

> selon des travaux de Kyaw Kaung, de l'université de Kumamoto, au Japon, et ses collègues, publiés la même année, les nanoparticules d'argent se révèlent capables de détruire des biofilms de bactéries du genre *Salmonella* et *Pseudomonas*, sources de pathologies intestinales humaines. Ce riz pourrait donc aider à combattre de telles bactéries. Une pléthore de variétés médicinales de riz de ce type attendent d'être testées en laboratoire et en clinique.

Une autre valeur chère aux riziculteurs indigènes est la beauté du riz. Ils cultivent certaines variétés indigènes uniquement pour leurs couleurs ou leurs motifs: sillons dorés, bruns, violets et noirs sur les balles jaunes du riz, apex violets (l'apex est la pointe du grain), barbes noires, etc. Nombreux sont ceux qui, dans l'est de l'Inde, sont fiers des riz moynatundi et ramigali et de la beauté des extensions ailées des glumelles stériles. Dans toutes les cultures fondées sur l'exploitation du riz, les variétés aromatiques sont associées aux cérémonies religieuses et aux festivals traditionnels. Lorsque ces types de riz disparaissent des champs, de nombreuses préparations culinaires cessent d'être possibles et les cérémonies associées perdent une part de leur signification culturelle et symbolique. Les 195 variétés de riz aromatiques de la ferme Basudha ont déjà contribué à faire revivre de nombreuses traditions locales en voie de disparition.

UNE BIODIVERSITÉ SACRALISÉE DANS LES RITES RELIGIEUX

La complexité des interactions écologiques a donné naissance à une autre série de variétés de riz. Les petits riziculteurs du Bengale-Occidental et du Jharkhand préfèrent les variétés à barbes longues et fortes (arêtes situées à l'extrémité de l'enveloppe du grain), qui découragent les bovins et les chèvres. Les riziculteurs optent aussi pour les variétés indigènes comportant des feuilles paniculaires dressées, car les oiseaux granivores ne peuvent pas s'y percher.

À l'inverse, certains riziculteurs d'Odisha cultivent une combinaison de variétés barbées ou non, indépendamment de leur intérêt direct. D'autres variétés rares possèdent des tiges et des feuilles violettes, sans que l'utilité de ce trait ne soit évidente. En fait, dans la tradition sud-asiatique, la biodiversité paraît si essentielle à l'agriculture qu'elle a été sacralisée dans des rites religieux. Certains parents sauvages du riz cultivé, comme le buno dhan (*Oryza rufipogon*) et l'uri dhan (*Hygroryza asiatica*), sont par exemple associés à des rites hindous locaux et conservés dans de nombreuses exploitations du Bengale-Occidental et de l'État voisin du Jharkhand. L'importance de ces bassins génétiques sauvages, sources de traits inhabituels pouvant être incorporés si nécessaire dans les cultivars existants, n'a jamais été aussi grande.

La présence dans les rizières de certains arbres tels que le neem (*Azadirachta indica*), dont les feuilles constituent un pesticide naturel, et de prédateurs telle la chouette, est aussi considérée comme favorable.

En mai 2009, le cyclone Aila a frappé la côte des Sundarbans au Bengale-Occidental et au Bangladesh; il a fait près de 350 morts et détruit les habitations de plus d'un million de personnes;

Le riz garib-sal aiderait à combattre des pathologies intestinales bactériennes

une vague marine due à la tempête a inondé les champs, les polluant de sel, ce qui a mis la sécurité alimentaire de la région en danger. Apprenant cela, nous avons distribué à quelques riziculteurs des villages insulaires des Sundarbans une petite quantité de semences de variétés tolérant la salinité (lal getu, nona bokra, talmugur) et provenant de Vrihi. Ces variétés se sont révélées les seules capables de produire une quantité importante de grains dans les fermes salées pendant cette saison désastreuse. De même, en 1999, plusieurs variétés populaires telles que jabra, rani kajal et lakshmi dighal ont assuré la production de riz des riziculteurs du sud du Bengale après une crue soudaine de la rivière Hugli. Et en 2010, les variétés bhutmuri, kalo gorah, kelas et rangi ont sauvé de nombreux riziculteurs indigènes dans le district de Puruliya (Bengale-Occidental) lorsque l'arrivée tardive de la mousson a provoqué une grave sécheresse.

Ces catastrophes et leurs solutions prouvent que le maintien d'une riziculture durable dépend de façon essentielle de la restauration des pratiques agricoles traditionnelles, car elles permettent d'avoir recours au spectre entier des variétés ayant survécu à l'arrivée de l'agriculture industrielle. Convaincus par la stabilité supérieure des rendements des variétés indigènes, plus de 2000 riziculteurs de l'Odisha, de l'Andhra Pradesh, du Bengale-Occidental, du Karnataka, du Kerala et du Maharashtra ont déjà adopté plusieurs variétés traditionnelles de riz fournies par Vrihi et abandonné la culture de celles à haut rendement. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. S. Gupta et al., **Unusual accumulation of silver in the aleurone layer of an Indian rice (*Oryza sativa*) landrace and sustainable extraction of the metal**, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol.5(9), pp. 8310-8315, 2017.

