-dessous.

Masse du Soleil
Densité de la glace
Constante gravitationnelle

$m_{\text{Soleil}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$
 $\rho = 1.000 \text{ kg m}^{-3}$
 $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

Questions

1. Une comète possède une énergie cinétique de $4,5 \times 10^{13} \text{ J}$. Elle se déplace à la vitesse de 34 km s^{-1} .
 Calculez la masse de la comète.

$$v = 34 \text{ km s}^{-1}$$

Réarrangez l'équation pour trouver m :

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = 4,5 \times 10^{13} \text{ J}$$

2. Une grande comète d'une masse de $5,2 \times 10^8 \text{ kg}$ manque de percuter la Terre et frôle l'atmosphère.
 Au moment de la mesure, sa vitesse était de $49,0 \text{ km s}^{-1}$.

Calculez

- a) l'énergie cinétique de la comète (en J).

$$m = 5,2 \times 10^8 \text{ kg}$$

$$v = 49 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$$

$$m = \frac{2 \times E_k}{v^2} = \frac{2 \times 4,5 \times 10^{13}}{(34 \times 10^3)^2} = 77854,7 \text{ kg}$$

- b) Si l'énergie libérée par l'explosion de 1 kilotonne (1.000 tonnes) de TNT est de $4,2 \times 10^{12} \text{ J}$,
 combien de kilotonnes d'énergie cette comète aurait-elle si elle avait percuté la Terre ?

$$1 \text{ kt} = 4,2 \times 10^{12} \text{ J}$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{(5,2 \times 10^8) \times (49 \times 10^3)^2}{2} = 6,24 \times 10^{17} \text{ J}$$

$$E_{\text{impact}} = \frac{E_k}{1 \text{ kt}} = \frac{6,24 \times 10^{17}}{4,2 \times 10^{12}} = 147,6 \text{ kt}$$

c) Après la quasi-collision, la masse et la trajectoire de la comète ont été modifiées. Proposez une raison à cela.

La comète a frôlé l'atmosphère. Lors de son passage dans l'atmosphère, des effets thermiques (dus à la compression dynamique - les élèves pensent souvent que la friction en est la cause) feront perdre de la masse à la comète suite à la sublimation de la glace. Cela a pour effet de modifier sa trajectoire.

La pression dynamique est la pression exercée sur un corps qui se déplace dans un fluide. Dans ce cas, l'atmosphère engendre une force de trainée importante qui s'exerce sur le corps.

$$P = \rho \times v^2$$

avec P la pression, ρ la densité du fluide, et v la vitesse du corps.

3. Une comète parcourt une orbite elliptique autour du Soleil. À son point le plus proche du Soleil, elle se trouvera à une distance de $4,9 \times 10^{10}$ m. À cet endroit, sa vitesse est de $8,9 \times 10^4$ m s⁻¹. Elle vient du nuage d'Oort, loin au-delà de l'orbite de Neptune. Quelle est sa vitesse quand elle se trouve à $1,5 \times 10^{11}$ m du Soleil (il s'agit de la distance orbitale entre la Terre et le Soleil) ?

E_p = énergie gravitationnelle potentielle $E_p + E_c = \text{cte}$

Approche au point le plus proche :

$$d_c = 4,9 \times 10^{10} \text{ m}$$

$$v_c = 8,9 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$$

Sur Terre :

$$d_T = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$v_T = ?$$

$$\frac{1}{2} m_{\text{comète}} v_c^2 - \frac{G m_{\text{Sun}} m_{\text{comète}}}{d_c} = \frac{1}{2} m_{\text{comète}} v_E^2 - \frac{G m_{\text{Sun}} m_{\text{comète}}}{d_E}$$

Divisez par $m_{\text{comète}}$

$$\frac{1}{2} v_c^2 - \frac{G m_{\text{Sun}}}{d_c} = \frac{1}{2} v_E^2 - \frac{G m_{\text{Sun}}}{d_E}$$

$$v_E^2 = v_c^2 - \frac{2 G m_{\text{Sun}}}{d_c} + \frac{2 G m_{\text{Sun}}}{d_E}$$

$$v_E = \sqrt{v_c^2 - \frac{2 G m_{\text{Sun}}}{d_c} + \frac{2 G m_{\text{Sun}}}{d_E}}$$

