



VERS UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DE LA PHYSIQUE DES ASTÉROÏDES

Les petits corps du Système solaire, en particulier les astéroïdes, sont les derniers vestiges des blocs qui s'agglomérèrent pour former les planètes telluriques et le cœur des planètes géantes. Déterminer leur composition et cartographier leur répartition dans le Système solaire sont la clef pour comprendre comment les planètes, et en particulier la Terre, se sont formées.

Contrairement aux planètes sur lesquelles la géologie fut ou est encore active (volcanisme, tectonique des plaques) et où l'érosion peut être importante (atmosphère, vie...), les astéroïdes ne disposent pas de suffisamment d'énergie interne (fournie par la radioactivité naturelle) pour évoluer thermiquement ou chimiquement. Ils sont ainsi des capsules temporelles nous renseignant sur les conditions qui régnaient dans le disque protoplanétaire au début de l'histoire de notre Système solaire.

Pour décoder nos origines, il est crucial de comprendre comment les orbites et les compositions des astéroïdes se répartissent au sein de la ceinture principale, entre Mars et Jupiter, car celles-ci contiennent la trace des événements dynamiques du passé et, en particulier, celle des migrations planétaires durant lesquelles les orbites des planètes ont changé. À cet effet, la connaissance des météorites est un moyen d'investigation extraordinaire. Ces morceaux d'astéroïdes tombés sur la Terre nous offrent en effet la possibilité d'étudier dans le dé-

tail leur composition (de quels minéraux sont-ils faits? ont-ils été en présence d'eau?) et leur histoire thermique (quelle fut leur température maximale? en combien de temps ont-ils refroidi?). Ces informations constituent de précieux indices pour comprendre la chronologie de la formation des premiers solides au tout début du Système solaire, il y a 4,5 milliards d'années. Ainsi, cartographier la répartition de ces compositions dans le Système solaire est la clef pour comprendre comment les planètes, et en particulier la Terre, se sont formées.

L'ESSENTIEL

Les astéroïdes sont parmi les derniers vestiges des blocs qui se sont agglomérés au cours de la formation du Système solaire. L'étude de leurs propriétés est donc un atout majeur pour mieux comprendre celle-ci et cet article permet de faire le point sur les propriétés de ces petits corps et leur évolution dans la ceinture d'astéroïdes. La mesure de la lumière réfléchie par les astéroïdes est une de ces méthodes. Un moyen d'investigation puissant pour comprendre les orbites et les compositions des astéroïdes de la ceinture principale est de comparer ces propriétés avec celles des météorites; plus précisément, la comparaison se fait avec des astéroïdes géocroiseurs, qui sont en fait des astéroïdes éjectés de la ceinture principale par des effets de résonance dynamique. La conclusion de l'auteur est que « nous sommes aujourd'hui à l'aube de l'étude des propriétés physiques des astéroïdes ». Le prix Jeune Chercheur de la Société française d'astronomie et d'astrophysique a été décerné en 2017 à l'auteur, Benoît Carry, pour ses travaux sur les astéroïdes.

L'USURE DU TEMPS

Néanmoins, si la composition chimique des astéroïdes n'évolue pas avec le temps, la ceinture principale d'astéroïdes n'est plus aujourd'hui telle qu'elle était il y a 4 milliards d'années. Tout d'abord, les destructions des astéroïdes lors de leurs collisions mutuelles affectent progressivement la ceinture. Les groupes de corps plus petits formés constituent des familles. Par ailleurs, les orbites de tous ces corps évoluent très lentement sous l'action d'une force non gravitationnelle appelée effet Yarkovsky (encadré 1, p. 19) qui dépend principalement de leur taille, leur orientation et leur forme.

Deux effets combinés sont à l'origine des météorites. Une collision entre deux astéroïdes produit de nombreux fragments, soit par excavation lors de la formation d'un cratère, soit par destruction mutuelle. Les orbites de tous ces fragments, au départ très similaires, vont petit à petit se distancer sous l'action de l'effet Yarkovsky, et ce d'autant plus que les corps sont petits, jusqu'à rencontrer une résonance (encadré 2, p. 21) qui va très rapidement augmenter l'excentricité de leur orbite et les placer sur une trajectoire de collision avec une planète ou le Soleil.