D. Deb et al., **Variable effects of biochar and P solubilizing microbes on crop productivity in different soil conditions**, *Agroecol. Sust. Food*, vol. 40(2), pp. 145-168, 2016.

D. Chakraborty et al., **An analysis of variation of the aroma gene in rice (*Oryza sativa* L. subsp. *indica* Kato) landraces**, *Genet. Resour. Crop. Evol.*, vol. 63, pp 953-959, 2016.

D. Deb et al., **A profile of heavy metals in rice (*Oryza sativa* ssp. *indica*) landraces**, *Current Science*, vol. 109(3) pp. 407-409, 2015.

M. Mukerjee, **The imperial roots of hunger**, *Himal. Southasian*, vol. 26(2), pp. 12-25, 2013.

L'ESSENTIEL

> Dans le Système solaire, de nombreux astéroïdes et comètes sont susceptibles de croiser la trajectoire de la Terre. Un impact pourrait être catastrophique.

> Plusieurs sondes spatiales explorent des astéroïdes et des comètes pour mieux connaître ces objets.

> Des systèmes de surveillance sont mis en place pour suivre ces corps célestes et l'on prévoit de tester des façons de dévier leur trajectoire.

> La science-fiction s'inspire de ces menaces bien réelles et propose parfois des scénarios intéressants.

LES AUTEURS



JEAN-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue
au CNRS-MNHN,
à Paris



ROLAND LEHOUCQ
astrophysicien
au CEA, à Saclay

Impact!

La menace venue de l'espace

Elles ont mis fin au règne des dinosaures et détruisent des villes et des civilisations dans les films catastrophes. Mais avons-nous les moyens d'empêcher que l'une de ces météorites géantes entre en collision avec la Terre ?

Si les astéroïdes, les comètes et les météorites nous passionnent, c'est peut-être que ces objets sont à la fois des symboles de vie et de mort. De vie, car ils auraient fourni à la Terre une grande part de son eau lors d'intenses bombardements il y a environ 4 milliards d'années. Et d'après certains scénarios, ils auraient aussi apporté sur la planète des molécules complexes, telles que des aminoacides, qui constituent les briques élémentaires du vivant (ce scénario, nommé panspermie, reste à démontrer). Mais les météorites sont aussi sources de mort, comme nous le rappellent les dinosaures non aviens disparus il y a 66 millions d'années...

Moteurs à la fois d'apparition et d'extinction du vivant, ces bolides de l'espace, qui filent à une vitesse comprise entre 12 et 72 kilomètres par seconde par rapport à la Terre, ont donc un statut tout particulier dans notre imaginaire collectif. La menace que représentent ces objets tombés du ciel est un grand classique des œuvres de science-fiction. Toutefois, face à un danger bien réel, quelles sont aujourd'hui les stratégies à l'étude pour éviter un impact cataclysmique ?

Pour répondre au mieux à cette menace, les œuvres de fiction donnent des pistes. Mais c'est dans la science et les techniques que les chercheurs et les ingénieurs puisent des solutions concrètes. Ces dernières années, notamment grâce à des sondes spatiales qui ont observé de près des comètes et des astéroïdes, les astrophysiciens ont amélioré leur connaissance de ces corps. Ils ont une meilleure appréciation de leur composition, de leur nombre, de leur origine, de leur trajectoire...

De tous les corps célestes, les plus spectaculaires sont certainement les comètes. Il s'agit de petits objets (de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres de diamètre) en orbite autour du Soleil et caractérisés par un noyau, une chevelure (*o komêtês* signifie « astre chevelu » en grec) et une ou plusieurs queues (ou traînées).

Le noyau est constitué principalement de roche et de glace – les astrophysiciens parlent de « neige sale ». La chevelure ou *coma*, qui résulte de la sublimation de cette glace à l'approche du Soleil, est un halo de gaz et de poussières d'environ 50 000 à 250 000 kilomètres de diamètre entourant le noyau. Enfin, à la queue



© Capture d'écran / Armageddon/Touchstone Pictures

ionisée semblable à une ombre bleutée, s'ajoutent une longue queue d'hydrogène non lumineuse mais détectable par ondes radio et une queue de poussières dont la taille dépend de celle du noyau: de 30 à 80 millions de kilomètres de long. Très brillante, cette dernière est parfois visible en plein jour: pas étonnant alors que les comètes déchaînent les passions depuis des millénaires!

