

Astéroïdes et Comètes : qui sont-ils, d'où viennent-ils, où vont-ils?

Albert JAMBON

Sorbonne Université, et Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, France

1. Introduction

Les comètes sont connues depuis l'Antiquité puisqu'elles sont mentionnées dans des textes sumériens dès l'âge du Bronze (Bjorkman 1973) et dans les chroniques chinoises (depuis la dynastie Chang, fin du deuxième millénaire BC), le passage le plus ancien connu de la comète de Halley, en 240 avant notre ère y est consigné. Au 17^{ème} siècle Newton montre que ces objets obéissent aux lois de la mécanique céleste et sont en orbite (très excentrique) autour du Soleil.

La découverte des astéroïdes est beaucoup plus récente, c'est une histoire du 19^{ème} siècle puisque le premier astéroïde, Cérès a été découvert le 1 janvier 1801 et le centième en 1868.

Ce décalage dans la découverte est inhérent à la nature même de ces objets : les astéroïdes sont essentiellement faits de pierre et se situent pour la plupart sur une orbite stable, subcirculaire entre Mars et Jupiter, ils n'émettent pas de lumière, ce qui signifie que leur albédo est faible et qu'il n'émettent pas de substances gazeuses source de lumière comme pour les comètes. Lorsque par hasard ils sont déplacés de leur orbite ils peuvent approcher la Terre. Leur observation est alors possible même s'ils sont de taille modeste et on constate que leur inactivité n'a rien à envier au désert des Tartares. Les comètes au contraire viennent des confins du système Solaire et sont constituées de glace pour une grande partie. Loin du Soleil elles sont stables et invisibles (trop loin, trop petites), mais leur sublimation en s'approchant du Soleil fait apparaître la chevelure de lumière qui les a rendu si étonnantes et donc si célèbres. Ce sont des objets transitoires, c'est-à-dire que leur durée de vie (à l'échelle du Système Solaire) est courte, si bien que l'on n'est jamais certain du retour d'une comète.

Ceci résume l'état de nos connaissances avant le début de la conquête spatiale. Depuis, l'observation des astéroïdes et des corps cométaires a énormément progressé et c'est pour cette raison qu'il convient de faire le point, même si on peut être certain que dans quelques années mon exposé paraîtra vieillot. Le plan de l'exposé sera trivial puisque **je** commencerai par présenter les astéroïdes avant de **nous** m'intéresser aux comètes et avant de conclure.

2. Les Astéroïdes

L'avancée de nos connaissances sur l'ensemble des corps du Système Solaire a amené récemment à redéfinir la notion de planète ce qui a une incidence sur ce dont nous allons parler.

On peut lire sur le site de Futura Science :

L'Union Astronomique Internationale (UAI) s'est longuement penchée sur la définition des planètes lors de sa 26^{ème} assemblée générale qui s'est tenue à Prague du 14 mai au 25 août 2006. Il devenait en effet urgent que la nomenclature des objets reflète l'ensemble des corps que les performances des instruments actuels nous permettent de détecter dans le Système solaire, alors que celle-ci était restée pratiquement figée depuis l'antiquité, lorsque que le mot "planète" désignait étymologiquement tout "vagabond" du ciel, c'est-à-dire les points de lumière qui bougeaient par rapport aux étoiles. En conséquence, l'Union Astronomique Internationale a décidé de répartir les corps de notre Système solaire en trois grandes catégories distinctes.

1 - Une planète est un corps céleste, qui :

- *a. Est en orbite autour du Soleil ;*
- *b. Possède une masse suffisante pour que sa gravité l'emporte sur les forces de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique, sous une forme presque sphérique ;*
- *c. A éliminé tout corps susceptible de se déplacer au voisinage de son orbite.*

2 - Une "planète naine" est un corps céleste, qui :

- a. b. comme pour une planète normale.
- c. N'a pas éliminé tout corps susceptible de se déplacer au voisinage de son orbite ;
- d. N'est pas un satellite.

3 - Tous les autres objets en orbite autour du Soleil, à l'exception des satellites, sont appelés "petits corps du système solaire". On notera que conformément à la définition ci-dessus, Pluton se classe dans la catégorie 2, parmi les "planètes naines", et s'identifie donc comme le prototype d'une nouvelle catégorie d'objets trans-neptuniens dont la dénomination est depuis Juin 2008 celle de plutoïde ...

Si l'on suit ces définitions, comètes et astéroïdes sont des *petits corps* à l'exception de Cérès et Pluton qui sont des planètes naines et que nous allons considérer, alors que les planètes au sens strict, ne seront pas examinées ici.