Les météorites présentent donc une vue partielle des compositions d'astéroïdes et non un recensement exhaustif. Seules les familles proches de résonances contribuent actuellement au flux de météorites. Les types de météorites retrouvés dans différentes couches de sédiments (correspondant à des âges géologiques très différents) ne sont d'ailleurs

pas les mêmes, montrant comment ce flux de météorites évolue avec le temps. Cela indique également que la distribution initiale en dimensions et en compositions des objets de la ceinture principale a été modifiée par 4 milliards d'années d'évolution en raison des collisions et dérives de type Yarkovsky. Or, comme la résistance aux chocs et l'effet Yarkovsky dépendent de la composition, cette évolution est différente pour chaque type d'astéroïdes. Pour remonter aux lieux et instants de formation de ces corps, au portrait du jeune Système solaire, il ne suffit donc pas d'étudier les orbites des astéroïdes et leur composition, mais il faut également étudier leurs caractéristiques physiques.

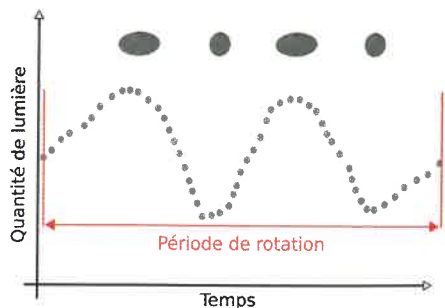
LA DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES ASTÉROÏDES

Les petits corps portent ce nom car ils sont petits physiquement. Le plus grand d'entre eux, Cérès, mesure en effet 950 km de diamètre, et seule une centaine d'entre eux mesurent plus de 100 km, pour une population estimée à plusieurs millions d'individus. De plus, la ceinture principale se trouve loin de nous, de 1 à 3 unités astronomiques (UA), soit de 150 à 450 millions de kilomètres. Les petits corps sont donc vus sous un angle très petit! Ils apparaissent comme de simples points à moins d'utiliser la pointe de la technologie comme le *Hubble Space Telescope*, les télescopes de 8-10 m au sol équipés d'optique adaptative (comme le VLT de l'Eso, au Chili, W. M. Keck à Hawaï), ou des missions spatiales de rendez-vous (*Rosetta*

de l'Esa, *Dawn* de la Nasa, *Hayabusa 2* de la Jaxa pour citer quelques exemples récents). Ces moyens d'observation étant coûteux ou peu disponibles, les astronomes utilisent des techniques alternatives spécifiques pour étudier un grand nombre d'objets

● COURBES DE LUMIÈRE

Mesurer la quantité de lumière visible en provenance d'un astéroïde est possible avec des moyens modestes, incluant des télescopes de 20 à 50 cm de diamètre. Or, cette lumière provient de la lumière du Soleil réfléchie par la surface. Ainsi, la quantité de lumière est directement proportionnelle à la taille apparente de l'astéroïde: grande s'il présente un grand côté, petite dans le cas contraire. Il suffit donc de mesurer la quantité de lumière au cours du temps, appelée courbe de lumière. On détermine la période de rotation en identifiant quand la courbe se répète (figure 1).



1. Courbe de lumière. La quantité de lumière dépend de la taille apparente de l'astéroïde et la période se mesure en étudiant la répétitivité du signal.

Comme la forme de la courbe de lumière provient de l'évolution de la forme 3D de l'astéroïde projetée sur le plan du ciel au cours du temps, il est possible de déterminer la direction de son axe de rotation et sa forme 3D (bien que grossièrement et sans information de taille) en étudiant la forme des courbes de lumière prises dans différentes configurations Soleil-Terre-astéroïde (figure 2). Pour schématiser, l'amplitude de la courbe de lumière sera maximale si on observe l'astéroïde par son équateur et minimale si on l'observe par son pôle, et sa forme sera d'autant moins régulière que l'astéroïde est patatoïdal.

Cette méthode est simple et fournit de très bons résultats, mais requiert la prise de nombreuses courbes de lumière à plusieurs mois/années d'intervalle. Ce besoin gourmand de données, couplé avec le besoin « modeste » de taille de télescope, a permis aux astronomes amateurs de jouer un rôle majeur dans ce domaine depuis vingt ans.

Le principal défaut des courbes de lumière est de ne fournir ni de mesure directe de la forme 3D ni d'information sur la taille. L'observation de l'occultation d'une étoile par un astéroïde permet de répondre à ce problème. Lorsqu'un astéroïde passe entre la Terre et une étoile, il projette son ombre sur la Terre de la même manière que la Lune lors d'une éclipse de Soleil (bien qu'à l'œil l'effet soit imperceptible, à moins que l'étoile soit très brillante). Un observateur placé sur le trajet de l'ombre peut chronométrer le temps de disparition de l'étoile, ce qui fournit la taille de l'ombre (en kilomètres) puisque la vitesse de l'astéroïde est connue grâce à son orbite.