LA CÉLÈBRE COMÈTE DE HALLEY

Au IV^e siècle avant notre ère, l'astronome Apollonios de Myndos supposait déjà que les comètes étaient des astres ayant une trajectoire périodique. C'est seulement au XVII^e siècle qu'Isaac Newton a démontré qu'elles possèdent leur propre masse et obéissent aux mêmes lois de la gravitation régissant les autres corps célestes: elles présentent une trajectoire elliptique. Son ami astronome Edmond Halley, très impressionné par son traité *Du mouvement des corps en rotation* (1684), s'est alors attelé à étudier une comète en particulier. Et pas n'importe laquelle: elle est historiquement la

première dont on retrouve un enregistrement de son passage – comme en témoigne sa présence sur une gravure chinoise datant de 1059 avant notre ère.

Suite à son passage remarqué en 1682 (de notre ère), Halley a calculé que la comète ferait son grand retour soixante-seize ans plus tard, à Noël 1758. Malheureusement, mort en 1742, l'astronome n'a pas assisté à son grand triomphe: la comète a été détectée le 25 décembre 1758 exactement là où il l'avait prédit.

Forte de sa célébrité, la comète de Halley s'invite dans de nombreuses œuvres de fiction. Par exemple, dans le jeu vidéo *Shadow of the Comet* (1993) ancré dans l'univers horrifique de l'écrivain américain Howard Phillips Lovecraft, le joueur est plongé dans la peau d'un enquêteur censé prendre des photos de l'objet céleste de passage au-dessus de l'étrange ville d'Innsmouth...

La mauvaise réputation des comètes est tenace. Pour le mathématicien et historien William Whiston (1667-1752), la comète de Kirch, observée en 1680, aurait été responsable du déluge mentionné dans la Bible. En 1894, >

Dans le film *Armageddon*, Bruce Willis et ses coéquipiers embarquent pour la mission de la dernière chance: faire exploser une charge nucléaire sur un astéroïde qui se dirige vers la Terre.



> dans son roman noir *La Fin du monde* (adapté à l'écran par le réalisateur Abel Gance en 1931), l'astronome Camille Flammarion a imaginé une comète dévastatrice percutant la Terre au ^{XXIV}^e siècle.

Rares sont donc les comètes synonymes d'heureux événements, sauf peut-être pour Herbert G. Wells qui positive avec *Au temps de la comète* (1905), fiction dans laquelle la queue d'une comète frôlant la Terre modifie la composition atmosphérique. Cela transforme l'humanité en une espèce utopique: «Le grand changement est venu pour toujours, le bonheur et la beauté règnent, la Terre est en paix car les hommes sont de bonne volonté.»

Si des astéroïdes pénètrent dans l'atmosphère terrestre, une fois au sol, on parle alors de météorites. Et ces corps figurent aussi en bonne place dans les fictions. Pauvres en éléments volatils, les astéroïdes ne présentent pas de queue comme les comètes. Néanmoins, ces dernières années, certains astéroïdes ont démontré une activité de surface qui ressemble à petite échelle à celle d'une comète. On en distingue plusieurs types selon leur composition: type C pour les objets riches en carbone, type S pour les silicatés, type M pour les métalliques et enfin type V, plus rares, pour les astéroïdes basaltiques.

Dans l'univers des comics et films Marvel, une météorite d'un type particulier aurait frappé l'Afrique il y a des millions d'années. Elle contenait un super-minéral, le vibranium, grâce auquel le roi justicier du Wakanda (*alias* la Panthère noire) développe des technologies très avancées. Mais les impacts météoritiques du cinéma apportent aussi leur lot de virus, de maladies ou de parasites extraterrestres, comme s'ils



Le 25 décembre 1758, on a détecté la comète exactement là où Halley l'avait prédit