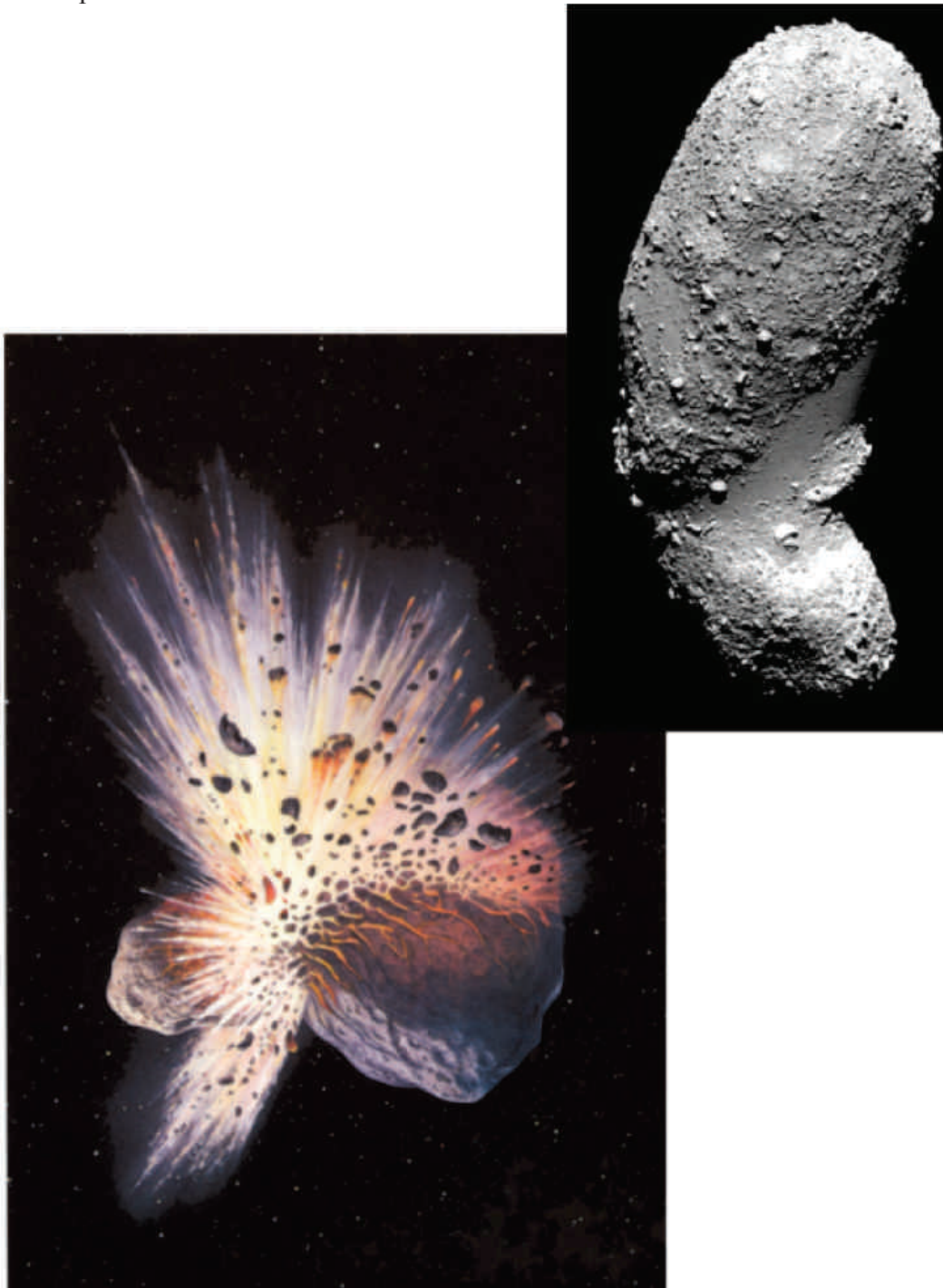


Figure 1. L'astéroïde Itokawa (JAXA) pourrait être un tas de débris ré-agglomérés après une collision. Vue d'artiste d'une telle collision par D.S. Norton (in O.R. Norton 2002).

21. Leur dimension et forme.

Depuis que l'exploration spatiale a permis d'obtenir des images bien résolues d'un certain nombre d'astéroïdes on constate que ceux-ci ont des formes variées, parfois très irrégulières et interprétées comme le résultat de l'agglomération de débris après une collision (figure 1). Le plus gros des astéroïdes est Cérès, une planète naine de 960 km de diamètre soit moins de la moitié du diamètre lunaire. Les plus petits astéroïdes observés font moins de 1km.

22. La localisation des astéroïdes.

La grande majorité des astéroïdes connus est située entre Mars et Jupiter dans une large bande où les orbites sont stables. On note de fines zones totalement vides qui correspondent à des lacunes où la période orbitale est en résonnance avec celle de Jupiter et où les orbites sont instables (par exemple vers 2.5 et 2.8 AU) (figure 2).