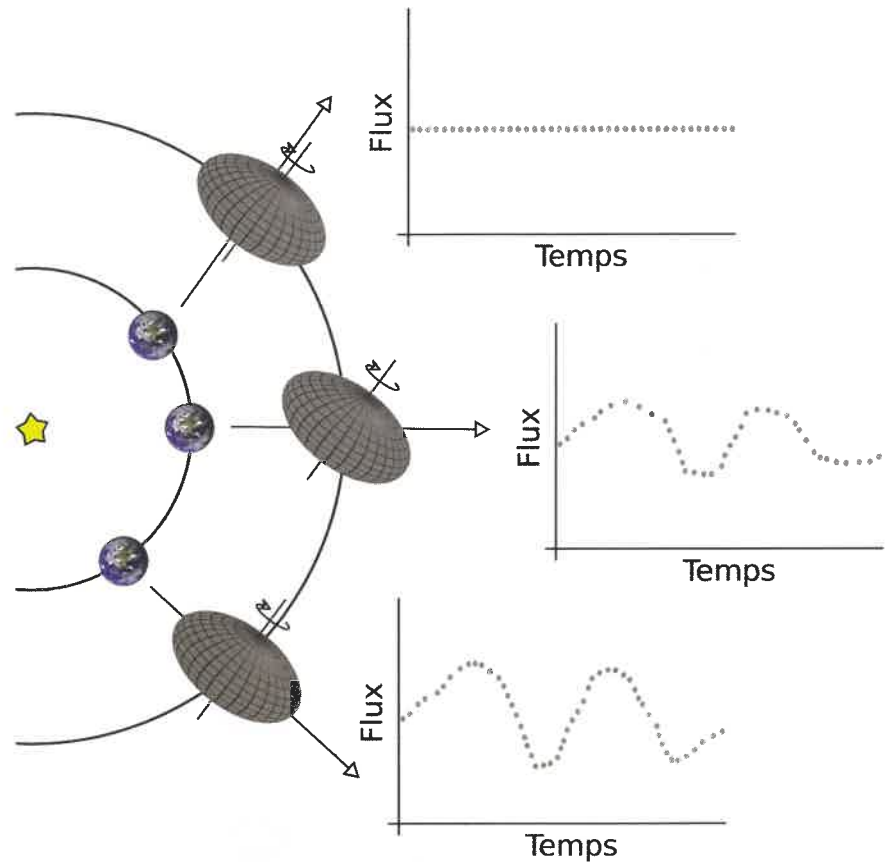
Si plusieurs observateurs se placent sur le trajet de l'ombre, chacun va en mesurer un segment. L'ensemble de ces segments reportés sur un graphe dessine la silhouette de l'astéroïde sur le ciel à l'instantané direct de sa taille et de sa forme. Cette technique est remarquable puisqu'elle permet de mesurer la taille d'astéroïdes très petits avec des moyens modestes (jusqu'à de simples objectifs photographiques) et que le résultat de l'observation dépend de l'étoile occultée et non de l'astéroïde. En revanche, un astéroïde spécifique n'occulte que rarement une étoile brillante, et il faut parfois attendre des années pour que se produise un tel événement pour un astéroïde en particulier.

● ÉCHOS RADAR

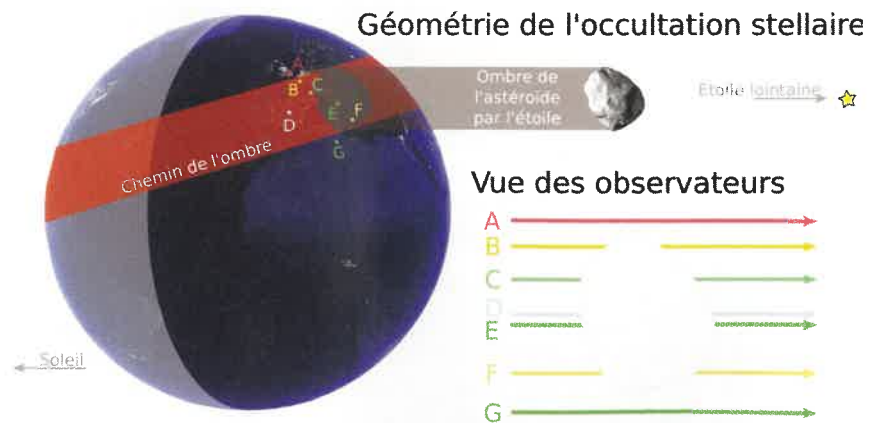
Les échos radar (c'est-à-dire de lumière de longueur d'onde centimétrique) sont un des rares cas d'expérience « active » en astronomie, où généralement on se contente de recevoir la lumière émise par les corps. Le principe est le suivant : un radiotélescope émet une onde lumineuse (centimé-

trique, donc invisible à l'œil) vers l'astéroïde. Celle-ci va être réfléchiée par la surface, revenir sur Terre et être mesurée par un radiotélescope (qui peut être le même).

