

Les géocroiseurs, ces astéroïdes et comètes qui croisent l'orbite de la Terre, Philippe Garnier

Le 15 février 2013, à Tcheliabinsk en Russie centrale, un météore de dix-neuf mètres de diamètre, pesant plus de 10 000 tonnes, entraînait dans l'atmosphère à environ 70 000 km/h. Il se désintégrait instantanément. Il provoquait alors une énorme onde de choc jusqu'à 90 kilomètres à la ronde, pro-



La trainée du bolide dans le ciel de Tcheliabinsk

Photographie : lenta.ru

voquant d'importants dégâts, projetant les gens au sol et faisant exploser les vitres. On retrouva par la suite des fragments éparpillés du bolide, notamment un bloc de 600 kilogrammes au fond du lac Tchekbarkoul.

Après l'étude de sa trajectoire avant impact et l'analyse des fragments recueillis, les astrophysiciens attribuèrent son ori-



Le fragment retrouvé au fond du lac de Tchekbarkoul

Photographie : Andrey Yarrantsev, in Popova et al., 2013

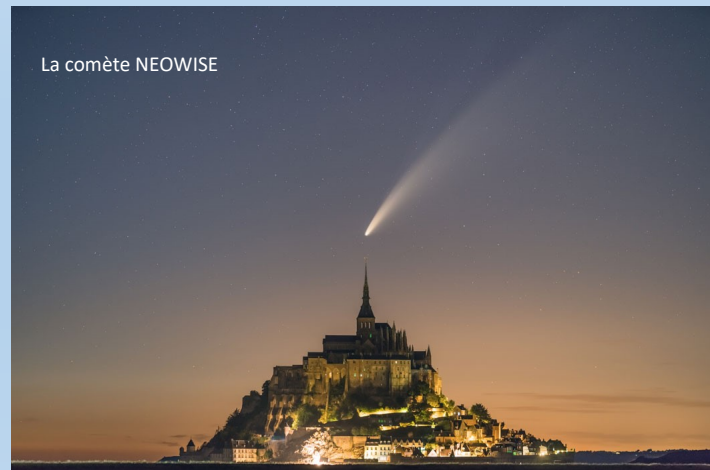
gine à un corps parent, un astéroïde de 2 kilomètres de diamètre, 1999 NC43. Cet astéroïde aurait lui-même été percuté il y a 2000 ans et aurait éjecté le météore qui atteignit la Terre le 15 février 2013.

Cet astéroïde 1999 NC43 est d'ailleurs considéré comme un objet potentiellement dangereux pouvant croiser l'orbite terrestre et entrer en collision avec notre planète. Les calculs astronomiques montrent que cet astéroïde s'approchera à seulement 5 millions de kilomètres de la Terre le 14 février 2173, soit exactement 160 ans après le météore de Tcheliabinsk.

Ces objets de l'espace qui croisent l'orbite de la Terre sont des « **objets géocroiseurs** ». Ceux qui présentent un risque de collision avec la Terre sont naturellement qualifiés d'« **objets potentiellement dangereux** ».

En juillet 2020 la comète NEOWISE assurait le spectacle dans le ciel

nocturne. Passant à seulement 103 millions de kilomètres de la Terre, soit les deux tiers de notre distance au soleil, elle était particulièrement lumineuse et visible à l'œil nu. Etant fortement réchauffée par son passage près du soleil, elle « dégageait » très acti-



La comète NEOWISE

vement, avec une chevelure étendue sur plus de 20 millions de kilomètres. Belle comète dont la taille du noyau a été estimée à 5 kilomètres, se déplaçant à la vitesse de 248 000 km/h. Elle n'avait été découverte que fin mars 2020, seulement quatre mois auparavant par le télescope spatial NEOWISE qui lui a donné son nom.

Cependant, bien que passant à l'intérieur du système solaire, NEOWISE n'était pas classée dans les « géocroiseurs » car son orbite ne l'amènera jamais à croiser la Terre de près. Seul un très petit nombre de comètes sont aujourd'hui repérées comme géocroiseurs.

