

Une bibliothèque numérique cunéiforme

par Cécile Michel, sur le blog Brèves mésopotamiennes

Alors que le Proche-Orient est à feu et à sang, les sites antiques pillés, les objets archéologiques détruits ou vendus, un groupe international d'assyriologues bâtit depuis un peu plus de quinze ans une gigantesque bibliothèque numérique de textes cunéiformes : Cuneiform Digital Library Initiative (CDLI, <http://cdli.ucla.edu>), dans le cadre d'un projet commun entre l'université de Californie à Los Angeles et l'institut Max Planck d'histoire des sciences, à Berlin. Il s'agit de rendre accessibles à tous, sur Internet, les textes en caractères cunéiformes imprimés sur l'argile fraîche, ou plus rarement gravés sur pierre, écrits par les habitants du Proche-Orient ancien entre 3400 avant notre ère et 75 de notre ère.

On a découvert entre un demi-million et un million de ces textes, dont plus de 300 000 sont déjà catalogués dans cette bibliothèque numérique. Les fiches les plus complètes contiennent des photos de l'objet, une translittération et une traduction en anglais, allemand ou français. Cette base de données unique permet aux assyriologues d'accéder depuis chez eux aux textes cunéiformes conservés dans les musées et collections privées à travers le monde. Des outils de recherche par collection, par période, par site, par type de texte, voire par séquence de signes dans les translittérations leur permettent de mener des études historiques, philologiques ou thématiques, dont les résultats ont vocation à être publiés dans le *CDLI Journal* ou le *CDLI Bulletin*.

Le projet du CDLI est financé par des fondations depuis une quinzaine d'années. Depuis 2015, un nouvel outil, le RTI viewer (*Reflectance Transformation Imaging*), permet d'explorer les images en très haute



Cette tablette cunéiforme du XIX^e siècle avant notre ère, référencée dans la CDLI, retranscrit la gestion d'un troupeau de bovins et la production de beurre et de fromage attendue en fonction de normes fixées à l'avance.

résolution en changeant la direction de l'éclairage. Depuis l'an passé, un catalogue complet de la collection du musée du Louvre, soit 12 520 entrées, est également en ligne.

Le CDLI est destiné aux assyriologues, mais aussi à un public plus large qui peut se promener dans ce musée virtuel des textes cunéiformes. Une application pour iPad permet même de se familiariser avec la production écrite mésopotamienne, grâce à des fiches présentant de très nombreux objets et des techniques de numérisation.

En lien avec le CDLI, le projet *Open Richly Annotated Cuneiform Corpus* (ORACC, <http://oracc.museum.upenn.edu/>), présente des corpus ciblés de textes cunéiformes définis par périodes, archives ou thématiques spécifiques. On peut ainsi découvrir la correspondance reçue par les rois assyriens, et lire les lettres envoyées par les

astrologues tentant, par différents subterfuges, de détourner les mauvais présages de la personne royale. On trouve aussi les listes de vocabulaire antique utiles aux scribes qui devaient apprendre le sumérien, une langue morte aux II^e et I^{er} millénaires.

Également liée au CDLI, l'encyclopédie numérique bilingue intitulée *cdli:wiki* (<http://cdli.ox.ac.uk/wiki>) est en cours de construction par une équipe franco-britannique de chercheurs. Outre des notices thématiques, cette encyclopédie comprend des entrées sur les différents systèmes numériques et métrologiques, sur la chronologie et les calendriers en usage, ou encore une présentation des cent objets inscrits en cunéiforme les plus importants pour les historiens d'aujourd'hui, dont la liste commence par le célèbre Code de Hammurabi (XVIII^e siècle avant notre ère), conservé au musée du Louvre.

Même si cela ne remplace pas le travail en musée, la bibliothèque numérique du CDLI permet aux assyriologues de continuer leur travail de déchiffrement sur les textes cunéiformes conservés dans les musées du Proche-Orient, en particulier de Syrie, inaccessibles depuis plusieurs années. Et d'offrir au grand public un accès à l'un des patrimoines les plus remarquables de l'humanité ! ■



Cécile MICHEL
est assyriologue et directrice de recherche CNRS au laboratoire Archéologies et sciences de l'Antiquité, à Nanterre. Elle tient le blog Brèves mésopotamiennes (www.scilogs.fr/brevs-mesopotamiennes).



Retrouvez tous nos blogueurs sur www.SciLogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.