Le temps d'aller-retour de la lumière est évidemment déterminé par la distance de l'astéroïde. Mais, de manière plus fine, comme chaque portion de sur-



2. En étudiant la forme des courbes de lumière sous diverses géométries Soleil-Terre-astéroïde, on peut déterminer son orientation et sa forme 3D.



3. Principe des occultations stellaires : les observateurs B à F enregistrent le temps de disparition de l'étoile due au passage de l'astéroïde, mais pas A et G, situés hors de l'ombre (pas d'occultation). Ces mesures permettent de reconstruire la forme de l'astéroïde sur le ciel.

face de l'astéroïde se trouve à une distance différente, le signal émis aura plusieurs échos décalés dans le temps. De plus, comme l'astéroïde tourne sur lui-même, la longueur d'onde de chacun de ces échos sera modifiée par effet Doppler (tout comme le son d'une voiture s'approchant est plus aigu et celui d'une voiture s'éloignant est plus grave). Regarder comment ces échos se répartissent en fonction du délai (temps) et de la fréquence (Doppler) revient à regarder l'astéroïde depuis son pôle Nord (figure 4), avec la particularité que le signal provient des deux hémisphères (Nord et Sud) : il ne s'agit donc pas d'une simple « photo ».

La taille et la vitesse de rotation se déduisent directement de l'étendue de l'écho sur ces « images », et en combinant plusieurs d'entre elles, on peut reconstruire la forme 3D de l'astéroïde.

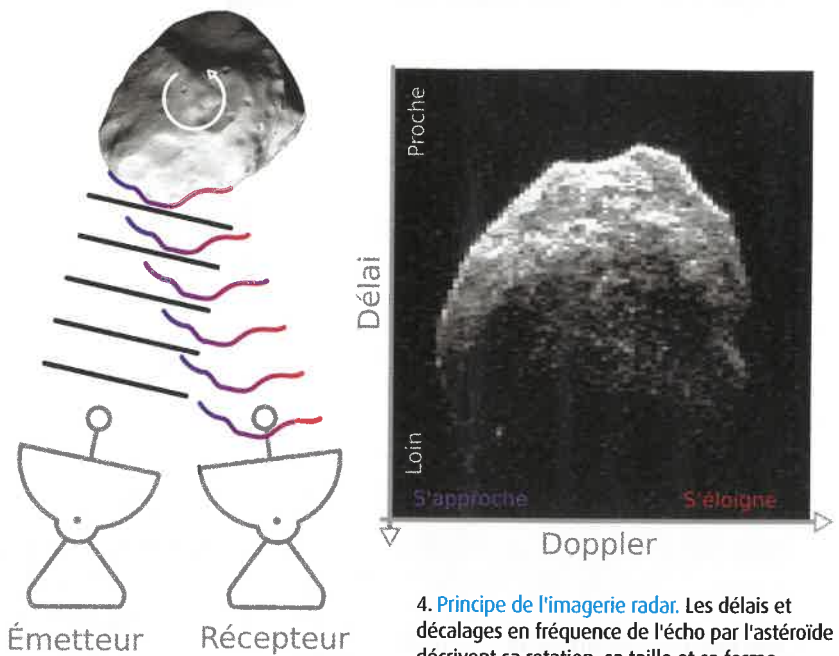
● FLUX THERMIQUE

Il est impossible d'estimer la taille d'un astéroïde en l'observant dans le visible : la quantité de lumière qu'il renvoie est en effet égale au produit de sa taille apparente par

son albédo (sa capacité à réfléchir la lumière). Ainsi, un gros astéroïde sombre apparaît aussi lumineux qu'un petit clair.

Dans l'infrarouge (autour de 10-20 microns), le flux que nous percevons des astéroïdes provient avant tout de leur émission dite de corps noir (liée à leur température) et ce flux est directement lié à

leur taille apparente (figure 5, p. 20). Cette technique est utilisée depuis les années 1970 pour mesurer des diamètres d'astéroïdes, mais c'est avec la mission *Wise* de la Nasa qui a observé toute la sphère céleste en 2010, incluant plus de 150 000 astéroïdes, qu'elle est devenue la principale source de diamètres d'astéroïdes.



