



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) Benu**, *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.