

> chez l'enfant. C'est pourquoi, depuis quinze ans, mes collègues et moi utilisons les modèles bayésiens dans nos travaux sur le développement des enfants. Notre laboratoire et d'autres ont utilisé ces techniques pour comprendre comment les enfants apprennent les relations de cause à effet, et prédire comment et quand les jeunes changent de point de vue sur une conviction erronée.

Les méthodes bayésiennes sont également une excellente manière d'apprendre aux machines à apprendre comme les humains. En 2015, Joshua Tenenbaum, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), Brenden Lake, de l'université de New York, et leurs collègues ont publié une étude dans laquelle ils ont mis au point un système d'intelligence artificielle capable de reconnaître des caractères manuscrits inhabituels, une tâche simple pour les humains mais extrêmement ardue pour les ordinateurs.

Pensez un instant à vos propres capacités de reconnaissance. Même si vous n'avez jamais vu un caractère sur un rouleau japonais, vous saurez sans doute dire s'il s'agit du même ou d'un autre que sur le rouleau voisin. Vous saurez probablement le dessiner, et même concevoir un faux caractère japonais, et également comprendre que son allure est très différente de celle d'un caractère coréen ou russe. C'est exactement ce que le logiciel de l'équipe de Joshua Tenenbaum est parvenue à faire.

Dans une méthode ascendante, on présenterait à l'ordinateur des milliers d'exemples, et il utiliserait les motifs repérés dans ces exemples pour identifier les nouveaux caractères. Au lieu de cela, le programme bayésien a donné à la machine un modèle général de tracé de caractère: par exemple, une barre peut aller vers la droite ou vers la gauche. Et une fois que le logiciel a terminé un caractère, il passe au suivant.

Quand le programme voyait un caractère donné, il pouvait inférer la séquence de traits nécessaire pour le tracer, et pouvait ensuite produire lui-même un jeu de traits similaire. Il le faisait de la même manière que j'ai inféré la série d'étapes qui avait conduit à mon message douteux envoyé par la pseudorevue. Au lieu d'évaluer la probabilité que ce message soit une escroquerie, le modèle de Tenenbaum devinait si une séquence particulière de traits avait des chances de donner le caractère souhaité. Ce programme descendant fonctionnait bien mieux que l'apprentissage profond appliqué aux mêmes données exactement, et il reproduisait assez fidèlement les performances des humains.

Ces deux approches majeures de l'apprentissage machine, ascendante et descendante, ont des forces et des faiblesses complémentaires. Avec la méthode ascendante, l'ordinateur n'a pas besoin d'avoir au départ la moindre compréhension de ce qu'est un chat, mais il a besoin de beaucoup de données. Le système bayésien, quant à lui, est capable d'apprendre à

partir de quelques exemples seulement, et il peut faire des généralisations plus larges. En revanche, cette approche descendante nécessite beaucoup de travail en amont pour articuler le bon jeu d'hypothèses. Et les concepteurs des deux types de systèmes peuvent rencontrer des obstacles similaires. L'une et l'autre approches ne fonctionnent que sur des problèmes relativement étroits et bien définis, comme la reconnaissance de caractères écrits ou de chats, ou les jeux sur console Atari.

LES ENFANTS EXPLOITENT LE MEILLEUR DES DEUX APPROCHES

Les enfants ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. Les psychologues du développement ont trouvé que les jeunes combinent les meilleures qualités de chaque approche, ce qui les emmène beaucoup plus loin. Augie peut apprendre juste à partir d'un ou deux exemples, à la manière d'un système descendant. Mais il extrait aussi des corrélations à partir des données elles-mêmes, comme un système ascendant, et en déduit ainsi certaines idées qui n'étaient pas présentes initialement.

Augie a bien d'autres cordes à son arc. Il reconnaît immédiatement les chats et distingue les lettres, mais il peut également faire de nouvelles inférences créatives et étonnantes qui vont bien au-delà de son expérience ou de ses connaissances préalables. Il a récemment expliqué que si un adulte veut redevenir un enfant, il devrait essayer de ne pas manger de légumes sains, puisque ce sont eux qui font qu'un enfant grandit et devient adulte. Nous n'avons pratiquement aucune idée de la manière dont ce type de raisonnement créatif émerge.

Nous devrions nous rappeler les pouvoirs encore mystérieux de l'esprit humain quand nous entendons certains affirmer que l'intelligence artificielle est une menace existentielle. Intelligence artificielle et apprentissage automatique sont des termes qui font peur. Et à certains égards, cela est justifié – la recherche militaire travaille à utiliser ces systèmes pour commander des armes, par exemple.

Mais la stupidité naturelle peut faire plus de dégâts que l'intelligence artificielle, et nous autres humains devons faire preuve de beaucoup plus d'intelligence que nous avons pu le faire par le passé afin d'encadrer correctement ces nouvelles technologies. Même si les progrès de l'informatique résultent de l'augmentation de la puissance de calcul et des masses de données disponibles, plutôt que de révolutions conceptuelles dans notre compréhension de l'esprit, ils n'en peuvent pas moins avoir des conséquences pratiques capitales. Cela dit, nous n'avons pas de raisons de penser qu'un nouveau golem technologique est sur le point d'être lâché sur le monde. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Bengio, **La révolution de l'apprentissage profond**, *Pour la Science* n° 465, juillet 2016.

A. Gopnik, **The Gardener and the Carpenter - What the new science of child development tells us about the relationship between parents and children**, Farrar, Straus and Giroux, 2016.

M. L. Brenden et al., **Human-level concept learning through probabilistic program induction**, *Science*, vol. 350, pp. 1332-1338, 2015.