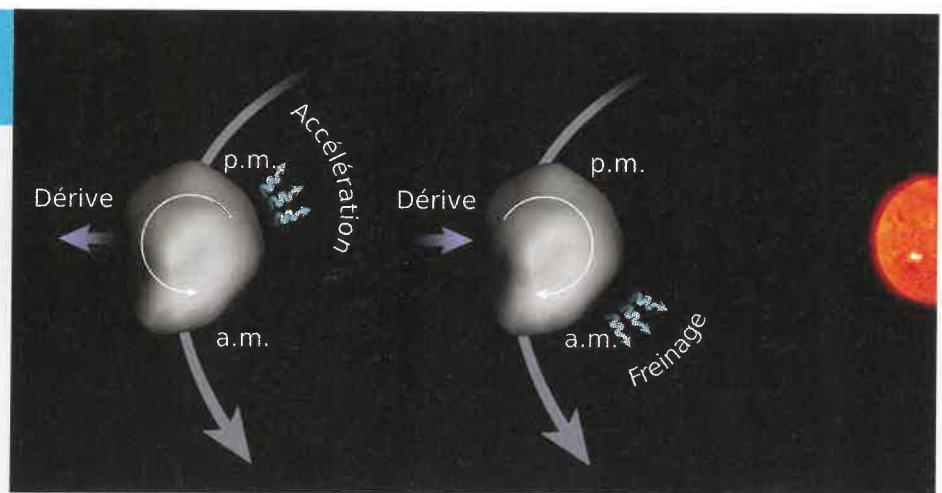
4. Principe de l'imagerie radar. Les délais et décalages en fréquence de l'écho par l'astéroïde décrivent sa rotation, sa taille et sa forme.

1. L'EFFET YARKOVSKY

Cet effet décrit l'évolution de l'orbite des astéroïdes due à leur émission thermique différée. Le principe en est simple mais subtil et fut énoncé par Ivan Yarkovsky à la fin du XIX^e siècle.

Tout comme sur Terre, le Soleil chauffe la surface de l'astéroïde au cours de la journée. Comme les matériaux résistent au changement de température (on parle d'inertie thermique), la température maximale n'est pas atteinte à midi pile mais un peu après. Or, la température est à l'origine du rayonnement de corps noir (qui est à l'origine du rayonnement des étoiles et qu'on peut voir sur nous-même avec une caméra infrarouge) qui sera donc maximum dans l'après-midi.

Il y a donc un angle entre la direction dans laquelle l'astéroïde reçoit les photons en provenance du Soleil et celle dans laquelle il émet son rayonnement de corps noir maximum (fi-