D'où viennent les géocroiseurs ?

Pour comprendre l'origine des géocroiseurs il faut remonter aux origines du système solaire il y a 4,6 milliards d'années. Celui-ci s'est formé au sein d'un immense nuage de gaz, essentiellement composé d'hydrogène sous forme atomique, d'hélium en faible proportion, et de matériaux solides sous forme de poussières. Celles-ci étaient issues de l'explosion d'étoiles plus anciennes et parvenues en fin de vie, dispersées au sein du nuage de gaz.

A noter que la glace d'eau constituait une part importante de ces matériaux solides.

Une partie de ce vaste nuage de gaz s'effondra sur lui-même, sous l'effet de la gravité, prenant la forme d'un disque et concentrant en son centre suffisamment de gaz pour former la proto-étoile qui deviendrait ensuite notre Soleil. En se formant le disque entraînait en rotation pour conserver l'énergie cinétique générée par l'effondrement gravitationnel. Au sein de ce disque en rotation irrégulière les grains de poussière entraient en collision, s'aggloméraient pour former de petits corps solides : les planétésimaux.

Ces éléments entraient en collision à leur tour et se concentraient pour amorcer les planètes. Ensuite les planètes, poursuivant leur rotation autour du centre du système, « faisaient le ménage » sur leur trajectoire en attirant par gravité tous les planétésimaux se trouvant à proximité. Parallèlement le nuage d'hydrogène

continuait à se comprimer au centre du système, sa température augmentait considérablement jusqu'à enclencher la fusion nucléaire de son énorme masse d'hydrogène. Le soleil était né, le système solaire était alors formé.

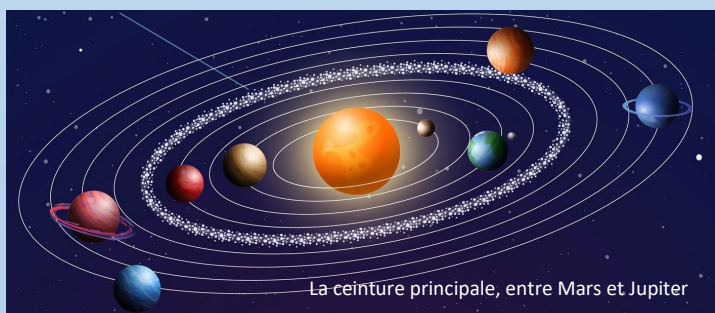
Cependant, dans ce processus une grande quantité de planétésimaux ne furent pas agglomérés. Ils restèrent isolés dans le système solaire. Peu denses ils se sont par la suite le plus souvent fragmentés. Mais ils ont conservé la composition qu'ils avaient aux origines du système solaire. Les astéroïdes et comètes d'aujourd'hui sont les restes des planétésimaux des débuts du système solaire.

D'autre part, sous les différents effets gravitationnels liés au soleil et aux mouvements des planètes, ils se sont positionnés dans trois zones très différentes du système solaire.

La plus proche de ces trois zones se situe entre les orbites de Mars et de Jupiter. Il s'agit de la ceinture principale d'astéroïdes. Il s'agit principalement d'astéroïdes rocheux. La ceinture principale con-



tiendrait des centaines de milliers d'objets de plus d'un kilomètre de diamètre. Selon le modèle de formation des planètes ces objets auraient dû s'agglomérer pour former une planète entre Mars et Jupiter. Mais la gravité exercée par la très massive Jupiter aurait perturbé ce processus d'agglomération et empêché la formation d'une planète dans son voisinage.



La seconde zone se situe au-delà de l'orbite de Neptune, entre 30 et 55 UA du Soleil (1 UA, pour Unité Astronomique, est égale à la distance de la Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres). Il s'agit de la ceinture de Kuiper, qui contient ainsi les objets transneptuniens. Le plus connu de ces objets est Pluton. Les objets évoluant dans la ceinture de Kuiper sont principalement formés de glaces : glaces d'eau, glaces de méthane, glaces d'ammoniac, etc.