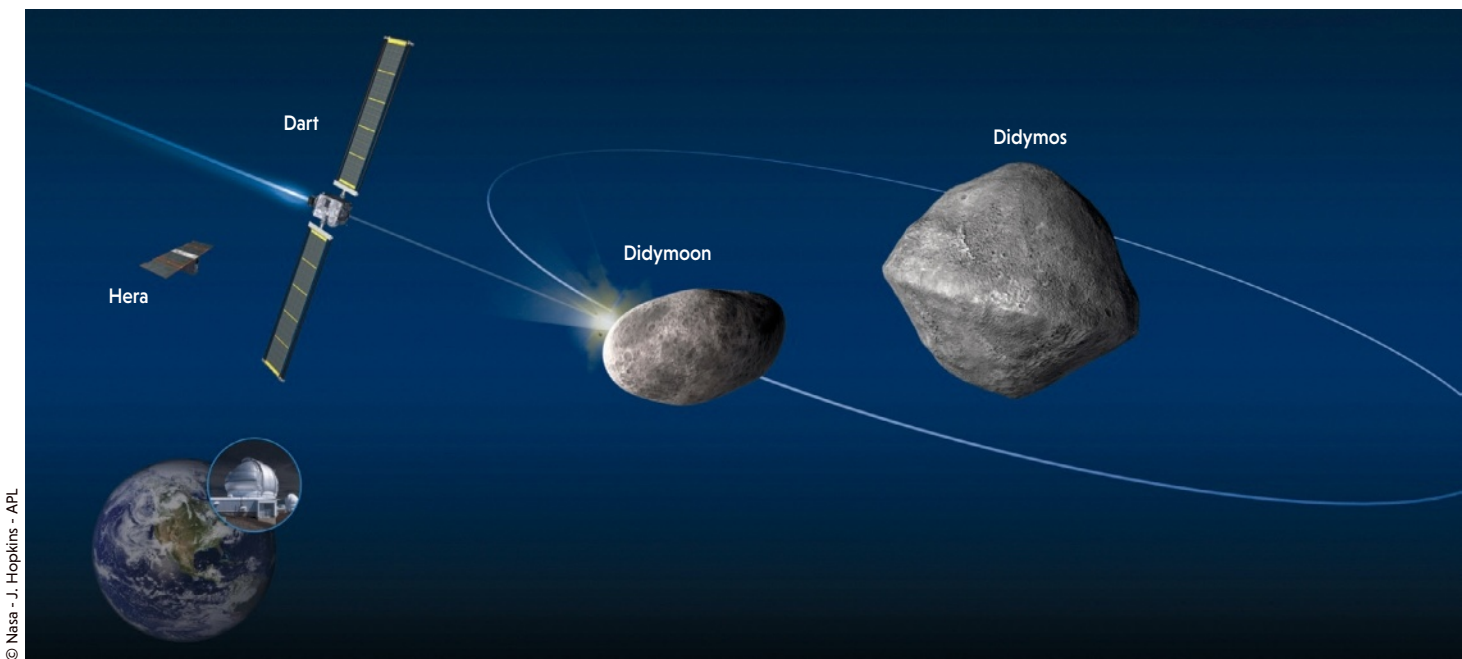


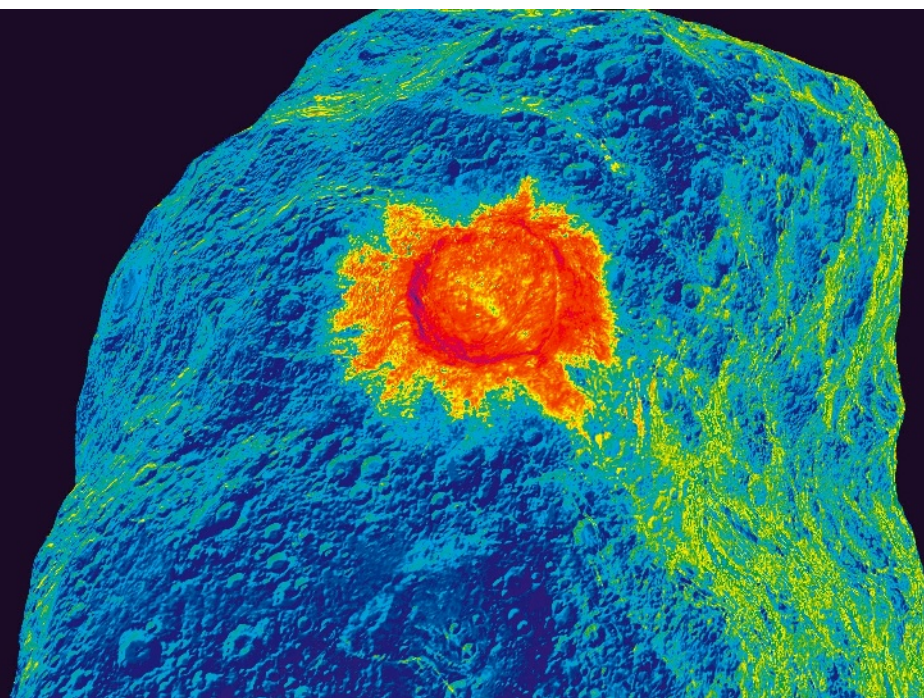
participaient d'une sorte d'antipanspermie, à l'image du blob, gelée envahissante et dévastatrice transportée par une météorite dans le film éponyme de 1958 (et ses nombreux *remakes*).

La plupart des météorites proviennent de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, aussi nommée «ceinture principale». La présence de ceintures d'astéroïdes est un grand classique des *space operas*.

Par exemple, dans *Star Wars* épisode V: *l'Empire contre-attaque* (1980), le Faucon Millénium de Han Solo, alors traqué par des chasseurs de l'Empire, se faufile avec dextérité entre les astéroïdes de la ceinture de Hoth (système fictif comprenant la planète glacée du même nom). Paniqué, le droïde C-3PO à bord s'exclame: «Les chances de traverser un champ d'astéroïdes avec succès sont approximativement de 1 sur 3 720». Même si la ceinture de Hoth présente en effet une forte densité de gros astéroïdes, on peut se demander d'où sort ce chiffre qui, en réalité, varie selon la densité en astéroïdes, leurs tailles, les dimensions de la ceinture, la taille du

Dans la mission conjointe de la Nasa et de l'ESA, la sonde *Dart* rejoindra l'astéroïde Didymos et sa lune Didymoon en octobre 2022. Elle déploiera un nanosatellite pour suivre les premiers instants de la collision avec l'impacteur. La sonde *Hera* arrivera en 2027 pour analyser avec précision la déviation obtenue.