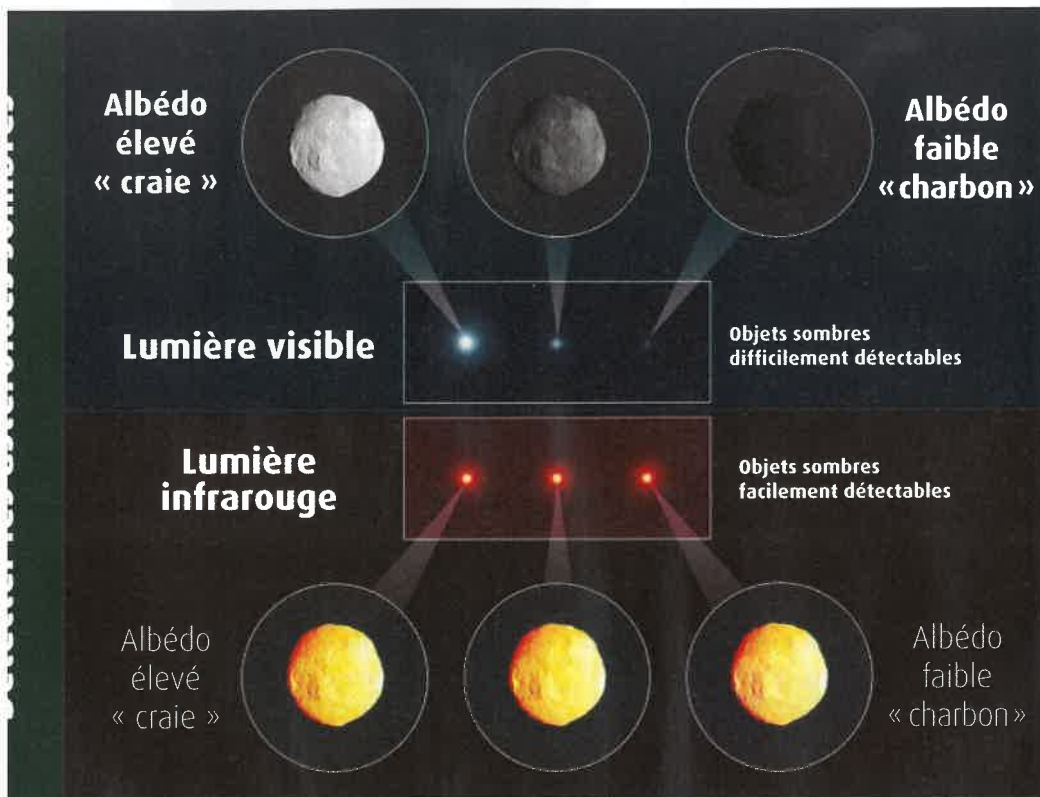


A. L'effet Yarkovsky décrivant l'émission thermique différée du rayonnement solaire incident. Suivant le sens de rotation de l'astéroïde (indiqué en blanc), l'effet de l'émission thermique va aller dans le sens ou contre le mouvement orbital (indiqué en gris), augmentant ou diminuant le demi-grand axe de l'orbite.

gure A). Comme les photons transportent une quantité de mouvement (bien qu'extrêmement petite), l'effet résultant est une très faible accélération, qui va très lentement changer le demi-grand axe de l'orbite de l'asté-

roïde. Cet effet est très faible et se fera sentir d'autant plus que l'astéroïde est peu massif. Comme indiqué sur la figure, l'effet va diminuer ou augmenter le demi-grand axe, suivant l'orientation de l'astéroïde (prograde ou rétrograde).

L'effet Yarkovsky dépend également de sa vitesse de rotation, de sa forme 3D, de sa capacité à absorber/réfléchir la lumière, etc. On regroupe souvent tous ces paramètres, ni dynamiques ni compositionnels, sous le terme de propriétés physiques.



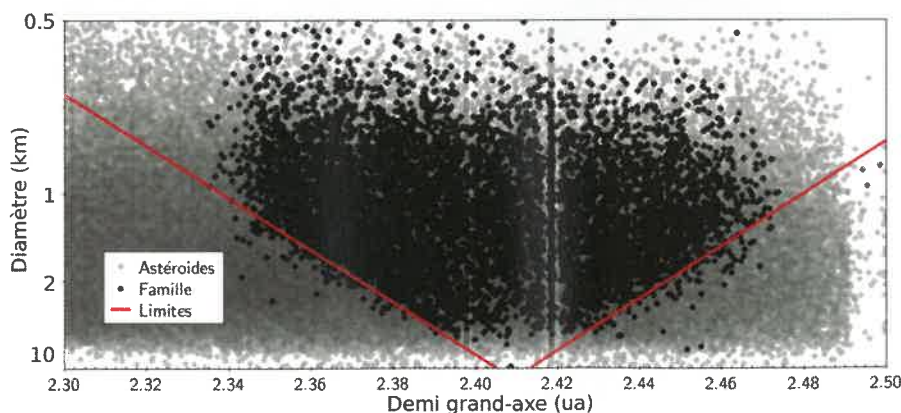
5. L'intérêt de l'observation des astéroïdes dans l'infrarouge (en bas) par rapport au visible (en haut) pour déterminer leur diamètre. (NASA/JPL-Caltech)

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉTÉORITES

Les familles dynamiques d'astéroïdes ont été découvertes par Hirayama en 1918. Alors qu'il en compta cinq, on dénombre actuellement plus de 100 de ces familles, et environ un astéroïde sur trois appartient à l'une d'entre elles. Autrefois de simples curiosités consistant en une concentration d'orbites proches d'astéroïdes (figure B, encadré 2), on sait

maintenant qu'elles jouent un rôle particulier dans l'évolution de la population d'astéroïdes.

Toutes les familles d'astéroïdes partagent une caractéristique remarquable: plus les objets sont petits, plus ils sont éloignés du centre de la famille (figure 6). Cette particularité est la marque de l'effet Yarkovsky; en effet, lors de la création de la famille par collisions, tous les fragments ont une orbite similaire autour du Soleil.