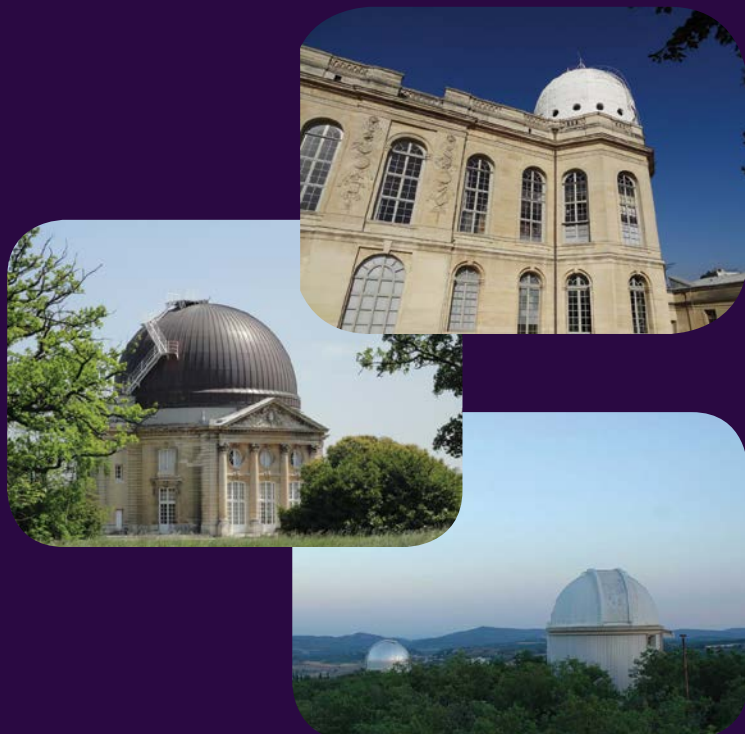
A. Gopnik et al., **Bayesian networks, Bayesian learning and cognitive development**, *Developmental Science*, vol. 10(3), pp. 281-287, 2007.

OBSERVATOIRE DE PARIS

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ

EN PRÉSENTIEL ET À DISTANCE

“EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS”



Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique.

Contenu

Cette formation, de niveau L1, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.

Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon (en option et sous conditions ; nombre de places limité).

Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence (en option et sous conditions ; nombre de places limité).

Les sujets abordés sont les suivants :

- ▶ Mécanique céleste et astrométrie
- ▶ Histoire de l'astronomie
- ▶ Ondes et instruments
- ▶ Le soleil
- ▶ Planétologie comparée
- ▶ Traitement de données
- ▶ Étoiles et milieu interstellaire
- ▶ Galaxies
- ▶ Cosmologie



Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 8 septembre sur le site d'inscription en ligne : https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

<http://ufe.obspm.fr/Diplomes-d-Universite/DU-en-presentiel>

contact.duecu@obspm.fr

Téléphone : 01.45.07.78.87

L'ESSENTIEL

> L'étoile KIC 8462852, surnommée l'étoile de Tabby, est un astre dont le comportement étrange a été découvert grâce au télescope spatial *Kepler*.

> Les baisses de luminosité de cette étoile, aussi spectaculaires que sporadiques, sont difficiles à expliquer par des processus naturels connus.

> Disques de gaz et de poussière, débris interstellaires, essaims de comètes ou même trous noirs sont autant d'explications exotiques envisagées.

> Une idée extravagante a aussi été proposée : le comportement bizarre de l'étoile traduirait l'activité d'une civilisation extraterrestre avancée.

LES AUTEURS



KIMBERLY CARTIER
doctorante
en astrophysique
à l'université d'État
de Pennsylvanie,
aux États-Unis



JASON WRIGHT
maître de conférences
en astronomie
et astrophysique
à l'université d'État
de Pennsylvanie

L'étrange étoile de Tabby

UNE LOINTAINE ÉTOILE BRILLE AVEC UNE INTENSITÉ QUI FLUCTUE MYSTÉRIEUSEMENT. DE LÀ À SUPPOSER QU'UNE CIVILISATION EXTRATERRESTRE A ENTOURÉ L'ASTRE D'IMMENSES CAPTEURS POUR EXPLOITER SON RAYONNEMENT...

Par une calme après-midi d'automne, en 2014, alors que les arbres viraient du vert à l'or, Tabetha Boyajian nous a rendu visite au département d'astronomie pour partager une découverte inhabituelle. Une rencontre qui allait changer le cours de nos carrières.

Grâce aux données du télescope spatial *Kepler*, Tabetha (ou Tabby) Boyajian, alors postdoctorante à l'université Yale, étudiait d'inexplicables fluctuations lumineuses en provenance d'une étoile distante de 1280 années-lumière. Le télescope *Kepler*, spécialisé dans la recherche d'exoplanètes – planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil –, mesure les variations de luminosité que l'exoplanète provoque en passant entre l'étoile et le télescope. Or les fluctuations qui intriguaient l'astronome ne ressemblaient à rien de ce qu'une exoplanète est susceptible d'occasionner. Et la chercheuse de Yale avait déjà exclu d'autres explications sans avoir trouvé de solution satisfaisante.

Elle cherchait de nouvelles idées, et l'un d'entre nous (Jason Wright) a suggéré quelque chose de très peu orthodoxe : peut-être les changements de luminosité de l'étoile ne découlent-ils pas de processus naturels, mais d'une technologie extraterrestre ? Dans les années 1960, le physicien Freeman Dyson avait imaginé que des civilisations avancées gourmandes en énergie seraient capables d'envelopper leur étoile mère de collecteurs solaires (et former ce qu'on nomme une sphère de Dyson) pour absorber le maximum d'énergie rayonnée par l'astre. Se pourrait-il que cette étoile pâlisante soit le premier signe que l'existence d'autres cultures cosmiques ne relève pas simplement de la science-fiction ? Cette idée outrancière était une hypothèse proposée comme dernier recours, mais, dans l'immédiat, il ne nous était pas possible de l'écarter.