Vue d'artiste d'une image infrarouge du cratère produit par l'impacteur de la sonde *Dart* sur Didymos.

vaisseau et sa vitesse relative. Notre ceinture principale, bien que contenant plus de 1 million d'objets de plus de 1 kilomètre de diamètre, est beaucoup moins dense que cette ceinture fictive : la distance moyenne entre astéroïdes y est de l'ordre de 1 million de kilomètres.

Dans la ceinture principale, la taille des astéroïdes est en fait très variable, du simple caillou à la planète naine Cérès (974 kilomètres de diamètre). Leurs vitesses sont telles que les collisions dans la ceinture sont assez fréquentes à l'échelle astronomique : selon les modèles, les astéroïdes de plus de 10 kilomètres de diamètre se percutent tous les 10 millions d'années en moyenne, mais les plus petits se rencontrent plus souvent. Si ces collisions sont violentes, les débris prennent la forme de très petits corps nommés « météoroïdes », potentiellement menaçants pour nous, car s'ils sont éjectés de la ceinture, ils peuvent alors croiser notre chemin et frapper la Terre.

DES RÉSERVOIRS GLACÉS ET LOINTAINS

Les comètes, quant à elles, proviennent de beaucoup plus loin, généralement de la ceinture de Kuiper (pour celles ayant une période inférieure à deux cents ans) ou du nuage d'Öpik-Oort (pour celles ayant une période plus longue). La ceinture de Kuiper, qui s'étend au-delà de Neptune, entre 30 et 55 unités astronomiques (la distance moyenne Terre-Soleil définit l'unité astronomique, soit environ 150 millions de kilomètres), est 20 fois plus large et 20 à 200 fois plus massive que la ceinture principale d'astéroïdes. En plus de ses trois planètes naines, Pluton (et son double Charon),

Haumea et Makemake (découvertes respectivement en 2004 et 2005), les nombreux objets qui composent la ceinture de Kuiper sont principalement composés d'éléments volatils gelés comme l'ammoniac, l'eau et le méthane.

Plus vaste et plus éloigné que la ceinture de Kuiper, le nuage d'Öpik-Oort est situé en bordure et à l'extérieur du Système solaire, à une distance du Soleil comprise entre 20 000 et 100 000 unités astronomiques. Il s'agit d'une énorme structure encore hypothétique (car jamais observée directement), modélisée par une zone externe sphérique et une zone interne en forme de tore. La présence d'un tel nuage a été envisagée dès 1932 par l'astronome estonien Ernst Öpik qui invoquait ce réservoir pour expliquer l'origine de comètes non périodiques. Ce nuage regrouperait des milliers de milliards de noyaux de comètes de diamètre supérieur au kilomètre, dont certains seraient parfois déviés par la gravité des étoiles voisines et se dirigeraient alors vers l'intérieur du Système solaire.

Le nuage d'Öpik-Oort serait constitué des restes du disque protoplanétaire formé autour du Soleil lors de sa naissance, il y a quelque 4,6 milliards d'années. La ceinture principale d'astéroïdes, quant à elle, serait une collection de débris du Système solaire primitif n'ayant pas formé de planètes. Mais libre aux auteurs de fiction d'inventer d'autres origines. Dans le mythe de Cthulhu façonné par Lovecraft, la ceinture principale d'astéroïdes est en fait constituée de restes de planètes volontairement détruites par une entité extraterrestre surpuissante du nom d'Azathoth – dont la première mention apparaît dans une lettre de 1919 que l'écrivain rédige pour lui-même.

Comme nous l'avons évoqué, pour diverses raisons (collisions, perturbations gravitationnelles), certains des constituants des réservoirs d'astéroïdes et de comètes se retrouvent propulsés vers l'intérieur du Système solaire et peuvent parfois croiser le chemin de la Terre. Il est alors indispensable de surveiller ces objets du mieux possible.

Depuis 1947, le Centre des planètes mineures a pour mission de collecter des données sur les astéroïdes et les comètes du Système solaire, de calculer leurs orbites et de diffuser ces informations. Cet organisme, sous la tutelle de l'Union astronomique internationale, a notamment recensé 4086 comètes. Mais pour en savoir plus sur ces objets, il faut les scruter de plus près.

Ainsi, en 1986, lors de son dernier passage, la comète de Halley a été auscultée par pas moins de six sondes spatiales, dont *Giotto* conçue par l'Agence spatiale européenne. Cette sonde s'est approchée à seulement 600 kilomètres de la comète – une première pour l'époque – et a mis en évidence la forme en cacahuète de son noyau (16×8×7 kilomètres) ➤

> ainsi que la présence de deux jets alimentant sa chevelure et sa queue.