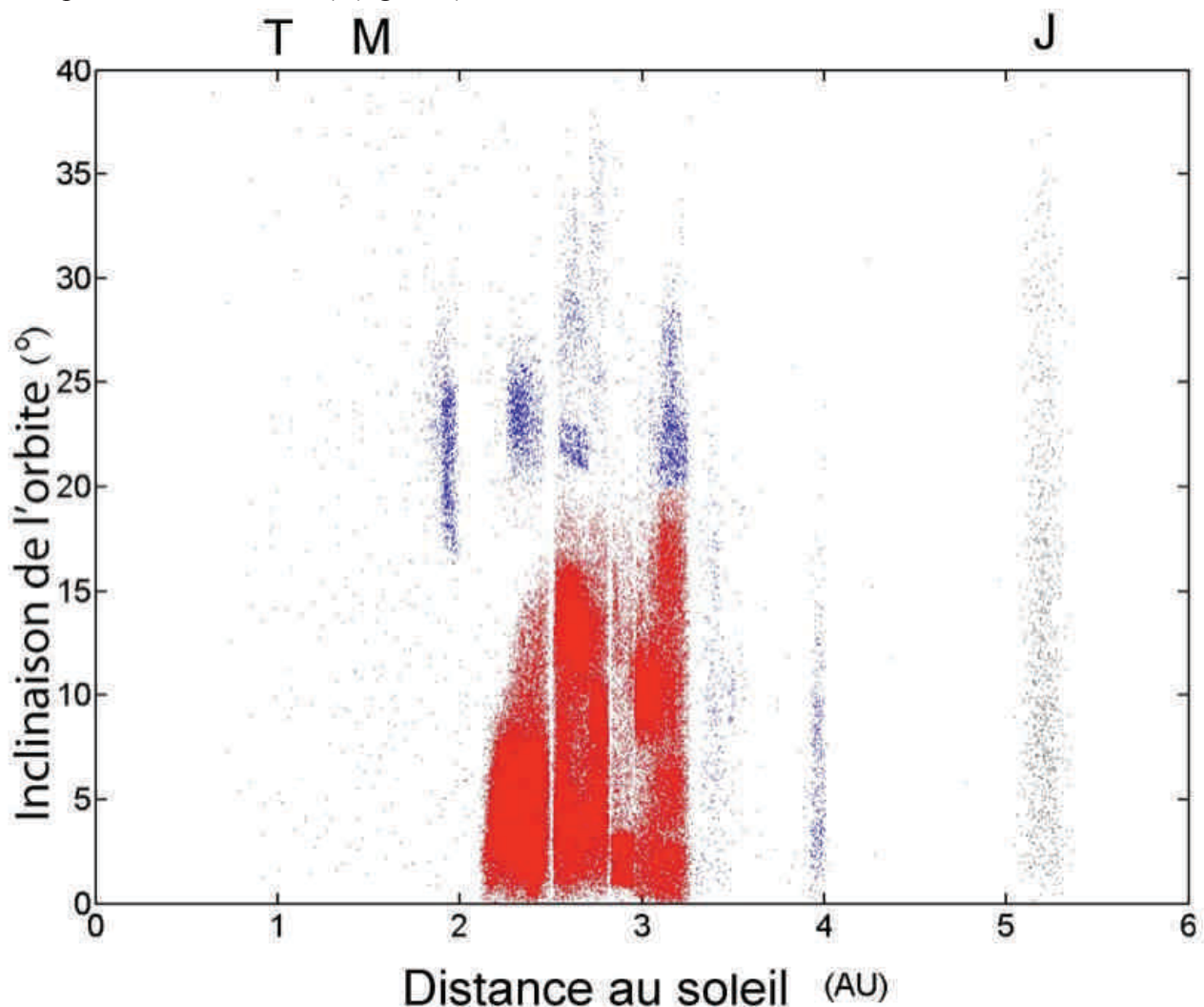


Figure 2. Diagramme représentant l'inclinaison de l'orbite en fonction de la distance (semi grand axe), chaque point représente un astéroïde. On note de fines zones totalement vides qui correspondent à des lacunes où la période orbitale en résonnance avec celle de Jupiter correspond à une orbite instable (par exemple vers 2.5 et 2.8 AU). Certains groupes d'astéroïdes - à 2 A.U. et 20° par exemple - correspondent probablement à des corps disloqués. La zone proche de Jupiter a été littéralement nettoyée, sauf aux points de Lagrange situés à la même distance que Jupiter.

Certains forment des groupes (excentricité et inclinaison de l'orbite) et ont très probablement une origine commune. A l'heure actuelle on a pu repérer environ n astéroïdes dans les ceintures principales. Certains astéroïdes peuvent occasionnellement être déstabilisés ; ils prennent alors une orbite elliptique qui, si elle est suffisamment excentrique, peut recouper l'orbite des planètes internes. Si leur orbite recoupe l'orbite terrestre on les appelle géocroiseurs (NEO en anglais) ; ils

sont potentiellement dangereux car ils pourraient entrer en collision avec la Terre. Ces géocroiseurs présentent l'avantage de pouvoir être observés facilement lorsqu'ils passent au voisinage de la Terre même s'ils ont une petite taille.

Il existe plusieurs autres familles d'astéroïdes en dehors des ceintures principales. Parmi eux les Troyens sont situés aux points de Lagrange de Jupiter, c'est-à-dire qu'ils sont situés sur une orbite identique à celle de Jupiter. Les Centaures constituent une autre famille et sont situés sur des orbites entre Saturne et Uranus ; deux de ces astéroïdes dépassent 150 km de diamètre. Tous ces astéroïdes lointains sont moins bien connus car plus difficiles à observer.

23. Leur composition

Pour connaître la composition des astéroïdes il existe plusieurs approches possibles. La première résulte de l'observation que la plupart des météorites arrivant sur Terre à un corps parent dont l'origine se situe dans les ceintures d'astéroïdes (figure 3).

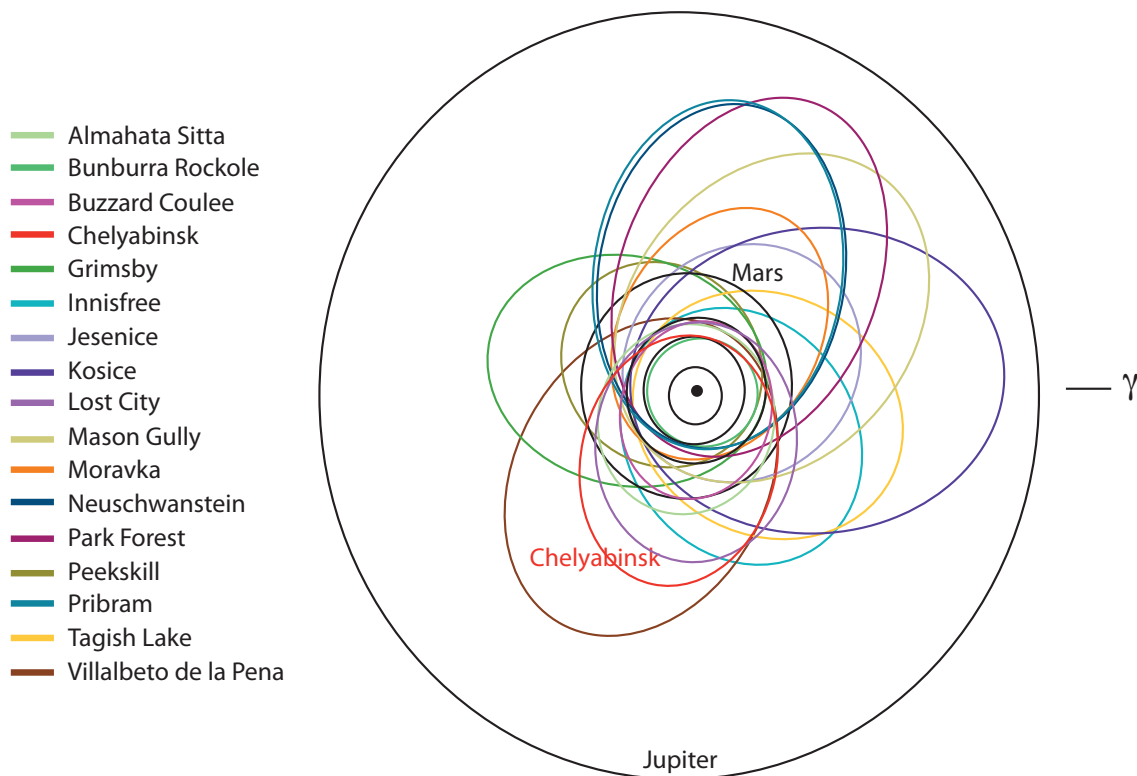


Figure 3. Les orbites de quelques météorites sont compatibles avec une origine dans les ceintures d'astéroïdes entre Mars et Jupiter (cercles noirs) puisqu'elles les traversent. La composition des astéroïdes serait donc à comparer à celle des météorites.

Même si peu d'orbites ont pu être reconstruites, on peut conclure que les météorites sont des échantillons d'astéroïdes, puisqu'elles appartiennent à des types variés.

Une deuxième approche consiste à analyser la lumière réfléchie par les astéroïdes (dans le visible et l'infrarouge). La comparaison avec la réflectance des météorites nous indique que l'on peut assimiler certains astéroïdes avec certains types de météorites, pour ce qui est de leur composition de surface (figure 4).