6. Distribution des membres de la famille de Massalia (en noir) par rapport aux astéroïdes environnants (gris). Les corps les plus petits sont plus éloignés du centre de la famille (à 2,41 UA) que les gros. Cette forme en V est caractéristique des familles.

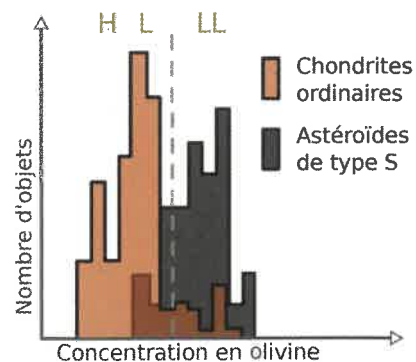
Avec le temps, l'effet Yarkovsky va lentement diminuer ou augmenter le demi-grand axe des orbites (suivant l'orientation des corps), et ce d'autant plus que ceux-ci sont petits. L'ouverture de la forme en « V » permet ainsi de dater la famille: plus le V est ouvert, plus la famille est ancienne.

Cette évolution dynamique par effet Yarkovsky, dépendante des propriétés physiques et en particulier du diamètre et de l'orientation des astéroïdes, explique plusieurs observations qui posèrent de sérieuses questions aux astronomes.

● LA PLUPART DES GÉOCROISEURS SONT RÉTROGRADES

Lorsque l'orientation d'un grand nombre d'astéroïdes géocroiseurs fut mesurée (par courbes de lumière et échos radar), on vit avec surprise que la plupart étaient rétrogrades, alors qu'a priori on attendait une répartition aléatoire.

Cela est maintenant compris et nous renseigne sur l'origine de ces corps. Puisque les géocroiseurs sont, à l'origine, des astéroïdes de la ceinture principale éjectés par une résonance (encadré 2), leur sens de rotation est une empreinte de leur chemin dynamique. Suivant leur orientation, l'effet Yarkovsky va les faire migrer vers le Soleil (cas rétrograde) ou les éloigner (cas prograde). La forte dominance de géocroiseurs rétrogrades est une confirmation que la résonance ν_6 (voir encadré 2) est la plus efficace pour injecter des corps de la ceinture principale sur une orbite croisant celles des planètes.



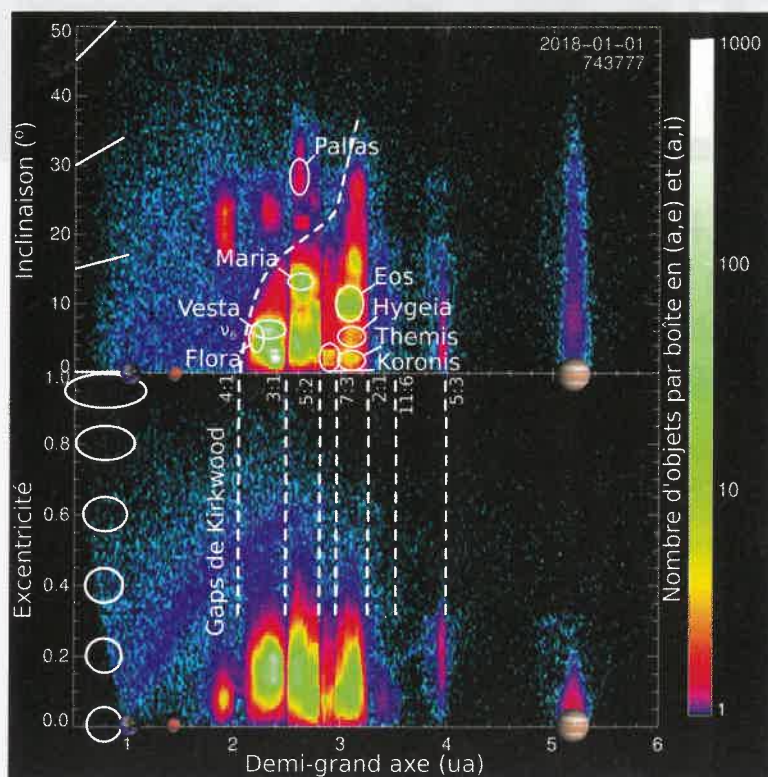
7. Répartition des chondrites ordinaires (en marron) et des astéroïdes de type S qui y sont liés (en noir) en fonction de leur concentration en olivine. La plupart des chondrites ordinaires sont de types H et L, alors que la plupart des géocroiseurs de type S sont semblables aux chondrites ordinaires LL. (adaptée de Vernazza et al. (2008))

2. LES RÉSONANCES

La répartition des orbites des astéroïdes présente des régions vides, appelées « gaps de Kirkwood ».