Aujourd'hui, les sondes ne se contentent pas de frôler les comètes. Elles s'y posent déjà (comme l'a fait l'atterrisseur *Philae* de la sonde *Rosetta* sur la comète Tchouri en novembre 2014) ou ramèneront des échantillons sur Terre dans un futur proche. C'est le cas de la mission *Hayabusa2*, de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise, dont l'objectif est l'astéroïde Ryugu, et de la mission *OSIRIS-REx*, de la Nasa, qui rend visite à Bennu; avec des retours prévus pour 2020 et 2023 respectivement.

D'autres sondes tirent sur leur cible avec des projectiles. Ces «impacteurs» percutent l'astéroïde ou la comète pour en analyser les éjectas. C'est le cas de *Deep Impact*, la première sonde du genre, lancée début 2005 par la Nasa. Après avoir projeté son impacteur sur la comète Tempel 1 – précisant sa composition qui restait débattue –, *Deep Impact* s'est rapprochée d'une autre cible en 2010, la comète Hartley 2. La sonde a effectué des prises de vues à 700 kilomètres de distance et a mis en évidence des jets de gaz avant de disparaître définitivement des radars en 2013.

MOUSTIQUE CONTRE BOEING 747

En théorie, *Deep Impact* devait aussi tester la possibilité de dévier des géocroiseurs (ou *near Earth objects* en anglais), c'est-à-dire des objets dont la trajectoire croise l'orbite de la Terre et qui sont potentiellement menaçants. Hélas, son impacteur de 372 kilogrammes, même s'il a percuté la comète à une vitesse de 10,2 kilomètres par seconde et y a créé un cratère de 30 mètres de diamètre, a eu autant d'effet qu'un moustique percutant un Boeing 747», pour reprendre les termes d'un responsable de la Nasa.

D'ailleurs, notons que *Deep Impact* est aussi le titre d'un film catastrophe de 1998 qui a le mérite d'imaginer les conséquences sociologiques d'un tel impact. Dans ce nanar, la comète (imaginaire) Wolf-Biederman menace de s'écraser sur Terre et d'anéantir les États-Unis. L'impact étant imminent, le président enclenche alors le protocole *Extinction level event* («Événement de niveau extinction») consistant à sélectionner un million d'Américains autorisés à s'abriter dans un bunker géant pendant deux ans, le temps que les effets de l'impact s'estompent.

Dans la réalité, un tel événement serait effectivement dévastateur, comme le soulignait le cosmologiste Stephen Hawking en 2010: «La possibilité qu'un astéroïde nous anéantisse n'est pas juste le fait des films catastrophes d'Hollywood, la menace est réelle.» D'après les modèles des géophysiciens, un bolide d'environ 10 kilomètres de diamètre percutant la Terre éjecterait dans



l'atmosphère près de 2500 milliards de tonnes de poussières, de quoi obscurcir l'ensemble du ciel, stopper la photosynthèse des plantes et refroidir le climat global pendant un temps considérable.

Ce scénario nommé «hiver d'impact» serait en partie responsable de certaines des grandes crises de la vie, comme celle du Crétacé-Paléogène il y a 66 millions d'années, durant laquelle 70% des espèces (dont les dinosaures non aviens) ont disparu. Le cratère de Chicxulub, au Mexique, large d'environ 180 kilomètres, est très probablement le vestige d'un impact dû à un astéroïde d'une dizaine de kilomètres de diamètre. La crise Permien-Trias, il y a 252 millions d'années, durant laquelle 90% des espèces se sont éteintes – soit la quasi-totalité de la biosphère de l'époque – pourrait avoir une origine similaire.

Un impact d'une telle envergure serait aujourd'hui catastrophique non seulement pour l'espèce humaine (nous n'avons clairement ni les réserves ni l'espace suffisant pour abriter l'humanité tout entière pendant un hiver d'impact), mais aussi pour de nombreuses autres: l'arrêt momentané de la photosynthèse aurait des répercussions dramatiques sur tous les écosystèmes, aussi bien terrestres que marins.

Certes, les bolides les plus gros sont aussi les plus rares, mais on estime qu'en moyenne, un astéroïde de 100 mètres percute la Terre tous les 5000 ans, libérant ainsi une énergie équivalente à 100 mégatonnes de TNT. On comprend alors que les 21000 géocroiseurs actuellement recensés dans le ciel fassent l'objet de toutes les attentions. Officiellement, ceux dont le diamètre est supérieur à 140 mètres et susceptibles de passer à moins

Vue d'artiste de l'astéroïde 'Oumuamua. C'est le premier objet interstellaire découvert traversant le Système solaire. Sa forme n'est pas sans rappeler celle de certains vaisseaux spatiaux de la science-fiction.



de 7480000 kilomètres de la Terre (soit 1/20 de la distance moyenne Terre-Soleil) sont classés dans la catégorie des « Objets potentiellement dangereux » (OPD). C'est par exemple le cas de l'astéroïde Toutatis, en forme de haricot et d'environ 3 kilomètres de diamètre moyen pour une masse de 50 milliards de tonnes.