Ainsi la surface de Cérès est comparable à une composition de chondrite de type CI, celle de Vesta à une composition d'eucrite. La très grande variété de compositions observées, comme dans tous les types de météorites, suggère que les astéroïdes ne constituent pas une population homogène et que l'hypothèse ancienne d'une planète explosée n'est pas défendable aujourd'hui. Il s'agit plutôt de débris résiduels de la formation du système Solaire et stockés là par hasard sur des orbites relativement stables. Ils n'ont pas pu s'agréger pour former une planète à cause des perturbations dues au voisinage de Jupiter. Cette idée est en accord avec la théorie du grand tack (= virement de bord). Entre 4.5 et 4 Milliards d'années Jupiter et Saturne se sont déplacés jusqu'à atteindre leur

position actuelle. Leur entrée en résonance vers 4 milliards d'années aurait entraîné de grandes perturbations et déstabilisé un bon nombre d'astéroïdes résiduels, qui auraient terminé leur vie dans le Soleil, sur Jupiter ou éjectés du système Solaire. Seul un petit nombre aurait survécu dans les ceintures d'astéroïdes principales.

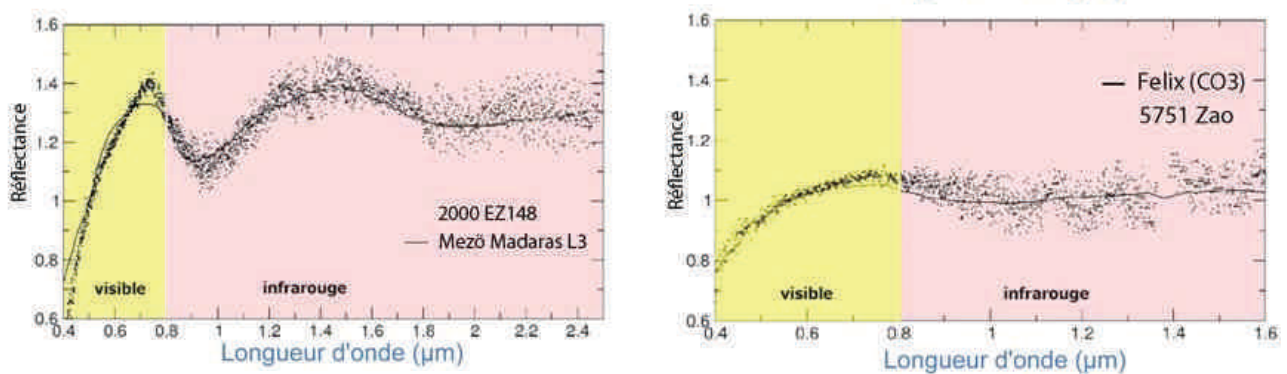


Figure 4. La comparaison avec la réflectance des météorites nous indique que l'on peut assimiler certains astéroïdes avec certains types de météorites, pour ce qui est de leur composition de surface. Modifié d'après P. Vernazza.

24. Les dangers associés

Nous avons mentionné que certains astéroïdes possèdent une orbite recoupant celle de la Terre et constituent donc un danger potentiel en cas de collision, on les appelle Géocroiseurs (ou NEO acronyme anglo-saxon). On a donc entrepris un vaste travail de repérage de ces géocroiseurs. A l'heure actuelle on en a repéré plus de 10 000, un peu plus de 10 % d'entre eux ayant une taille supérieure à 1 km (figure 5).

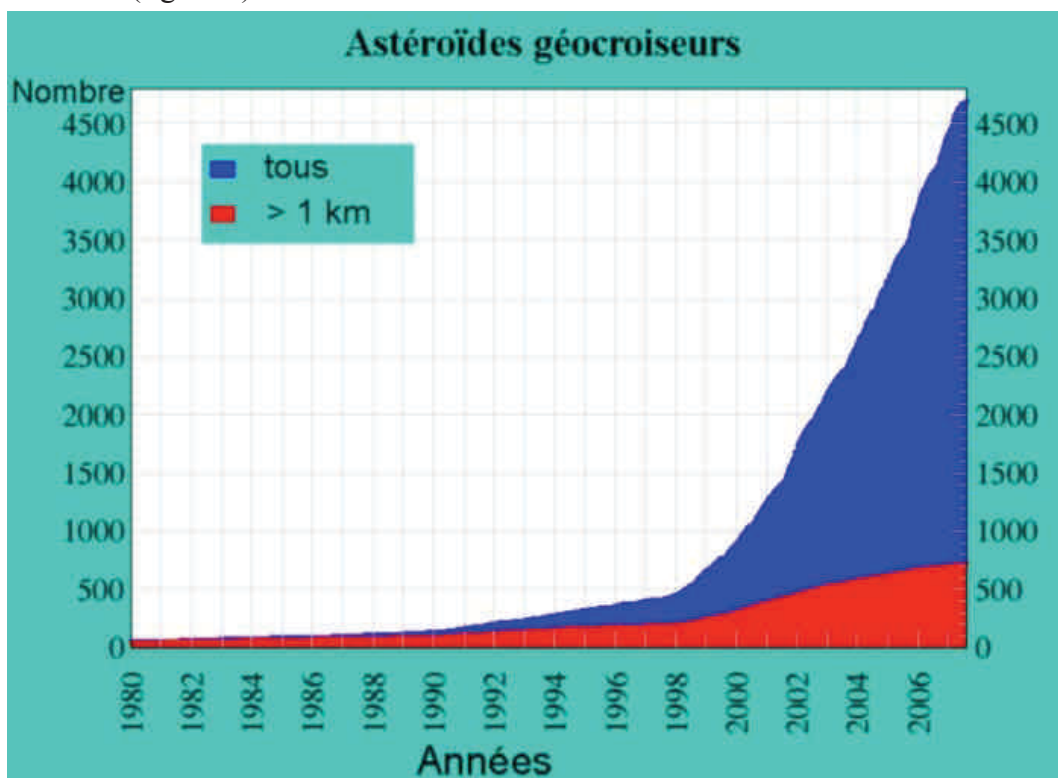


Figure 5. Historique de la découverte des géocroiseurs (Chamberlin, 2008). A l'heure actuelle on a repéré plus de 10 000 géocroiseurs, un peu plus de 10 % d'entre eux ayant une taille supérieure à 1 km. Leur nombre augmente avec l'amélioration des moyens d'observation.

Sachant qu'un bolide arrivant au sol produit un cratère environ vingt fois **plus grand** on comprend que la collision avec un astéroïde kilométrique serait catastrophique. Le Meteor cratère en Arizona présente un diamètre de 1200 m ; le cratère de Chicxulub au Mexique associé à la crise à la limite

Crétacé-Paléogène (disparition des dinosaures il y a 65 Ma) présente un diamètre d'environ 150 km (figure 6).