Elle contiendrait plus de 70 000 objets de plus de 100 kilomètres de diamètre.

La troisième zone s'appelle le Nuage de Oort, elle est extrêmement éloignée et étendue, de 1000 à 100 000 UA. Les objets qu'il contient sont encore davantage des glaces à l'origine de la formation des comètes. Le nuage de Oort pourrait contenir des milliers de milliards de noyaux de comète.

A la suite de chocs, de fragmentations ou de perturbations gravitationnelles, ainsi que sous l'effet Yarkowski évoqué plus loin, les objets situés dans ces zones, astéroïdes ou noyaux cométaires, peuvent quitter leur orbite initiale et pénétrer vers l'intérieur du système solaire. Ils peuvent alors se placer sur des orbites qui croisent régulièrement l'orbite Terrestre. Ils deviennent alors les « objets géocroiseurs », ces objets qui survoleront un jour, de très près ou de très loin, l'Humanité.

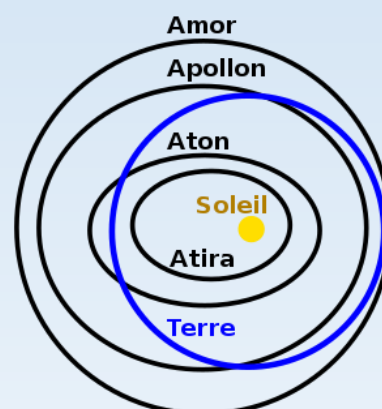
Les objets géocroiseurs sont des astéroïdes ou des comètes dont la trajectoire vient croiser l'orbite de la Terre. Certains d'entre eux présentent un risque de collision avec la Terre.

Les orbites des géocroiseurs

Grace aux grands télescopes ainsi qu'aux performances des ordinateurs, les astrophysiciens sont aujourd'hui capables de relever les trajectoires des astéroïdes et comètes, puis de caractériser leurs orbites autour du soleil. Deux grands programmes développés par l'Agence Spatiale Européenne et la NASA aux USA sont dédiés à l'observation et la caractérisation de ces objets :

- Pour l'ESA: le programme "Near-earth objects coordination center" (NEOCC)
- Pour la NASA: le programme « Asteroid and Comet Watch »

Grace à ces programmes il est possible de classer les astéroïdes selon leur classe d'orbite et d'évaluer le risque d'un



croisement avec la Terre. Il existe ainsi quatre classes d'orbite pour ces objets, dont deux classes de géocroiseurs qui coupent l'orbite de la Terre. Ce sont les classes Apollon et Aton, du nom des deux premiers astéroïdes découverts dans ces classes d'orbite.

Les Apollon, presque dix fois plus nombreux que les Aton, présentent une orbite elliptique plus large que l'orbite de la Terre, avec une excentricité parfois élevée qui les emmènent loin du Soleil avant de revenir vers la Terre. Par exemple l'astéroïde Icare, de classe Apollon s'éloigne du Soleil jusqu'à 2 UA, avant de s'en rapprocher jusqu'à 0,2 UA. Les Aton ont au contraire une

orbite plus étroite que l'orbite terrestre.

En novembre 2021 le bulletin d'information du programme NEOCC rapportait les chiffres suivants :

- Géocroiseurs identifiés: 27 566 astéroïdes et 117 comètes
- Géocroiseurs à risque: 1278
- Nombre de géocroiseurs identifiés dans le mois de novembre 2021: 377
- Nombre de géocroiseurs identifiés depuis le 1^{er} janvier 2021: 2874

Ces chiffres montrent bien la dynamique de ces programmes avec un nombre de découvertes qui augmente très régulièrement. Pourtant, malgré l'efficacité des méthodes d'identification des géocroiseurs, il reste encore pour longtemps des objets qui passeront à proximité de la Terre sans avoir été repérés auparavant. Selon la NASA, seuls environ 40% des astéroïdes d'un diamètre supérieur à 140 mètres ont été découverts à ce jour.