Ces gaps spectaculaires (figure B) ont été découverts en 1866 par l'astronome américain Daniel Kirkwood. Ils correspondent à des orbites fortement perturbées par les planètes géantes, comme celles dont les périodes orbitales sont commensurables. Ainsi, un objet situé dans la résonance 2:1 avec Jupiter ferait exactement deux révolutions autour du Soleil pendant que Jupiter en effectuerait une seule. Dans cet exemple, la même configuration Soleil-astéroïde-Jupiter va se répéter tous les deux tours. La répétition de cette configuration va donner une direction privilégiée à l'attraction de Jupiter sur l'astéroïde et va progressivement augmenter l'excentricité de son orbite. Quand celle-ci devient trop importante, une rencontre proche avec Mars ou Jupiter est inévitable et change dramatiquement l'orbite, plaçant l'astéroïde sur une trajectoire de collision avec une planète ou le Soleil, le transformant en météorite.

Parmi toutes ces résonances, la 3:1 avec Jupiter et surtout la résonance appelée ν_6 (nu 6) avec Saturne qui limite le bord intérieur de la ceinture principale sont les plus efficaces pour injecter des objets depuis la ceinture d'astéroïdes dans l'espace des géocroiseurs.



B. La distribution orbitale des astéroïdes au sein de la ceinture principale en fonction de l'inclinaison de leur orbite (haut, représentée par les lignes obliques) et de leur excentricité (bas, illustrée par les ellipses). Les zones « vides » d'astéroïdes sont dues aux résonances avec les planètes géantes et sont appelées gaps de Kirkwood. Les familles d'astéroïdes les plus importantes sont indiquées.

● LES GÉOCROISEURS ET LES MÉTÉORITES ONT DES COMPOSITIONS DIFFÉRENTES!

Environ 80 % des météorites tombant sur Terre sont du même type: des chondrites ordinaires. Ce sont des assemblages d'olivine et de pyroxène (minéraux courants du manteau et de la croûte terrestre), qu'on sous-divise en trois catégories (H, L et LL) suivant leur teneur en fer (jusqu'à 25 % du poids). Ces météorites sont associées aux astéroïdes dits S (c'est leur type spectral). Or, la répartition des chondrites ordinaires en H, L et LL ne correspond pas du tout à ce que l'on observe pour les astéroïdes géocroiseurs de type S (figure 7)! Comment expliquer ce paradoxe alors que les géocroiseurs sont les progéniteurs des météorites?

Ici et à nouveau, c'est l'effet Yarkovsky et, en particulier, sa relation avec le diamètre des corps qui se cachent derrière le rideau. Les géocroiseurs et les météorites proviennent de la ceinture principale d'astéroïdes, de familles d'astéroïdes. Néanmoins, la taille typique des géocroiseurs que nous observons va de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, alors que celles des météorites est de quelques mètres avant l'entrée dans l'atmosphère (heureusement pour nous si nous voulons éviter de finir comme les dinosaures!).

Comme l'effet Yarkovsky dépend du diamètre, après une collision les petits fragments sont rapidement « poussés » dans une résonance et deviennent des géocroiseurs et des météorites. Les fragments plus grands tardent plus à être placés dans une résonance. Ainsi, les météorites proviennent généralement de collisions plus récentes que les géocroiseurs, plus gros. Cela signifie que les météorites associées aux géocroiseurs kilométriques actuels sont déjà tombées sur Terre il y a bien longtemps!

EN GUISE DE CONCLUSION

Nous sommes aujourd'hui à l'aube de l'étude des caractéristiques physiques des astéroïdes, avec une petite fraction de la population étudiée (quelques centaines ou milliers d'astéroïdes sur les 800 000 connus). Néanmoins, ces caractéristiques (diamètre, orientation, période de rotation) dictent l'évolution dynamique de ces corps, et sont *in fine* responsables des chutes de météorites sur Terre!

Si leur empreinte statistique est claire (répartition orbitale des astéroïdes dans les familles, orientation des géocroiseurs...), il reste extrêmement ardu de mesurer ces caractéristiques et de détecter l'effet Yarkovsky sur des objets. La sonde *Gaia* de l'agence spatiale européenne (Esa) qui scanne le ciel depuis 2014 devrait permettre une révolution dans ce domaine, avec des mesures de positions permettant la détection de l'effet Yarkovsky sur des dizaines d'objets, et la détermination de la période de rotation et de l'orientation de quelque 300 000 astéroïdes. ■