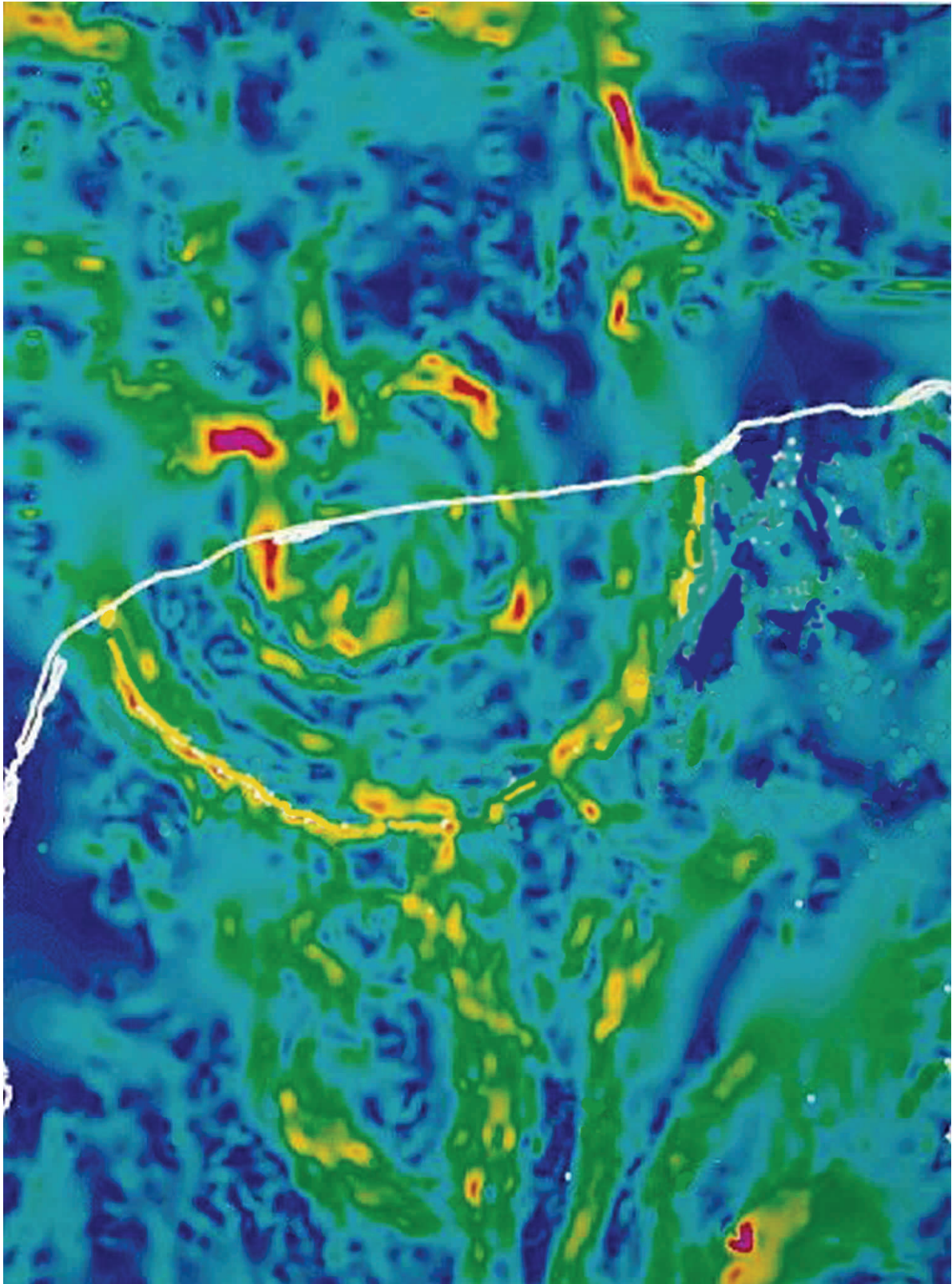


Figure 6. Carte gravimétrique du cratère de Chicxulub au Mexique, associé à la crise à la limite Crétacé-Paléogène (disparition des dinosaures il y a 65 Ma) montrant un diamètre d'environ 150 km. La ligne blanche correspond au rivage du Mexique (Yucatan), au N l'océan au S le continent.

La probabilité d'un impact de cette taille, correspondant à un bolide de près de 10 km de diamètre, est estimée à environ un tous les 100 Ma. On comprendra donc que la probabilité de collision catastrophique est faible (mais non nulle) avec un risque associé extrêmement important. Les grandes agences spatiales ont donc mis en place des programmes de recherche sur la prévention des

collisions. Ces programmes en sont à leurs premiers balbutiements. Parmi les solutions étudiées on retiendra :

- Le projet d'impacteur pour réduire l'astéroïde en petits morceaux est le plus simple mais non le moins risqué car des débris plus nombreux mais encore dangereux bien que plus petits pourraient subsister.
- tracteur gravitationnel
« moteur » posé sur l'astéroïde orbiteur.
- Modifier l'albédo. On pourrait utiliser l'effet Yarkovsky, effet de la lumière solaire sur la trajectoire d'un astéroïde à long terme, en modifiant l'albédo d'un astéroïde potentiellement dangereux. Cela suppose que l'impacteur potentiel ait été repéré suffisamment longtemps à l'avance et que la modification de trajectoire suite à cet effet soit suffisamment importante dans le faible intervalle de temps considéré.

24. L'exploration spatiale

Dans le tableau ci-dessous nous présentons la liste des missions spatiales dévolues à l'observation des astéroïdes.

Mission	Astéroïdes
Hayabusa 2	<i>Ryugu</i>
Osiris Rex	<i>Bennu</i>
Hayabusa 1	<i>Itokawa</i> (retour d'échantillons)
Dawn	<i>4 Vesta, 1 Ceres</i>
Rosetta	<i>Steins, Lutetia</i>
NEAR	<i>Eros, Mathilde</i>
Deep Space 1	<i>Braille</i>
Cassini- Huygens	<i>Masursky</i>
Stardust	<i>Anne Franck</i>
Galileo	<i>Gaspra, Ida</i>

Ces missions ont permis d'obtenir des photos de la surface des astéroïdes à haute résolution et de préciser leurs caractéristiques physiques. Une seule mission, Hayabusa, a permis le retour de quelques g d'échantillon (voir encadré), d'autres sont en cours (Hayabusa 2 et Osiris Rex).