Ainsi le même bulletin du NEOCC relevait le passage d'un astéroïde le 1^{er} novembre 2021 « 2021 VH est un astéroïde de type Aton d'un diamètre de 3 à 7 mètres. Il a été observé pour la première fois à ATLAS-MLO, Mauna Loa (Hawaï) le 2 novembre. Il s'est approché de près le 1 novembre, à une distance de 0.00020au (29.000 km) de la Terre. Nous l'avons observé lorsqu'il était visible à une magnitude de 19,0 se déplaçant à 5"/min à travers la constellation des Poissons. »

A cette distance de seulement 29000 kilomètres, 2021 VH, qui n'a donc été détecté qu'après son passage au plus près de la Terre, a été classé en 37^{ème} position des géocroiseurs étant passés au plus proche depuis 1900.

Le 15 avril 2018 l'astéroïde géocroiseur 2018 GE3 est passé à 193000 kilomètres de la Terre, seulement 21 heures après avoir été détecté par un observatoire de l'Arizona aux USA. D'un diamètre estimé de 50 à 100 mètres, six fois plus gros que le bolide de Tcheliabinsk, lancé à une vitesse supérieure à 100000 km/h, cet astéroïde de type Appolon pouvait présenter un sérieux risque à l'échelle régionale.

En remontant nettement plus loin dans le temps, des collisions avec des objets beaucoup plus massifs ont eu lieu.



Le 30 juin 1908 une énorme boule de feu parcourt le ciel de la Sibérie et explose à une altitude de quelques kilomètres, non loin de la rivière Toungouska. 60 millions d'arbres auraient été arrachés par cette explosion. La cause la plus probable en serait la désintégration d'un astéroïde ou d'un fragment de comète entrant dans l'atmosphère, dégazant sous l'effet de la chaleur intense, puis explosant.

Il y a 50 000 ans un météore ferreux s'abat sur ce qui est aujourd'hui l'Arizona. Son diamètre devait être d'environ 50 mètres.



Meteor Crater en Arizona

Le choc éjecta environ 175 000 tonnes de roches et creusa un cratère d'impact, le « Meteor Crater », d'un diamètre entre 1200 et 1400 mètres pour une profondeur de 190 mètres.

Il y a 65 millions d'années l'impact d'un objet d'une taille de plusieurs dizaines de kilomètres sur le territoire du Mexique actuel creusa le cratère de Chicxulub. La violence du choc déclencha des effets en cascade, changement climatique, disparition de la flore, qui pourraient expliquer la disparition des dinosaures. L'impacteur proviendrait de l'éclatement d'un astéroïde plus massif il y a 160 millions d'années. Il y a quatre milliards d'années environ une proto-planète nommée aujourd'hui Théia, de la taille de Mars, serait entrée en collision avec la Terre.



Théia heurte la Terre - Vue d'artiste

Sous ce choc planétaire une énorme quantité de matériaux aurait été éjectée dans l'espace. S'agglomérant ensuite, ces matériaux auraient formé notre Lune. Tel est aujourd'hui le scénario central pour expliquer la formation de notre Lune.

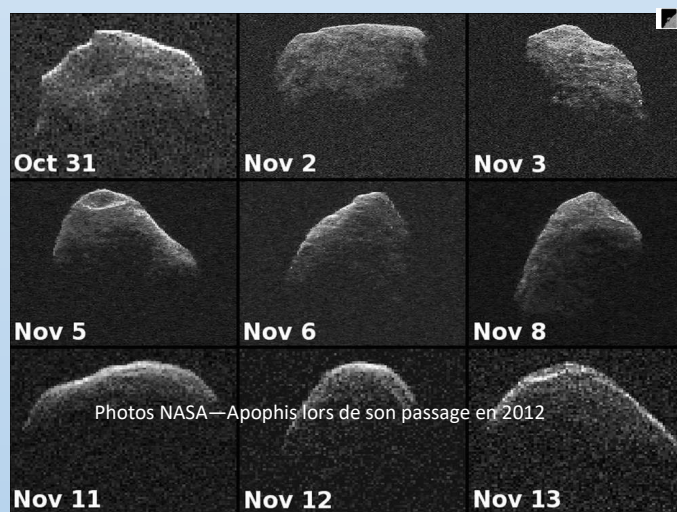
Pas de collision prévue dans un avenir proche !