Substituez dans vos chiffres :

$$\begin{aligned} v_E &= \sqrt{(8,9 \times 10^4)^2 - \frac{2(6,67 \times 10^{-11})(2 \times 10^{30})}{4,9 \times 10^{10}} + \frac{2(6,67 \times 10^{-11})(2 \times 10^{30})}{1,5 \times 10^{11}}} \\ &= \sqrt{7,92 \times 10^9 - 5,44 \times 10^9 + 1,78 \times 10^9} = 6,52 \times 10^4 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

5. De quelle manière pensez-vous que les impacts d'astéroïdes ont affecté la Terre et la vie sur Terre au cours de son histoire ?

Points pouvant être mentionnés :

- des comètes composées essentiellement de glace pourraient avoir apporté une grande partie de l'eau sur la Terre.
- On a également trouvé que des comètes contenaient des éléments organiques comme des acides aminés et pourraient ainsi avoir apporté certains des ingrédients de base nécessaires à la vie sur la Terre.
- Des impacts de très grande envergure peuvent avoir des effets considérables sur le tout le globe, tels que :
 - Changement climatique en raison des grandes quantités de matière projetées dans l'atmosphère.
 - Activité sismique et volcanique accrue en raison des ondes de choc provoquées par l'impact et qui s'accompagnent de dégagements de grandes quantités de CO₂ et de SO₂ dans l'atmosphère.
 - Les grands impacts peuvent déclencher des raz de marées et des vagues de fond.
 - Des vagues d'extinctions (comme l'impact qui a provoqué la disparition des dinosaures il y a 65 millions d'années) peuvent résulter de ces événements.

Liens

Rosetta

Site Web de l'ASE sur Rosetta : www.esa.int/rosetta

Blog de l'ASE sur Rosetta : blogs.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)

Factsheet sur Rosetta, avec calendrier de la mission : www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Rosetta_factsheet

L'histoire jusqu'à maintenant (The story so far) : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_the_story_so_far

À la poursuite d'une comète : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Chasing_a_comet

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

Orbite de Rosetta autour de la comète : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Comment orbiter autour d'une comète : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/08/How_to_orbit_a_comet

Les comètes

Article ESA Kids sur les comètes : www.esa.int/esaKIDSen/SEMWK7THKHF_OurUniverse_0.html

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

Site Web de l'ASE sur Giotto : sci.esa.int/giotto/

Site Web de l'ASE sur Rosetta : www.esa.int/rosetta

Article d'ESA Kids au sujet de notre Univers : www.esa.int/esaKIDSen/SEMYC9WJD1E_OurUniverse_0.html

Giotto

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

Herschel

Site Web consacré à l'observatoire spatial ESA Herschel : www.esa.int/herschel

Les océans de la Terre ont-ils été créés par les comètes ? :

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

SOHO

Site de l'ASE consacré à SOHO : soho.esac.esa.int

Vidéo de la comète ISON près du Soleil comme l'a vue le satellite SOHO de l'ASE/NASA : sci.esa.int/soho/54346-soholasco-view-of-comet-ison-27-30-november-2013/

Impact sur la Terre

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

Collection Teach with space

ESA teach with space - vidéo « gravity wells » | VP04: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Gravity_wells_-_classroom_demonstration_video_VP04

ESA teach with space – Les ellipses manuel de l'enseignant avec activités pour les élèves | P02:

esamultimedia.esa.int/docs/edu/P02_Marble-ous_ellipses_teacher_guide.pdf

ESA teach with space - marble-ous ellipses video | VP02: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous_ellipses_-_classroom_demonstration_video_VP02

ESA teach with space - cooking a comet video (cuisinons une comète)| VP06:

www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_ingredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VP06

Teach with space – cuisinons une comète | P06
www.esa.int/education

Développé pour l'ASE par la National Space Academy, UK
Illustrations de Kaleidoscope Design, NL

Une production de ESA Education
Copyright © European Space Agency 2014