Les résultats de la mission Hayabusa

25143 Itokawa est un astéroïde géocroiseur subkilométrique de la famille des Apollo, un impacteur terrestre potentiel, de diamètre moyen de 350 m. C'est le premier astéroïde (et le seul à ce jour) ayant fait l'objet d'un retour d'échantillon grâce à la sonde japonaise Hayabusa.

Itokawa est un astéroïde de type S. L'imagerie RADAR montre qu'il s'agit d'un ellipsoïde de 630 ± 60 m de long et 250 ± 30 m de large. L'observation proche montre qu'Itokawa présente en fait une forme complexe, constituée de deux blocs principaux accolés (figure 1). L'absence de cratères à la surface suggère une formation récente avec une surface très irrégulière couverte de blocs de tailles variées. La densité moyenne de 2.9 g/cm^3 suggère une forte porosité en relation avec la très faible gravité de surface, certaines parties ayant une densité aussi faible que 1.8. Toutes ces observations concourent pour assimiler Itokawa à un tas de débris réassemblés gravitationnellement à la suite d'un impact récent qui pourrait être celui qui l'aurait éjecté des ceintures d'astéroïdes. L'analyse des échantillons permet de l'identifier à une composition de type chondrite ordinaire LL. Leur minéralogie indique une formation sur un corps d'au moins 20 km de diamètre dont Itokawa ne serait qu'un assemblage de débris. L'âge d'exposition de la surface a été estimé à 8 Ma. Cet âge est comparable à l'âge d'exposition de nombreuses chondrites.

25. Discussion

Dans le tableau ci-après nous avons regroupé quelques caractéristiques des trois plus gros astéroïdes.

	Diamètre (km)	densité	Albédo
Cérès	974	2.05	0.09
Vesta	550	3.7	0.4
Pallas	570	2.5	0.14

Vesta, dont le diamètre est le quart de celui de la Lune, présente une densité comparable (3.4 pour la Lune). Cette faible densité par rapport à celle d'une chondrite ordinaire (environ 4.5) laisse penser que Vesta serait un débris d'embryon planétaire avec un noyau très petit. Même si cela paraît anormal pour une composition d'astéroïde, ce n'est pas en contradiction avec la composition des météorites observées.

Pallas, de diamètre comparable à Vesta, présente une densité encore plus faible qui ne peut pas s'expliquer par une composition chondritique ni même par une composition basaltique (résultat de la différenciation d'une telle composition). La taille importante permet d'exclure la possibilité d'une porosité supérieure à 30 % car la gravité n'est pas négligeable sur un corps de cette taille.

Le cas de Cérès est encore pire avec une densité de 2.05 et une taille près de deux fois supérieure. On en vient donc à conclure que pour ce corps à faible densité la présence de glace (d'eau) est l'explication la plus simple. Ceci permet donc d'expliquer la faible densité mais aussi l'émission de jets de gaz de Cérès tels qu'ils ont été observés récemment laissant à la surface des taches blanches interprétées comme des dépôts de sels associés à ces jets (Figure 7).

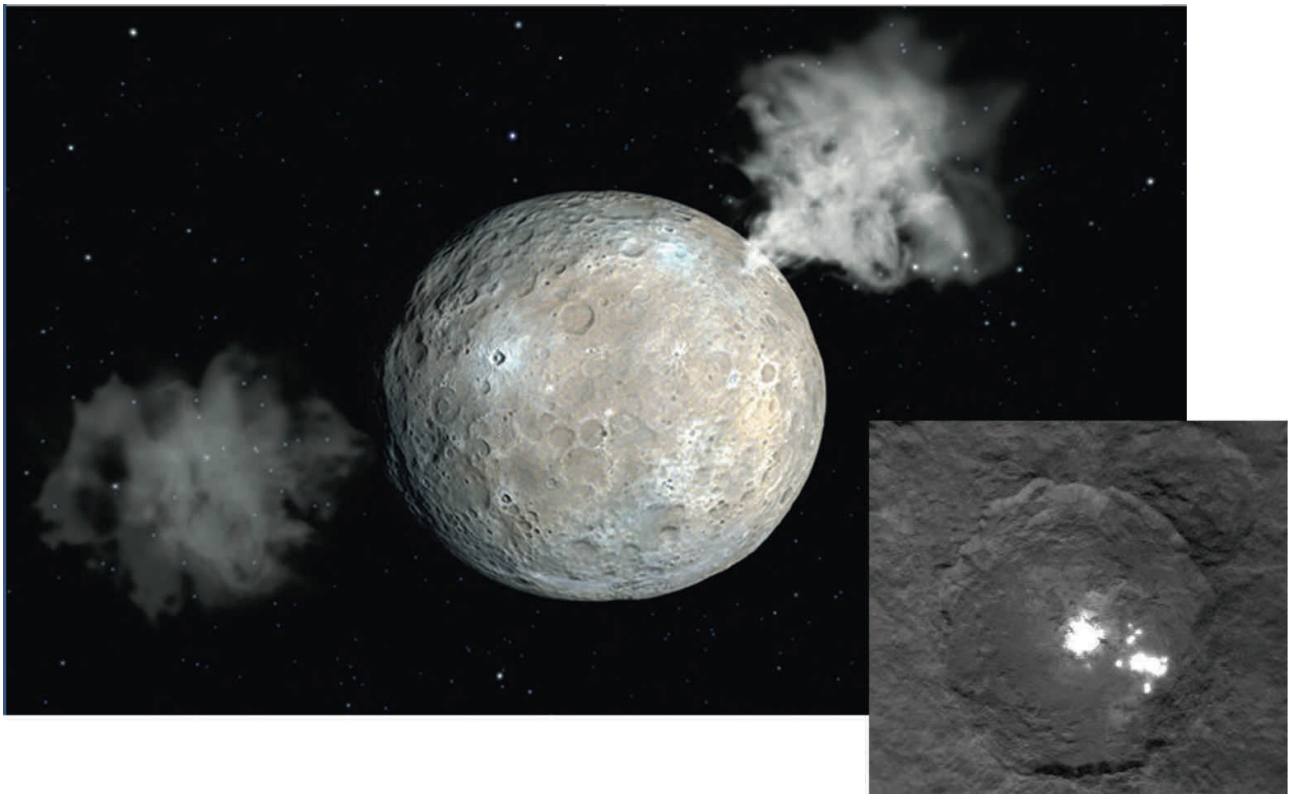


Figure 7. L'émission de jets de gaz de Cérès tels qu'ils ont été observés récemment a laissé à la surface des taches blanches interprétées comme des dépôts de sels associés à ces jets.