À la question de savoir si nous avons un risque de collision imminent, dans les deux siècles à venir, la réponse est négative, avec les informations dont nous disposons aujourd'hui.

En effet dans le catalogue des géocroiseurs identifiés, avec les trajectoires actuellement connues, on ne connaît pas de géocroiseurs d'une taille appréciable qui viennent percuter la Terre. Quel soulagement!

Toutefois de nombreux géocroiseurs identifiés sont à risque, car si avec les paramètres actuels de leur trajectoire ils passent « à côté » de la Terre, il convient de surveiller si ces paramètres ne sont pas modifiés. Ils peuvent changer à l'occasion d'un choc entre astéroïdes ou d'une déviation gravitationnelle au voisinage d'une autre planète du système solaire. Ils peuvent aussi changer du fait de l'énergie reçue de la lumière du soleil. Par ailleurs on ne cesse de découvrir de nouveau géocroiseurs ...

Ainsi vendredi 13 avril 2029, nous croiserons à nouveau la route de l'astéroïde Apophis. D'un diamètre de 370 mètres et d'une masse d'environ 40 à 50 millions de tonnes cet astéroïde figure en bonne place parmi les objets à risque pour



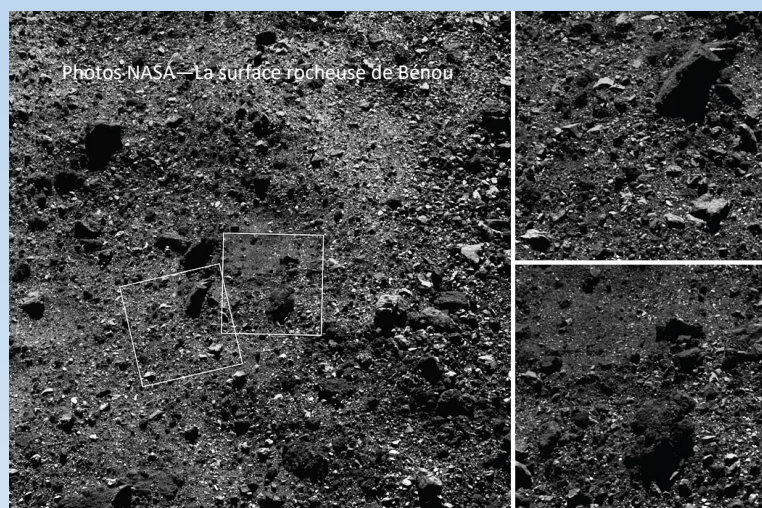
notre planète.

Lors de ce prochain rendez-vous le 13 avril 2029, il devrait passer à seulement 30 000 kilomètres de la Terre, plus près que nos satellites géostationnaires. Pour autant la NASA écarte le scénario d'une collision, avec une probabilité calculée inférieure à 1/250 000. Compte tenu de la date prévue, un vendredi 13, nul doute que les tenants d'une fin du monde proche auront cependant quelques raisons de s'inquiéter. Par la suite Apophis reviendra croiser la Terre en 2036, puis en 2068, à chaque fois sous le regard très attentif des programmes de surveillance.