UNE MENACE BIEN RÉELLE

Les OPD sont étroitement surveillés depuis la fin des années 1990. La prise de conscience de la menace qu'ils représentent est devenue très concrète lors de la spectaculaire collision des fragments de la comète Shoemaker-Lévy 9 avec la planète Jupiter en juillet 1994, et dont les impacts ont été nettement visibles. Cela s'est aussi accompagné de la reconnaissance que des géocroiseurs pouvaient être des causes possibles de grandes extinctions, alors qu'auparavant, les paléontologues misaient plutôt sur les variations du niveau des mers et les volcans.

Actuellement, plusieurs campagnes d'observation dans les domaines radio et infrarouge ayant pour objectif de classer les OPD (à l'aide de diverses échelles de risque) sont menées. Elles visent au recensement exhaustif des OPD et au suivi de leur trajectoire le plus tôt possible. La mission *Near-Earth Object Surveillance* de la Nasa a pour objectif d'envoyer un télescope infrarouge dans l'espace afin d'effectuer ce recensement en une décennie seulement. Cependant, la trajectoire de certains OPD comme Toutatis est particulièrement difficile à prévoir, en raison de leur déviation à chaque fois qu'ils frôlent la Terre ou d'autres planètes.

Et si l'un de ces objets devait percuter la Terre? Des programmes de « défense planétaire » sont à l'étude et financés par plusieurs agences spatiales internationales. C'est le cas de la mission *Dart* (*Double asteroid redirection test*, Test de redirection d'astéroïde binaire), de la Nasa. Son but: dévier légèrement la trajectoire de la lune qui accompagne un astéroïde, une configuration concernant 15% des astéroïdes qui évoluent dans l'environnement de la Terre. On cible le satellite, car ainsi on ne perturbe pas le système complet (la lune représente moins de 1% de la masse totale du système). En l'occurrence, la cible de *Dart* est Didymoon, lune rocheuse de 160 mètres qui accompagne Didymos (mot signifiant d'ailleurs « jumeau » en grec), un astéroïde de 780 mètres de diamètre. Découvert en 1996 grâce au programme *Spacewatch* pour la détection de géocroiseurs de l'université d'Arizona, Didymos a déjà frôlé la Terre le 13 novembre 2003.

La sonde *Dart*, dont le lancement est prévu pour juillet 2021, se propulsera vers l'astéroïde binaire pendant une année grâce à un moteur ionique alimenté par des panneaux solaires. Son impacteur percutera Didymoon à la vitesse

de 6,6 kilomètres par seconde. En théorie, la collision est censée modifier la vitesse de rotation de Didymoon autour de Didymos de 1%, ce qui est suffisant pour tester cette technique d'impact sans trop perturber le mouvement héliocentrique du centre de masse du système. En complément de *Dart*, l'ESA prépare la mission *Hera*, dont Patrick Michel, astrophysicien du CNRS à l'observatoire de la Côte d'Azur, est le coordinateur scientifique. « *Hera* se placera en orbite autour de Didymos et mesurera la déviation de sa lune due à l'impact. La sonde analysera également le cratère produit, les propriétés physiques et la composition de Didymos », résume le chercheur.

Pour protéger la Terre de ces menaces venues du ciel, d'autres solutions existent sur le papier: dévier le géocroiseur d'une façon plus douce, mais continue, en utilisant l'attraction gravitationnelle d'un engin spatial très massif ou en orientant un de ses moteurs vers l'astéroïde, ou encore en modifiant l'albédo du géocroiseur pendant une longue durée – en utilisant alors la force produite par l'écart entre l'absorption solaire et le rayonnement thermique (c'est l'effet Yarkovsky, qui sera étudié par la sonde *OSIRIS-Rex* sur l'astéroïde Benu).

Mais si le temps manque et que la menace est proche, une solution consisterait aussi à faire exploser une charge nucléaire sur le géocroiseur, ou non loin de sa surface. Tester cette solution de la dernière chance est strictement interdit par les traités internationaux, mais c'est pourtant ce que fait Bruce Willis dans *Armageddon* (film de Michael Bay, 1998) pour sauver le monde d'un astéroïde de la taille du Texas.

DES VISITEURS INTERSTELLAIRES

En 2017, le projet de surveillance *Pan-Starrs* (comparable à *Skywatch*) a détecté un nouvel objet baptisé 'Oumuamua. Son originalité: il ne provient pas du Système solaire. Cet objet interstellaire n'a rendu qu'une brève visite au Soleil et sa cohorte de planètes. La forme allongée de 'Oumuamua n'est pas sans rappeler le vaisseau extraterrestre du roman *Rendez-vous avec Rama* d'Arthur C. Clarke, dont on fêtait le centenaire de la naissance en 2017.