On en vient donc à la conclusion que certains astéroïdes contiendraient des quantités de glace significatives ce qui expliquerait l'activité épisodique de certains astéroïdes. On ne s'attend pas à ce que des astéroïdes formés dans le système solaire interne aient pu accumuler des quantités de glace importantes et on doit donc en conclure que ces corps aient été apporté du système solaire externe, peut-être lors des perturbations liées au grand tack. Cérès présente une surface dont la réflectance est comparable à celle des chondrites carbonées de type CI. La minéralogie de ces chondrites suggère une présence d'eau significative à un stade de leur évolution précoce ayant entraîné la formation de minéraux argileux spécifiques. Ces chondrites pourraient donc être un résidu en provenance d'un corps glacé ce qui, jusqu'à une date récente n'avait pas été envisagé. Tous les

astéroïdes de type C (ceux dont la réflectance est comparable à celle de Cérès) pourraient être de ce type, ce n'est évidemment pas le cas de tous les astéroïdes.

Les météorites les plus nombreuses de très loin sont les chondrites ordinaires. Un certain nombre d'astéroïdes présente une réflectance en accord avec ce type de météorites. Leur composition suggère que les chondrites ordinaires de type H, L et LL auraient été formées dans les ceintures d'astéroïdes et seraient de plus en plus oxydées en fonction de leur distance croissante au Soleil.

3. Les Comètes et les objets transneptuniens.

Jusqu'assez récemment les comètes n'étaient connues que par leur émission lumineuse lors de leur passage près du soleil (figure 8).



Figure 8. Spectaculaire passage près du Soleil de la comète C/2006 P1 McNaught en janvier 2007, vu du site de l'ESO au Paranal (Chili). (© S. Deiries/ESO).

Leur trajectoire est toujours une ellipse très excentrique. On distingue les comètes jupitériennes de périodes plutôt courte (comme la comète de Halley : 76 ans) et les comètes transneptuniennes originaires des confins du système solaire et dont la période est beaucoup plus longue et l'orbite quasiment parabolique. Leur volatilisation au voisinage du soleil correspond à la perte de glace et de poussières constituées surtout de silicates et accessoirement de différents constituants organiques. Plusieurs sondes spatiales ont eu pour objectif l'exploration des comètes, la première, Giotto en 1986 pour la comète de Halley. Une autre caractéristique des comètes connues est leur petite taille (Halley : 16x8x8 km) (Figure 9).

L'observation récente de Tchurioumov-Gerasimenko a montré que sa surface est couverte de blocs et que sa composition comprendrait environ 40 % de glace. Il s'agit d'une comète de courte période qui revient environ tous les quatre ans.

Les comètes sont de tout petits objets et ne sont peut-être pas bien représentatives des régions d'où elles sont issues. Des progrès très récents dans l'observations des objets lointains ont en effet montré qu'il existe au delà de Neptune des corps de taille significative dont Pluton n'est que le premier découvert (tableau page suivante). Depuis 1998 on a ainsi découvert plus d'une dizaine d'objets de diamètre supérieur à 100 km, le plus gros, Eris, faisant plus de 2 000 km de diamètre, donc de taille comparable à Pluton (figure 10).

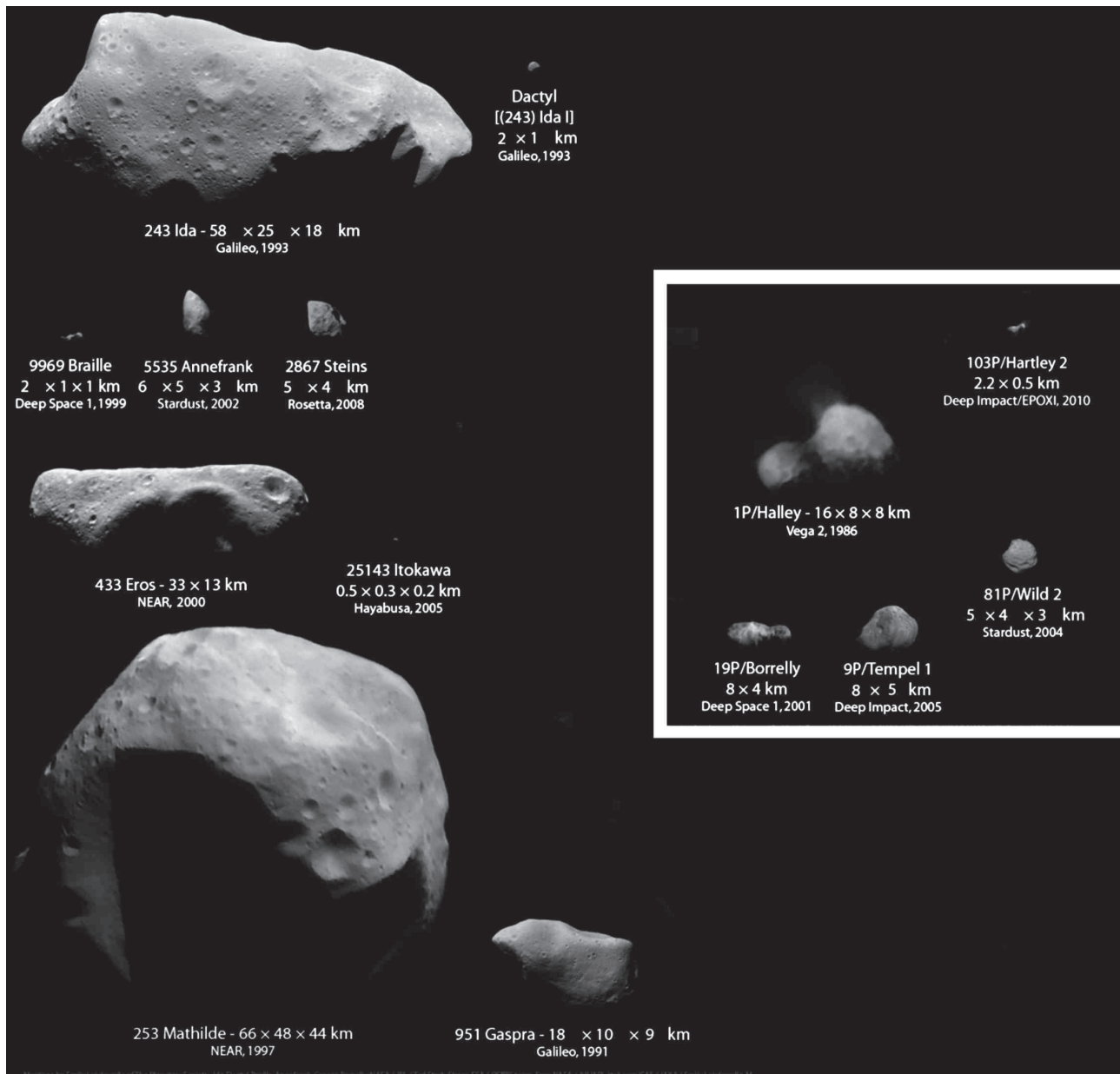


Figure 9. Une caractéristique des comètes connues est leur petite taille (Halley : 16x 8x 8 km). Les comètes observées par des sondes spatiales (encadré) comparées à quelques astéroïdes de taille modeste.