L'étoile qui déconcertait Tabetha Boyajian (désormais nommée étoile de Boyajian et familièrement appelée étoile de Tabby) captive à présent de nombreux astronomes ainsi que le ➤



SPHÈRE DE DYSON

L'hypothétique sphère de Dyson désigne un ensemble de capteurs gigantesques mis en place autour d'une étoile pour absorber un maximum de son rayonnement. Un tel dispositif en cours de construction par une civilisation extraterrestre avancée technologiquement ferait varier la luminosité de l'astre de façon inexplicable, comme c'est le cas avec l'étoile de Tabby.

> grand public. Comme toutes les grandes énigmes, elle a suscité un nombre important de tentatives de solution, dont aucune n'est parvenue à expliquer complètement les étranges observations. L'explication sort peut-être du domaine des phénomènes astrophysiques connus.

ENFOUIE DANS LE TRÉSOR DE KEPLER

Avant le lancement de *Kepler* en 2009, la chasse aux exoplanètes était laborieuse. Les astronomes les trouvaient une à la fois, comme des pêcheurs à la ligne sortant des poissons isolés de la mer. Quand *Kepler* est arrivé, c'était en quelque sorte un chalutier de l'espace, qui attrapait les nouvelles planètes par milliers.

Pendant quatre années, le télescope a observé en continu les étoiles d'une petite région de la Voie lactée. Il était à l'affût de «transits» planétaires, situations où une planète passe devant son étoile et s'interpose entre elle et nous, ce qui bloque une fraction de la lumière stellaire vue depuis la Terre. Représentée en fonction du temps, la luminosité de l'étoile décrit ce qu'on nomme une courbe de lumière. Sans transit de planète, cette courbe est plus ou moins une ligne plate. Mais avec une planète en transit, cette courbe de lumière présente des creux en forme de U qui se répètent à intervalles réguliers, à chaque fois que le corps en orbite effectue un tour complet et repasse devant l'étoile (voir la figure ci-contre). Les chercheurs savent extraire des informations sur la planète (taille, température) à partir de la durée, l'espacement et la profondeur des creux.

Parmi les plus de 150 000 étoiles que *Kepler* a scrutées, une seule (KIC 8462852, son numéro dans le *Kepler Input Catalog*) présentait une courbe de lumière qui défiait toute explication. Les membres du projet scientifique participatif *Planet Hunters* ont été les premiers à le remarquer en parcourant les données de *Kepler* à la recherche d'éventuelles planètes en transit qu'auraient laissé passer les algorithmes automatiques des astronomes professionnels. KIC 8462852 présentait des creux de type transit, mais apparemment aléatoires, certains ne durant que quelques heures et d'autres persistant plusieurs jours, voire semaines. Parfois, la lumière de l'étoile était atténuée d'environ 1 % (ce qui est caractéristique des transits des plus grosses exoplanètes), mais d'autres fois l'atténuation atteignait 20 % (voir l'encadré de la page ci-contre). Aucun système planétaire concevable ne pouvait produire une courbe de lumière présentant une variabilité aussi extrême.

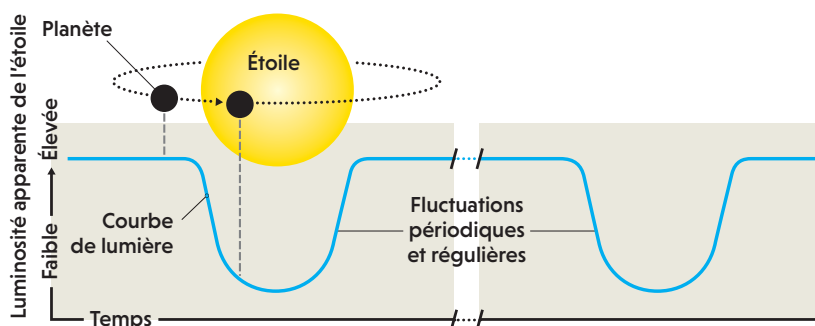
Perplexes, les membres de *Planet Hunters* ont signalé leur trouvaille à Tabetha Boyajian, qui chapeaute le projet. En 2016, ils ont présenté l'étoile et ses mystères dans un article

UNE COURBE DE LUMIÈRE ÉNIGMATIQUE

Pour les astronomes, l'atténuation de l'éclat d'une étoile n'est généralement pas mystérieuse. Des taches stellaires, ainsi que l'ombre de planètes ou de disques de débris, font régulièrement pâlir des étoiles adultes dont la luminosité est, sinon, stable (voir ci-dessous). Mais aucune de ces explications ne semble s'appliquer à l'étoile de Tabby (voir page ci-contre).

1. COURBE DE LUMIÈRE TYPIQUE

La « courbe de lumière » représente la luminosité de l'étoile en fonction du temps. Une planète qui passe devant l'astre bloque une partie de la lumière émise dans notre direction et se traduit par un creux dans la courbe. Ce creux se reproduit à chaque révolution. Les taches stellaires créent des motifs dans la courbe de lumière qui dépendent de la vitesse de rotation de l'étoile et de son cycle d'activité. Elles peuvent donc être identifiées.



portant le sous-titre «Where's the flux?» (jeu de mots avec l'abréviation WTF de l'expression vulgaire «what the fuck?»).