L'astronome Abraham Loeb, de l'université Harvard, a alimenté l'idée de l'origine artificielle de 'Oumuamua. En analysant la trajectoire du bolide, il a suggéré que celui-ci était propulsé par une voile solaire. Si des explications plus classiques sont probablement plus raisonnables (des hétérogénéités dans la composition de l'astéroïde, un jet de dégazage, etc.), la science et la fiction semblent se mêler étroitement. En 2019, la comète Borissov a été le deuxième visiteur interstellaire à être détecté. Ceux-ci pourraient donc être plus fréquents qu'on ne le pense et constituent donc une nouvelle classe d'objets à surveiller de près! ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Morbidelli et al., **Debiased albedo distribution for Near Earth Objects**, *Icarus*, vol. 340, 113631, 2020.

D. Lauretta et al., **Episodes of particle ejection from the surface of the active asteroid (101955) Bennu**, *Science*, vol. 366, eaay3544, 2019.

P. Michel et al., **European component of the AIDA mission to a binary asteroid: Characterization and interpretation of the impact of the DART mission**, *Advances in Space Research*, vol. 62, pp. 2261-2272, 2018.

D. Lauretta, **Un vol de sept ans pour quelques grammes d'astéroïde**, *Pour la Science*, n° 468, octobre 2016.

R

ENDEZ-VOUS

P.58 Logique & calcul
 P.64 Idées de physique
 P.68 Chroniques de l'évolution
 P.72 Science & gastronomie
 P.74 À picorer

DESSINER UN ÉLÉPHANT AVEC UN SEUL PARAMÈTRE

Reproduire n'importe quel jeu de données en nombre fini, par exemple des points qui esquissent la silhouette d'un animal: c'est l'exploit que permet une fonction paramétrisée par un unique nombre réel.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
 professeur émérite
 à l'université de Lille
 et chercheur au
 laboratoire Cristal
 (Centre de recherche
 en informatique, signal
 et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye
 a notamment publié:
**Les Mathématiciens
 se plient au jeu,**
 une sélection de ses
 chroniques parues
 dans *Pour la Science*
 (Belin, 2017).

Supposons que l'on dispose de données et que l'on recherche une explication simple à ces données, ou au moins un modèle qui permette de les reproduire. On partira par exemple de valeurs de mesures qui, pour $x = 0, 1, \dots, n$, donnent $y_0, y_1, \dots, y_n$. Si l'on trouve une fonction f qui vérifie $f(0) = y_0, f(1) = y_1, \dots, f(n) = y_n$, on sera assez satisfait. On utilisera f pour prédire $f(n+1), f(n+2), \dots$ et l'on analysera f pour comprendre les données étudiées et peut-être pour formuler une théorie les expliquant.

Bien évidemment, on recherche des fonctions f les plus simples possible. Les polynômes, c'est-à-dire les fonctions de la forme $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$ sont parmi les plus simples. On sera donc assez satisfait si l'on trouve un polynôme qui reproduit $y_0, y_1, \dots, y_n$.

Or le monde mathématique est généreux et permet souvent de faire tout ce que l'on veut. Un joli résultat, dénommé «théorème d'interpolation de Lagrange», indique que quelles que soient les données $y_0, y_1, \dots, y_n$, il existe un polynôme de degré au plus n qui redonne $y_0, y_1, \dots, y_n$ pour $x = 0, 1, \dots, n$ (voir l'encadré 2). Mais ce polynôme est un surajustement (ou *overfitting*): on se donne trop de paramètres, ici les coefficients du polynôme, et ce que l'on trouve n'a pas vraiment d'intérêt car on était certain d'y arriver!

Aussi le calcul du polynôme d'interpolation de Lagrange ne permettra que très rarement d'anticiper ce qui se passe pour $n+1, n+2, \dots$, et ce polynôme ne sera pas utile sur un plan

théorique. Heureusement, il se peut que le polynôme trouvé soit de faible degré. Si c'est le cas, cela signifie que sa découverte aurait résulté de la prise en compte de moins de données (autant que le degré du polynôme, plus une unité) et donc que le polynôme retrouve les autres données. Dans une telle situation, il ne sera pas absurde de croire que le polynôme calculé permet d'anticiper $f(n+1), f(n+2), \dots$.

Le risque de surajustement est un problème important dans le domaine de l'apprentissage profond en intelligence artificielle, car il conduit à des réseaux de neurones qui sont bien adaptés à un grand ensemble de données... et à rien d'autre.

À propos du choix des paramètres dans un modèle, le mathématicien d'origine hongroise John von Neumann a fait une remarque amusante: «Avec quatre paramètres, je peux faire un éléphant, et avec cinq, je peux faire remuer sa trompe.»

UN SEUL PARAMÈTRE SUFFIT POUR TOUT AJUSTEMENT

Un article récent de Steven Piantadosi, du Département de psychologie de l'université de Californie à Berkeley, a montré que von Neumann aurait pu remplacer le nombre «quatre» de sa phrase par le nombre «un». L'article est bien sûr un jeu, mais ce qu'il montre, en mettant en œuvre des mathématiques assez simples, est remarquable et doit servir de mise en garde: un seul paramètre permet d'ajuster une fonction pour qu'elle redonne mille données ou un milliard si l'on s'y prend bien.