		année	diamètre (km)	a (UA)	e	T rev (a)	i	catégorie	d	Albédo
Pluton		1930	2370	39	0.25	90	17	plutino	1.85	0.6
1992QB1	Albion	1992	110	44	0.066	289	2	cubewano KBO	?	?
Varuna		2000	670	43	0.05	283	17	cubewano KBO	1	0.04
Ixion		2001	760	39	0.24	247	20	plutino	1	0.15
2002AW197		2002	770	47	0.13		24	cubewano KBO		0.11
2002TX300		2002	290	43	0.12	284	26	cubewano KBO	?	0.7
Quaoar		2002	1090	43	0.034	285	8	cubewano KBO	1	0.07
Sedna		2003	1000	515	0.85	11700	12	sednode	1.2/3.4	0.07
Haumea		2004	2000x1000	43	0.18	285	28	plutino	2.6/3.4	0.7
Orcus		2004	950	40	0.23	248	21	plutino	1.6	0.2
Eris		2005	2330	68	0.44	556	44	plutino	2.53	0.96
Makemake		2005	1430	46	0.16	309	29	cubewano KBO	1.4/3.2	0.81
2006SQ372		2006		742	0.97	20250	20	cubewano KBO	?	?



Figure 10. Les principaux objets transneptuniens, auxquels on devrait rajouter Pluton, comparés aux 3 plus gros astéroïdes après Cérès (encadré).

Leur orbite est souvent très excentrique et de ce fait leur distance d'observation varie fortement avec leur position sur leur orbite. Il est en général très difficile de déterminer leur taille et leur masse car ils sont trop petits et trop lointains (figure 11).

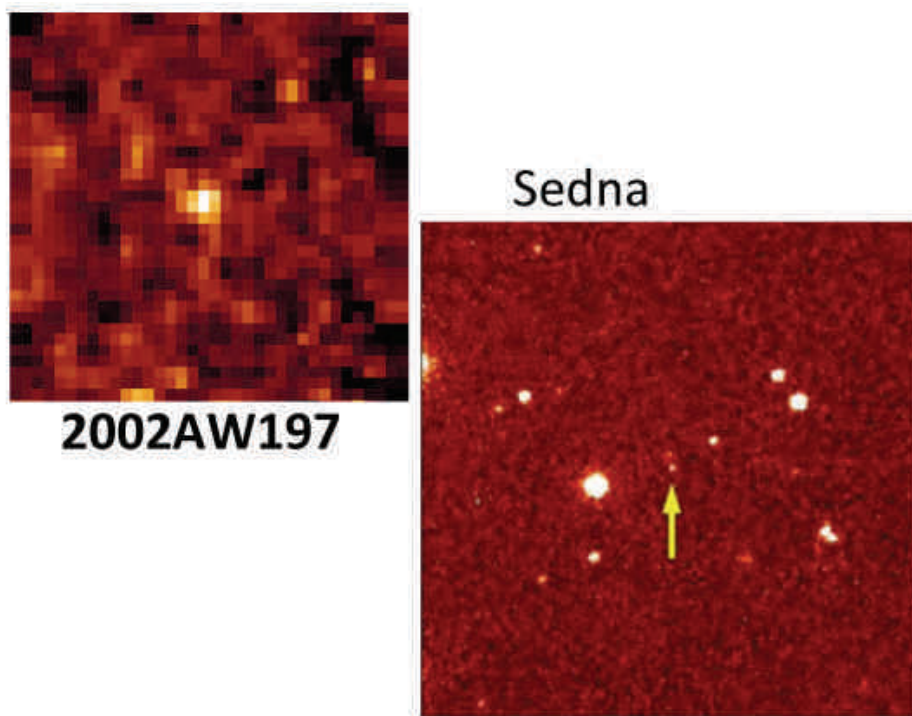


Figure 11. Il est en général très difficile de déterminer leur taille et leur masse (donc leur densité) car ils sont trop petits et trop lointains. Sedna 960-80 UA, diam 1 000 km.

Les découvrir est de ce fait une gageüre d'autant que leur déplacement (par rapport aux étoiles) est extrêmement lent (orbites parcourues en plusieurs milliers d'années). Lorsque par hasard ils possèdent un satellite visible alors on peut déterminer leur masse. On notera que leur orbite est

souvent très inclinée par rapport au plan de l'écliptique à tel point que certains de ces objets ont été découverts par hasard, la recherche se faisant habituellement proche du plan de l'écliptique. Lorsque leur densité est connue elle est comprise entre 1 et 2.5 ce qui indique qu'ils contiennent une quantité importante de glace. On est donc amené à conclure que les corps glacés important, parents des comètes, sont ces objets transneptuniens dont l'inventaire vient à peine de commencer. Il est possible que des objets plus lointains encore et situés sur des orbites très inclinés restent à découvrir.

4. Conclusions

Avant l'exploration spatiale, astéroïdes et comètes paraissaient constituer deux populations d'objets bien différents et sans aucun rapport. Aujourd'hui on constate que les astéroïdes sont présents en dehors des ceintures principales et que du point de vue de leur taille il y a un continuum des planètes naines aux fragments kilométriques. Leur inactivité apparente est liée à leur orbite stable mais on sait que certains astéroïdes peuvent avoir une activité épisodique. Enfin des astéroïdes ont été observés bien au delà des ceintures principales et les objets transneptuniens qui n'ont pas d'activité cométaire pourraient être considérés comme des astéroïdes. Leur dénombrement n'en est qu'à son début. Les observations montrent que ces objets transneptuniens sont variés et qu'ils sont constitués en partie de glace, parfois le constituant dominant, comme pour les comètes.