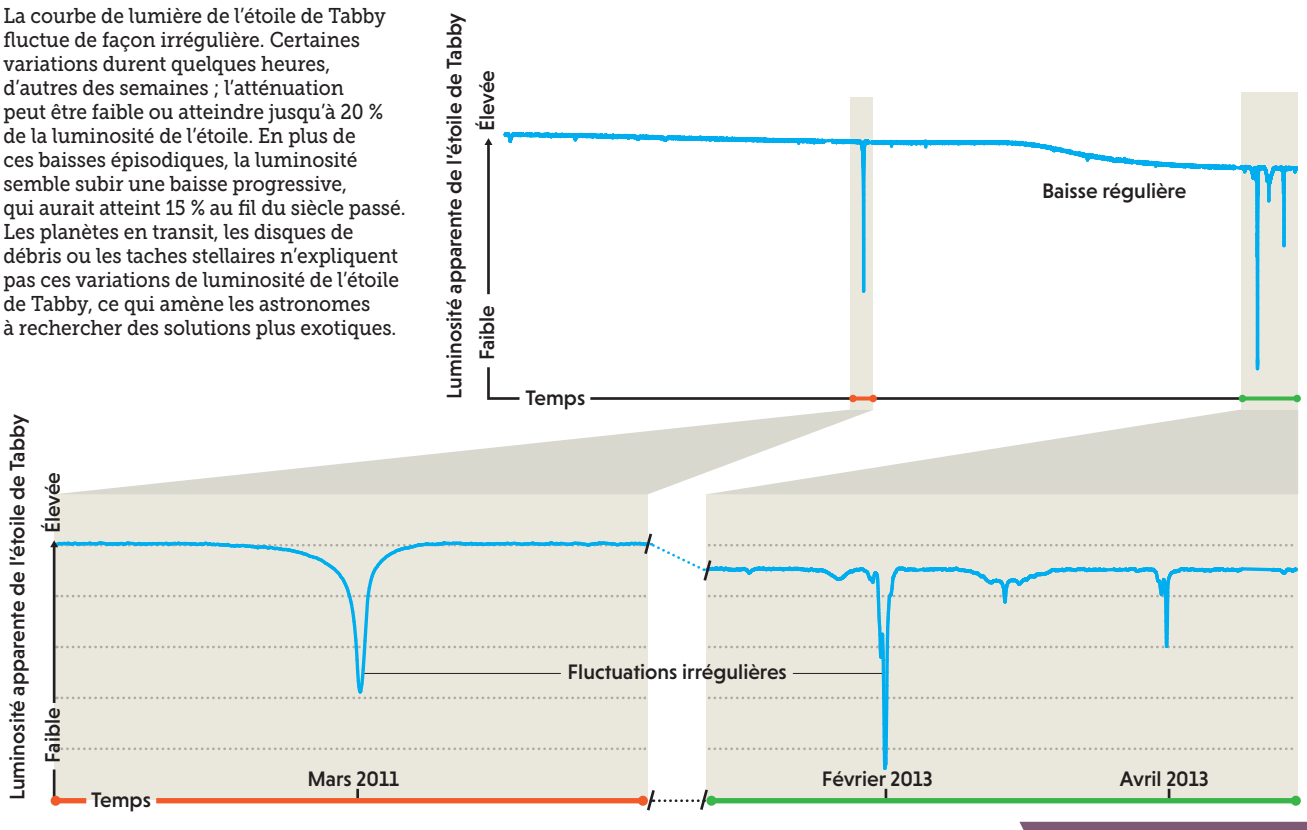
ÉTRANGE À PLUS D'UN TITRE

L'étoile de Tabby réservait une autre surprise. Dans le sillage de l'article WTF, l'astronome Bradley Schaefer, de l'université d'État de Louisiane, a affirmé, sur la base de données d'archives, que la luminosité de l'étoile de Tabby aurait globalement baissé de plus de 15 % en l'espace d'un siècle.

Cette affirmation a été très contestée, car une telle atténuation en quelques décennies semble pratiquement impossible à expliquer. Les étoiles conservent la même luminosité ou presque pendant des milliards d'années après leur naissance, et ne commencent à subir des changements accélérés que juste avant leur mort. Ces changements «rapides» ont en réalité lieu à des échelles de millions (plutôt que de milliards) d'années, et sont accompagnés de marqueurs clairs qui ne sont pas présents dans le cas de l'étoile de Tabby. D'après toutes les autres mesures réalisées, il s'agit d'une étoile banale et d'âge moyen. Rien ne laisse penser que ce serait une étoile variable, astre qui pulse à un rythme régulier. Il n'y a aucune indication qu'elle accréterait de la matière d'une étoile

2. L'ATYPIQUE ÉTOILE DE TABBYY

La courbe de lumière de l'étoile de Tabby fluctue de façon irrégulière. Certaines variations durent quelques heures, d'autres des semaines ; l'atténuation peut être faible ou atteindre jusqu'à 20 % de la luminosité de l'étoile. En plus de ces baisses épisodiques, la luminosité semble subir une baisse progressive, qui aurait atteint 15 % au fil du siècle passé. Les planètes en transit, les disques de débris ou les taches stellaires n'expliquent pas ces variations de luminosité de l'étoile de Tabby, ce qui amène les astronomes à rechercher des solutions plus exotiques.



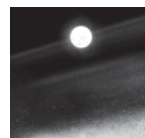
compagnon, aucun signe d'activité magnétique anormale et aucune raison de penser qu'elle pourrait être jeune et encore en formation, autant de situations qui justifieraient une modification rapide de luminosité. En fait, à part cette atténuation anormale de la luminosité, cette étoile semble parfaitement ordinaire.