La longue traque de la PLANÈTE X

Michael Lemonick

Existe-t-il une planète géante aux confins
du Système solaire ? Des simulations numériques
et des études théoriques suggèrent que oui.
Il ne manque qu'une observation directe pour confirmer
cette hypothèse ancienne !



L'ESSENTIEL

- La trajectoire étonnante de certains corps glacés en orbite lointaine autour du Soleil suggère qu'il existe une neuvième planète dans le Système solaire.
- Selon des travaux récents, cette planète serait dix fois plus massive que la Terre et son orbite la placerait loin au-delà de Neptune.
- L'observation directe devra confirmer la présence de cet objet lointain. Celui-ci défie les télescopes actuels, mais il sera peut-être à la portée des prochains observatoires.

Ron Miller

■ L'AUTEUR



Michael LEMONICK est journaliste scientifique et éditeur pour *Scientific American*. Il est

l'auteur de nombreux ouvrages sur l'astronomie.

« Nous observons des choses étonnantes dans le Système solaire que nous ne savons pas encore expliquer »

Nathan Kaib

Combien y a-t-il de planètes dans le Système solaire ? La plupart d'entre nous ont appris qu'il y en avait neuf. Cela incluait Pluton, qui a été déclassée en planète naine en 2006. Il y aurait donc huit planètes dans le Système solaire, mais ce décompte pourrait changer. En effet, l'étude de certains objets aux confins du Système solaire suggère qu'une neuvième planète, dix fois plus massive que la Terre, pourrait se cacher dans cette région éloignée.

Ces objets appartiennent à un vaste nuage de corps glacés qui forment la ceinture de Kuiper. Mais ils se démarquent par des trajectoires très étranges : leur orbite est particulièrement étirée autour du Soleil (alors que la plupart des planètes ont une trajectoire quasi circulaire) et, même au plus proche du Soleil, ces corps restent au-delà de l'orbite de Neptune.

Toutefois, l'originalité de ce petit groupe, qui a éveillé la curiosité des astronomes, porte sur une autre caractéristique de leur orbite. La plupart des objets de la ceinture de Kuiper, nommés KBO pour *Kuiper Belt Objects*, se déplacent chacun suivant une ellipse dans un plan incliné par rapport à celui de l'écliptique (le plan défini par l'orbite de la Terre autour du Soleil) et sont tantôt au-dessus du plan de l'écliptique, tantôt au-dessous. L'« argument du périhélie », un angle qui relie la position du périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil) et le point où l'orbite croise le plan de l'écliptique permet de décrire ces trajectoires. Les KBO qui intéressent les astronomes ici (de quatre à douze selon qui les répertorie) ont la particularité d'avoir un argument du périhélie proche de l'angle zéro : leur périhélie se situe sur le plan de l'écliptique.

En raison des interactions gravitationnelles complexes dans le Système solaire, les arguments du périhélie de ces objets auraient dû varier et devenir quasi aléatoires au cours du temps. Scott Sheppard, un astronome de l'institut Carnegie pour les sciences, aux États-Unis, a estimé que la probabilité que ces objets de la ceinture de Kuiper présentent fortuitement cette même caractéristique est de l'ordre du pourcent.

Cette probabilité équivaut à celle d'obtenir dix fois *pile* d'affilée avec une pièce de monnaie. C'est rare, mais pas impossible. Mais une telle série de *pile* pourrait aussi signifier que la pièce est truquée. Et il en va de même pour ces objets de la ceinture

de Kuiper : un mécanisme à identifier est peut-être à l'œuvre et aurait conduit à cette configuration orbitale. L'une des hypothèses est la présence d'une planète inconnue et bien plus massive que la Terre. Si un tel objet, qui a été surnommé « planète X », existe, il pourrait être dix fois plus distant du Soleil que Neptune et il serait alors trop peu lumineux pour être observé par un télescope. Situé dans les confins du Système solaire, son influence gravitationnelle expliquerait les anomalies observées dans les orbites des KBO qui s'aventurent le plus loin du Soleil.