L'objet connu aujourd'hui qui présente le plus grand risque de collision avec la Terre est l'astéroïde 1950 DA de type

Apollon. D'une masse estimée à plus de 2 milliards de tonnes pour un diamètre de 1300 mètres, il circule à la vitesse de l'ordre de 50 000 km/h. En mars 2001 il est passé à moins de 8 millions de kilomètres de la Terre. Le prochain rendez-vous avec la Terre est prévu le 13 mars 2880 ... Nous ne serons pas là pour le voir. La probabilité d'un impact n'est que de 0.3%. Le site de Futura Sciences évoque une « *probabilité d'un impact de 0.3%, mais, tombant dans le Pacifique Nord, il créerait des tsunamis qui dévasteraient l'Est des Etats Unis, avec des vagues de 120 mètres de hauteur sur la côte Est des Etats-Unis* »

Bénou, un autre astéroïde de type Apollon, passe à moins de 300 000 kilomètres de la Terre tous les six ans. La probabilité qu'il entre en collision avec la Terre est évaluée aujourd'hui à 1/2700 le 24 septembre 2182, puis de 1/1750 vers 2300. Ce n'est pas nul. Tout dépend des forces résultant de la lumière du soleil (effet Yarkovsky) qui, in fine, ajustent les paramètres de la trajectoire des astéroïdes.



Cependant grâce à la sonde spatiale OSIRIS-REx de la NASA envoyée sur Bénou en 2019/2020, nous savons que cet objet est de faible densité et qu'il devrait se désintégrer avant de percuter le sol. Nous attendons d'ailleurs avec impatience le retour sur Terre des échantillons que la sonde a prélevés en 2020 sur Bénou. Ce retour est prévu en septembre 2023.



Les programmes de défense contre les risques des géocroiseurs

Nul doute que les géocroiseurs présentent un risque d'accidents pour la Terre. Conscientes de ce risque nos institutions en Europe et aux Etats-Unis ont mis en place des

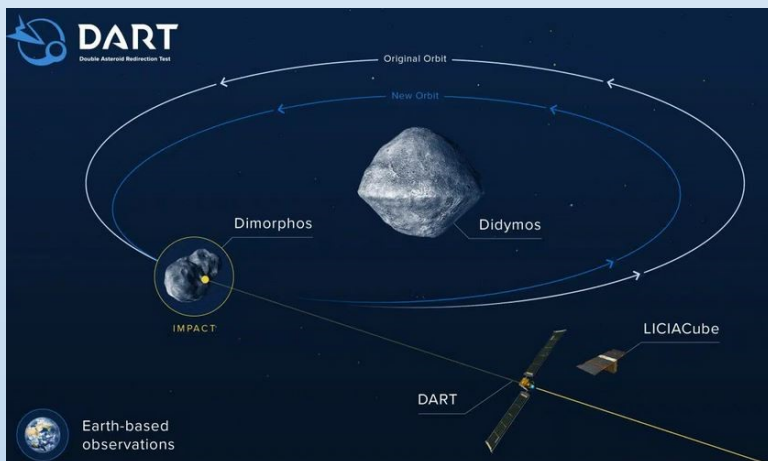
programmes non seulement pour préciser au mieux ces risques, mais aussi pour s'en défendre de façon active.

C'est ainsi que les deux programmes déjà cités, NEOCC et ACW, ont organisé le catalogage de tous les géocroiseurs, leur caractérisation complète à l'aide des grands observatoires. Mais au-delà que faire si un la trajectoire d'un géocroiseur venait clairement heurter la Terre ?

La piste est aujourd'hui de tenter de le dévier avant son impact avec la Terre.

La mission DART qui vient d'être lancée par la NASA vise à tester cette piste. Son objectif est de tester la possibilité de dévier la trajectoire naturelle d'un astéroïde en venant le percuter pour lui donner une petite impulsion.

Le 24 novembre 2021, la NASA a lancé dans l'espace une sonde à destination de l'astéroïde binaire Didymos/Dimorphos. Didymos est un astéroïde de type Apollon d'une taille de 800 mètres. Dimorphos est son satellite, comme la Lune autour de la Terre, mais seulement éloigné d'un kilomètre de Dimorphos ! Son diamètre n'est que de 150 mètres. Ce système croise régulièrement l'orbite de la Terre, avec un dernier passage en 2033.