L'affirmation de Bradley Schaefer est aussi soutenue par l'analyse des astronomes Benjamin Montet et Joshua Simon portant sur les données de calibration originales de *Kepler*. Ils ont trouvé que l'étoile de Tabby avait faibli d'environ 3 % sur les quatre années de la mission *Kepler*. Cet effet de long terme est aussi extraordinaire que les décrochements de courts termes.

PAS DE CANDIDAT PARFAIT

Il nous faut donc expliquer deux phénomènes qui défient l'entendement concernant l'étoile de Tabby : une lente diminution de luminosité sur au moins quatre ans (et peut-être tout le siècle dernier) et de nets décrochements irréguliers qui durent plusieurs jours, voire des semaines. Les astronomes préféreraient une explication rendant compte des deux phénomènes à la fois, mais force est de reconnaître que chacun est déjà difficile à expliquer séparément.

Parmi les nombreuses hypothèses avancées, nous avons sélectionné les six scénarios le plus souvent cités pour expliquer le comportement bizarre de l'étoile de Tabby. Nous présentons les arguments qui soutiennent ces idées, mais aussi leurs points faibles. Ces scénarios reposent parfois sur des idées assez spéculatives. Il y a donc une part assez subjective dans l'appréciation des scénarios proposés, selon que l'on juge ces idées plausibles ou non. Néanmoins, il est enrichissant de garder en tête toutes ces idées, et un œil critique, dans l'attente d'observations et de données supplémentaires sur cette curieuse étoile.



1. UN DISQUE DE POUSSIÈRE ET DE GAZ

Les décrochements irréguliers et l'atténuation lumineuse à long terme de l'étoile de Tabby s'observent ailleurs : autour de très jeunes étoiles ayant des planètes en formation. Une telle étoile est ceinturée d'un disque de gaz et de poussière, que l'astre chauffe. Lorsque des planètes s'y forment, des grumeaux et des anneaux s'y développent et le disque subit même des déformations. Dans les disques que nous voyons par la tranche, ces traits peuvent brièvement atténuer la luminosité de l'étoile. ➤

> Et des disques circumstellaires déformés peuvent arrêter une fraction croissante de la lumière de l'étoile sur des échelles de temps de l'ordre de la décennie ou du siècle.

Mais l'étoile de Tabby est d'âge moyen, et non jeune, et apparemment dépourvue d'un disque. D'ailleurs, si ce disque était présent, nous devrions détecter sa présence par des émissions électromagnétiques spécifiques. Il serait chauffé par le rayonnement de l'étoile et, comme tout objet chaud, il devrait émettre un rayonnement infrarouge. Or on n'observe rien de tel avec l'étoile de Tabby. Peut-être l'anneau de poussière et de gaz est-il très mince et très étalé autour de l'étoile, auquel cas il bloquerait la lumière le long de notre ligne de visée sans donner lieu à un excès d'infrarouge notable. Mais de tels anneaux n'ont jamais été vus autour d'étoiles d'âge moyen comme celle de Tabby. Comme ce scénario ne peut expliquer l'étoile de Tabby qu'en invoquant un phénomène jamais observé auparavant, nous pensons qu'il est très improbable.



2. UN ESSAIM DE COMÈTES

Selon l'une des premières hypothèses de Tabet Boyajian, des essaims de comètes géantes étaient à l'origine des baisses de luminosité de l'étoile. Les comètes, après tout, passent l'essentiel de leur temps loin de leur étoile et ont des orbites très excentriques, ce qui rendrait compte de l'irrégularité des baisses lumineuses. Cependant, comme dans le cas du disque de poussière, le rayonnement absorbé par les comètes les chaufferait, ce qui se traduirait par une signature infrarouge. Toutefois, la non-détection de ce rayonnement n'est pas aussi critique pour ce scénario. En effet, les comètes se réchauffent rapidement en s'approchant de leur étoile, mais se refroidissent tout aussi vite en s'en éloignant. Ainsi, presque tout le rayonnement infrarouge serait émis pendant le décrochement. Le surplus de rayonnement infrarouge serait difficile à séparer de la lumière de l'étoile. Ensuite, les comètes s'éloigneraient, déjà refroidies, et n'émettraient pas de chaleur détectable. Plus délicat : un essaim capable d'entraîner la mystérieuse atténuation à long terme devrait être très grand, ce qui ne manquerait pas de créer un excès d'infrarouge observable.

Ainsi, notre verdict est que l'explication par les comètes est plausible pour les décrochements ponctuels, les contraintes sur les émissions infrarouges étant moins sévères que dans le cas d'un disque. Mais il est beaucoup moins probable que les comètes expliquent le déclin lumineux à long terme. En fin de compte, il est difficile de penser que ce scénario explique le comportement de l'étoile de Tabby.

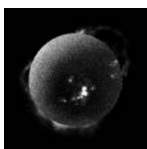


3. UN NUAGE DANS LE MILIEU INTERSTELLAIRE OU DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

L'espace interstellaire est parsemé de nuages de gaz et de poussière qui absorbent la lumière des étoiles situées en arrière-plan. Peut-être un tel nuage bloque-t-il une fraction variable de la lumière en fonction de la partie traversée par la ligne de visée de *Kepler* au cours de l'orbite du télescope autour du Soleil. Ce nuage ne serait pas homogène. Dès lors, les variations de densité expliqueraient la baisse régulière de la luminosité apparente de l'étoile sur de longues périodes, avec des concentrations ponctuelles de matière qui entraîneraient les brèves atténuations extrêmes.

Valeri Makarov, de l'Observatoire naval des États-Unis, et son collègue Alexey Goldin ont proposé une autre explication pour les petites fluctuations, où la baisse de luminosité est inférieure à 7%. Ils suggèrent qu'il existe une autre étoile dans l'alignement de l'étoile de Tabby. Les petites baisses correspondraient à des occultations par des essaims de minuscules nuages denses ou de comètes dans l'espace interstellaire de cette étoile. Cette hypothèse est plausible.

Toujours dans l'idée d'un nuage de matière, ce dernier pourrait se situer à la périphérie du Système solaire. Dans ce cas, l'orbite de *Kepler* autour du Soleil ferait traverser à la ligne de visée du satellite ce même nuage tous les ans, mais nous ne voyons pas de répétition annuelle des baisses de luminosité de l'étoile de Tabby. De plus, nous n'avons pas d'autres indices de l'existence de ce nuage, ni de son origine possible. Nous pourrions imaginer un nuage de glace et de vapeur produit par des geysers sur un corps de type Pluton beaucoup plus éloigné du Soleil. Les planétologues n'ont pas encore d'éléments pour appuyer cette piste, que nous jugeons concevable mais peu probable.



4. DES VARIATIONS STELLAIRES INTRINSÈQUES

L'éclat des étoiles change quand elles commencent à épuiser les réserves de combustible en leur cœur. Mais cela se produit à des échelles de millions d'années, et pas de siècles ou de jours, et cela à la fin de la vie de l'étoile, pas au milieu. En revanche, des phénomènes naturels tels que des taches stellaires ou des éruptions, que l'on observe aussi sur le Soleil, modifient l'éclat des étoiles à des échelles temporelles plus courtes. Nous n'aurions, *a priori*, plus besoin d'invoquer des nuages de gaz et des comètes si les décrochements irréguliers sont expliqués par des variations d'éclat résultant de processus physiques internes à l'étoile de Tabby.

TABBY, UNE ÉTOILE POURTANT ORDINAIRE

TYPE D'ÉTOILE

Étoile jaune-blanc
de la séquence principale

DISTANCE

1 280 années-lumière
(dans la constellation
du Cygne)

MASSE

1,43 masse solaire

RAYON

1,58 rayon solaire

TEMPÉRATURE

6 750 kelvins
(environ 6 500 °C)

MAGNITUDE APPARENTE

11,7 (invisible à l'œil nu)

Récemment, Mohammed Sheikh et ses collègues, de l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, ont effectué une analyse statistique des temps caractéristiques, des profondeurs et des durées des baisses de luminosité à court terme. Ils ont trouvé une distribution en «loi de puissance» caractéristique d'une transition de phase continue (comme lorsque des aimants se réalignent en présence de champs magnétiques externes). Selon eux, cette distribution suggère que les baisses de luminosité de l'étoile



5. TROUS NOIRS

Dans le grand public, certains ont imaginé la possible implication d'un trou noir. Selon une idée assez répandue, un trou noir de masse

stellaire en orbite rapprochée autour de l'étoile de Tabby pourrait en bloquer la lumière. Mais cette hypothèse souffre de trois failles. Tout d'abord, un tel trou noir tirerait l'étoile tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, créant un mouvement oscillant facilement détectable, que l'équipe de Tabetha Boyajian a recherché en vain. Ensuite, les trous noirs de masse stellaire sont beaucoup plus petits que les étoiles, si bien qu'un trou noir n'arrêterait qu'une infime fraction de la lumière stellaire. En fait, le champ gravitationnel intense d'un trou noir, contrairement à l'intuition, aurait pour effet d'amplifier la brillance de l'étoile, en focalisant la lumière par un effet de lentille gravitationnelle. Et, dernière faille, quand du gaz et de la poussière tombent dans un trou noir, la matière est soumise à de formidables frottements qui la chauffent. Elle émet alors fortement à toutes les longueurs d'onde. S'il y avait vraiment un trou noir en orbite autour de l'étoile de Tabby, nous devrions nous attendre à une augmentation, et non à une diminution, de la luminosité, ce qui n'est clairement pas le cas.

Pas de trou noir, donc? Ce n'est pas si simple. Nous venons d'expliquer pourquoi le trou noir ne peut être proche de l'étoile de Tabby. Mais il pourrait être plus lointain, à la dérive quelque part entre l'étoile de Tabby et nous. Imaginez un tel trou noir ayant en orbite autour de lui un grand disque froid de matière, comme les anneaux de Saturne, mais plus grand que le Système solaire entier. Ce disque pourrait présenter une région externe presque transparente et une région interne plus dense. Un tel disque entraînerait le déclin à long terme de l'étoile de Boyajian en occultant sa lumière d'abord avec sa région presque transparente, puis avec sa région interne dense, une dérive à travers notre ligne de visée qui pourrait prendre au moins cent ans. Les décrochements lumineux irréguliers de l'étoile pourraient alors être les ombres projetées par les sous-structures du disque en transit. Un tel trou noir (et son hypothétique disque) aurait échappé aux mesures d'imagerie à haute résolution de Tabetha Boyajian parce qu'il n'émettrait lui-même aucune lumière.

Comme nous n'avons pas de preuves observationnelles que certains trous noirs s'accompagnent de disques froids étalés, ce scénario semble un peu tiré par les cheveux. Mais les théoriciens prédisent l'existence de tels disques en tant que sous-produits des supernovæ qui donnent naissance à des trous noirs de masse stellaire. De plus, les chercheurs ont estimé que ➤

Chaque scénario a son lot de spéculations et d'hypothèses qu'il reste à démontrer

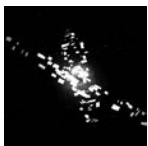
de Tabby sont dues à sa situation au seuil d'une transition interne, telle qu'une inversion globale de son champ magnétique.