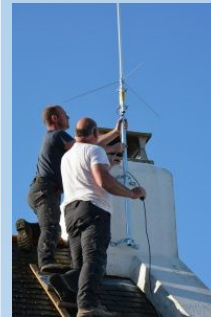


L'objectif de cette mission est de crasher la sonde sur sa cible, Dimorphos, bien qu'elle soit relativement petite. Il est aussi de voir si l'impact parvient à dévier le satellite Dimorphos de son orbite autour de Didymos. En revanche l'objectif n'est pas de dévier la trajectoire du barycentre de ce système autour de la Terre, ce qui pourrait la rapprocher de la Terre ...

Le crash de la sonde sur Dimorphos est prévu fin septembre 2022, alors que le double astéroïde se situera à 11 millions de kilomètres de la Terre. Il sera filmé par un petit satellite que la sonde larguera peu auparavant. D'autre part l'ESA lancera la mission HERA en 2024, à destination du même système afin d'observer sur place les conséquences de l'impact de DART. La mission HERA arrivera en 2028 sur site. Bel exemple de coopération entre agences spatiales et passionnante aventure à suivre par tous les amateurs d'astronomie !

L'AABI n'est pas en reste en ce qui concerne l'observation

des géocroiseurs. En effet l'AABI déploie en son sein, à Bangor, une station de surveillance du réseau FRIPON. Le réseau FRIPON (Fireball Recovery and Inter Planetary Observation Network) est un réseau national de surveillance du ciel, composé de 100 caméras vidéo et de 25 antennes radio pour voir et « écouter » les météores et en déterminer la vitesse.



Une antenne radio est installée sur le toit de la bibliothèque de l'AABI, qui « écoute » le ciel en permanence à l'affût des entrées de météores dans l'atmosphère. Les données sont enregistrées 24h/24 sur un ordinateur local et transmises en temps réel à un serveur de l'Observatoire des sciences de l'Université à Aix Marseille Université (OSU Institut Pythéas). C'est une petite pierre apportée à l'édifice, mais elle compte ! C'est aussi un bel exemple de science participative où les astronomes amateurs coopèrent avec les observatoires professionnels. C'est d'ailleurs un point fort de l'Astronomie où les amateurs jouent un très grand rôle auprès des professionnels.

Conclusion : face aux géocroiseurs restons vigilants !

Les géocroiseurs sont des objets venus de l'espace, astéroïdes ou comètes, dont l'orbite autour du soleil vient à croiser régulièrement l'orbite de la Terre. Leur masse va de quelques kilogrammes à des dizaines de milliers de tonnes. Dans le passé des collisions avec la Terre ont eu lieu, avec des conséquences régionales importantes et même des conséquences à l'échelle de la planète. Aujourd'hui l'humanité a la chance de pouvoir les identifier grâce aux grands télescopes pour les détecter, aux ordinateurs pour en prédire les trajectoires avec une très grande précision, aux missions spatiales pour aller les observer de près.

Dans les deux siècles à venir, les astrophysiciens, avec les informations dont ils disposent estiment qu'il n'y a pas de risque de collision majeure. Mais seule une partie des géocroiseurs a été identifiée. Le risque zéro en la matière n'existe pas.

Aussi l'Europe et les USA ont lancé de grands programmes de « *défense spatiale* » destinés à identifier exhaustivement les géocroiseurs et à tenter, en cas de collision probable, d'aller dévier les géocroiseurs dangereux avant qu'il ne soit trop tard.

Tel est l'objectif de la mission DART de la NASA qui vient de décoller en novembre 2021, qui sera suivie de la mission HERA de l'ESA à partir de 2024.

Pour suivre cette actualité des géocroiseurs, nous vous conseillons de visiter le site du NEOCC à l'adresse <https://neo.ssa.esa.int/home> et de vous abonner à sa newsletter.