Mais aucune étoile du type de celle de Tabby n'a jamais présenté une telle activité. En fait, l'étoile est trop chaude pour avoir le type de dynamo stellaire qui engendre des effets magnétiques au sein d'étoiles plus froides, telles que le Soleil. Plus problématique encore, les champs magnétiques stellaires ne pourraient pas être responsables du déclin lumineux à long terme que nous observons.

L'astronome Brian Metzger, de l'université Columbia, et ses collègues ont avancé une explication peut-être plus simple. Une planète ou une naine brune serait entrée en collision avec l'étoile de Tabby. La collision aurait entraîné une augmentation temporaire de la luminosité de l'étoile, et le déclin lumineux à long terme que nous observons correspondrait alors au retour à la normale de l'étoile. Ce scénario n'explique pas les baisses ponctuelles irrégulières ou la forme précise de l'obscurcissement à long terme vu par Benjamin Montet et Joshua Simon dans les données de calibration de *Kepler*, mais de futures études, plus détaillées, apporteront peut-être des arguments en sa faveur.

Pour ces raisons, nous pensons que le scénario de la fusion est intéressant, mais demande à être examiné plus précisément. Les autres explications nous semblent plus improbables.

> les chances sont non nulles qu'un tel trou noir doté d'un disque soit passé devant au moins une des 150 000 étoiles suivies par *Kepler* au cours de ses quatre années de relevé. Ce scénario est donc assez raisonnable.



6. DES MÉGASTRUCTURES EXTRATERRESTRES

Jusqu'à présent nous avons considéré des scénarios qui reposaient sur des explications naturelles. Aucune ne

se détache particulièrement, chacune ayant son lot de spéculations, d'hypothèses qui restent à démontrer, etc. Ainsi, à ce stade, rien ne nous interdit d'envisager une explication plus sensationnelle : une mégastructure extraterrestre, dans la veine de celle que décrivait Freeman Dyson il y a plus d'un demi-siècle.

Imaginez qu'une civilisation extraterrestre ait construit un grand nombre de panneaux collecteurs d'énergie et que ces panneaux aient tout un éventail de tailles et d'orbites autour de l'étoile. L'effet combiné des panneaux de l'essaim serait de bloquer une fraction de la lumière de l'étoile.

Quand des parties plus denses de l'essaim entrent ou sortent de notre ligne de visée, nous verrions des variations de luminosité sur des durées allant de quelques heures pour les unes ou plusieurs siècles pour les autres. Comme l'a noté il y a plus d'une décennie l'astronome Luc Arnold, des panneaux ou des groupes de panneaux particulièrement grands volant en formation (peut-être même plus grands que l'astre lui-même) entraîneraient d'énormes baisses discontinues de luminosité liées à leur forme géométrique au moment des transits.

Comme pour l'hypothèse du disque circumstellaire, le manque d'émission infrarouge est encore un problème. Même les mégastructures extraterrestres doivent obéir aux lois fondamentales de la physique, et donc toute énergie de l'étoile qu'elles interceptent doit *in fine* être rayonnée sous forme de chaleur. Cette exigence reste valable quelle que soit l'efficacité énergétique de leur technologie : l'énergie ne peut pas être détruite, et si elles en recueillent beaucoup, elles doivent également en perdre beaucoup à plus ou moins long terme. La signature infrarouge semble inévitable.

Il y a néanmoins des manières de rendre l'hypothèse tenable : une mégastructure sous forme d'essaim pourrait convertir l'énergie recueillie sous forme de signaux radio ou laser au lieu de chaleur ; elle pourrait ne pas former un essaim sphérique, mais un anneau aligné précisément avec notre ligne de visée, et les émissions seraient alors dirigées dans une direction qui échappe à nos détecteurs ; elle pourrait utiliser une technologie échappant à notre compréhension de la physique et n'émettant aucune

RENDEZ-VOUS EN 2021 ?

L'étoile de Tabby continue à se comporter de façon étonnante. Le 19 mai 2017, les astronomes ont observé une nouvelle chute de sa luminosité. Les chercheurs ont suivi en direct ce décrochement qui a duré cinq jours avant le retour à la normale. La baisse était de 2,5 % par rapport à la luminosité d'avant le 19 mai. C'est la première baisse épisodique observée depuis les résultats obtenus par *Kepler* entre 2011 et 2013. Une autre baisse a suivi en juin.

chaleur. À cause de la multitude d'inconnues, ce scénario est très difficile à tester.

L'idée des mégastructures extraterrestres serait donc à considérer sérieusement si toutes les hypothèses naturelles sont écartées. À l'inverse, elle serait étayée si nous détectons des signaux radio clairement artificiels émis depuis le voisinage de l'étoile de Tabby, une recherche que nous avons entamée avec Tabettha Boyajian à l'aide du télescope de Green Bank, en Virginie-Occidentale, aux États-Unis. Pour l'instant, il est difficile de se prononcer sur cette hypothèse extravagante : nous n'en savons tout simplement pas assez pour estimer, même grossièrement, la probabilité des capacités techniques d'une hypothétique vie extraterrestre.

UN AVENIR INCONNU MAIS RADIEUX

Quel bilan tirer de toutes ces tentatives pour expliquer le comportement de l'étoile de Tabby ? Nous pouvons exclure toute explication qui conduit à un excédent naturel d'énergie infrarouge, puisque nous n'en observons pas. Nous pouvons aussi rejeter des scénarios qui font intervenir de nombreux événements peu probables, ou qui invoquent une physique ou des objets que nous n'avons jamais vus auparavant, au moins jusqu'à ce que toutes les autres options aient été éliminées.

Le meilleur moyen d'avancer est de récolter davantage d'informations sur l'étoile. En 2013, *Kepler* a cessé de prendre des données, à la suite

Grâce à un réseau d'observatoires, les données ont été enregistrées dans différentes gammes du spectre, notamment dans l'infrarouge, une gamme de fréquences cruciale pour tester certaines idées. Ces données sont en cours d'analyse et il est encore trop tôt pour conclure.

Quelques jours après ces observations, un nouveau scénario a été proposé par Fernando Ballesteros, de l'université de Valence, en Espagne, et ses collègues. L'hypothèse est qu'une planète entourée d'un anneau et en orbite autour de Tabby aurait produit le décrochement observé en 2011. Cette planète serait accompagnée d'astéroïdes troyens, c'est-à-dire des corps qui occupent deux régions gravitationnellement stables sur l'orbite de la planète (les points de Lagrange à 60° en avance et en retard sur la planète, comme les Troyens de Jupiter). Les perturbations de 2013 correspondraient aux Troyens qui suivent la planète. Les chercheurs anticipent donc une future baisse en 2021, lorsque les Troyens qui devancent la planète reviendront dans notre ligne de mire. Quant à la baisse de mai dernier, elle correspondrait au passage du point de Lagrange exactement à l'opposé de la planète par rapport à son étoile. Il pourrait aussi être occupé par quelques astéroïdes de passage.

de problèmes techniques de stabilisation du satellite. Tabetha Boyajian, aujourd'hui maître de conférences à l'université d'État de Louisiane, a mobilisé le grand public avec une campagne de financement participatif. Nous avons pu acheter du temps sur le Réseau mondial de télescopes de l'observatoire de Las Cumbres, situé en Californie et géré par une fondation privée à but non lucratif. Nous suivons l'étoile plusieurs fois par jour et, si sa lumière baisse à nouveau, nous avons plusieurs télescopes prêts à entrer en action pour mesurer le spectre de la lumière manquante, ce qui nous indiquera la composition de la matière intermédiaire. Et c'est bien ce qui a été observé en mai et en juin derniers (voir l'encadré page ci-contre).

D'autres astronomes cherchent à compléter les mesures au travers des données d'archives afin d'en apprendre davantage sur le déclin de la luminosité de l'étoile à long terme. La connaissance de l'échelle temporelle de l'atténuation contraindrait encore un peu plus les théories sur l'étrange courbe de lumière de l'étoile et nous donnerait des pistes pour rechercher des indices observationnels supplémentaires.

Nous attendons aussi une meilleure mesure de la distance de l'étoile de Tabby (par la mission *Gaia* de l'Agence spatiale européenne) qui aiderait à éliminer certaines hypothèses. Si l'étoile est plus proche que 1300 années-lumière, la quantité de gaz et de poussière du milieu interstellaire dans la ligne de visée serait insuffisante pour expliquer le niveau actuel d'atténuation. Si, en revanche, la distance est d'environ 1500 années-lumière (la meilleure estimation actuelle), l'atténuation à long terme pourrait éventuellement être due à des motifs aléatoires de répartition de la poussière le long de la ligne de visée. Mais si l'étoile est beaucoup plus éloignée que cela, elle est alors plus lumineuse qu'on ne le pensait, et l'atténuation correspondrait à un retour à la normale après une fusion, comme l'a suggéré Brian Metzger.

En attendant d'autres données du télescope de Green Bank, de l'observatoire de Las Cumbres et de *Gaia*, nos spéculations sur l'étoile de Tabby ne connaissent que les limites de notre imagination et d'une bonne dose de physique. Comme avec les meilleures énigmes de la nature, la quête de la vérité pour cette étoile mystérieuse est loin d'être terminée. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. J. Ballesteros et al., **KIC 8462852 : Will the Trojans return in 2021 ?**, soumis à *MNRAS*, 31 mai 2017.

M. A. Sheikh et al., **Avalanche statistics identify intrinsic stellar processes near criticality in KIC 8462852**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117(26), article 261101, 2016.

T. S. Boyajian et al., **Planet Hunters IX. KIC 8462852 : Where's the flux ?**, *MNRAS*, vol. 457(4), pp. 3988-4004, 2016.

M. Kenworthy, **Une exoplanète aux anneaux géants**, *Pour la Science*, n° 464, juin 2016.

65ème Congrès des Professeurs
de Physique et de Chimie
LIMOGES
du 28 au 31 octobre 2017

Terre de lumière

udppc www.udppc.asso.fr

Avec la participation de :

Julien BOBROFF

La quantique à l'œil nu

Thierry CHARTIER

Technologies Additives : une nouvelle façon de penser la fabrication de pièces céramiques

Cécile FERRARI

Dernières nouvelles du système solaire

Maurice MASHAAL

Journalisme versus pédagogie

Clotilde POLICAR

Les métaux et le vivant : des défis pour le chimiste

François REYNAUD

ALOHA : Astronomical Light Optical Hybrid Analysis.
Proposer un nouveau concept d'imagerie haute résolution en changeant la couleur de la lumière des étoiles

Nouveauté 2017 : Une journée découverte du patrimoine culturel et scientifique avec des visites offertes*

*Sous réserve du nombre de places

L'ESSENTIEL

> Plancton, mollusques, coraux et autres organismes marins calcifiants ne sont pas les seuls à être menacés par l'acidification des océans.

> Des expériences montrent que les sens des poissons-clowns, des poissons-demoiselles

et des requins se brouillent lorsqu'ils sont exposés à une eau plus acide.

> Cette confusion a un impact sur les comportements de chasse des prédateurs et de défense des proies.

L'AUTEURE



DANIELLE L. DIXON
maîtresse de conférence en science
et politique marines à l'université
du Delaware, à Newark, aux États-Unis

Poissons sous acide