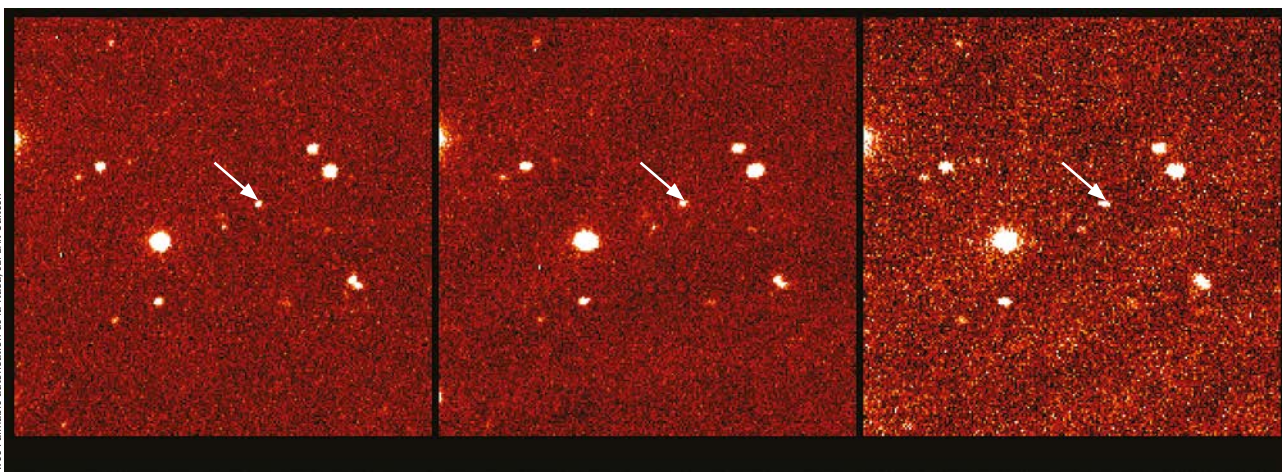
Cette hypothèse ancienne est revenue à la une de l'actualité. En janvier 2016, Konstantin Batygin et Michael Brown, de l'institut de technologie de Californie, ont présenté des arguments théoriques issus de simulations numériques qui renforcent sérieusement l'idée de la planète X.

Des observations inexplicables

Nathan Kaib, de l'institut Carnegie pour les sciences, explique la situation actuelle : « Nous n'avons pas la preuve définitive qu'une telle planète se cache aux confins du Système solaire. Mais nous observons des choses étonnantes que nous ne savons pas encore expliquer. » Si de plus en plus d'astronomes envisagent que la solution est la planète X, de nombreux spécialistes continuent de douter et demandent à être convaincus par une observation directe de l'astre caché. En effet, cette hypothèse a été longtemps tournée en ridicule car l'histoire de l'astronomie est parsemée de cas de planètes mystérieuses dont l'existence était déduite d'anomalies dans les orbites d'autres objets, des propositions qui se révélaient incorrectes. Pourtant, certaines de ces annonces sont devenues des découvertes majeures.

Le premier cas de recherche d'une planète cachée date du XIX^e siècle, lorsqu'on a remarqué que l'orbite d'Uranus (découverte par hasard par William Herschel en 1781) ne respectait pas scrupuleusement les lois de la gravitation de Newton. Plusieurs scientifiques ont imaginé qu'une planète inconnue, voisine d'Uranus, perturbait celle-ci. L'histoire leur a donné raison. En 1846, l'astronome allemand Johann Galle découvrit Neptune dans la région du ciel indiquée par les calculs du Français Urbain Le Verrier.

Au début du XX^e siècle, l'astronome amateur Percival Lowell, issu d'une riche famille de Boston, s'est mis à chercher une



SEDNA EST UN OBJET TRANSNEPTUNNIEN d'environ 1 000 kilomètres de diamètre. Sous l'œil du télescope Palomar, en Californie, il est identifié sur ces trois clichés pris à une heure et demie d'écart. Découvert

en 2003, Sedna ne s'approche jamais du Soleil à moins de 76 unités astronomiques [76 fois la distance moyenne Terre-Soleil]. Son orbite hors norme pourrait être soumise à l'influence gravitationnelle de la planète X.

autre planète cachée depuis son observatoire privé à Flagstaff, dans l'Arizona. Son projet était motivé par des anomalies relevées dans les orbites d'Uranus et de Neptune. En 1930, Clyde Tombaugh, assistant à l'observatoire Lowell, a trouvé Pluton pratiquement là où les calculs l'indiquaient.

Ce succès semblait reproduire exactement les principes qui ont conduit à la découverte de Neptune. Cependant, la détection de Pluton était le fruit d'un heureux hasard. En effet, pour expliquer les anomalies, Pluton devait avoir la taille de Jupiter, alors qu'elle s'est révélée plus petite que la Lune. La contradiction a fini par disparaître : les anomalies étaient en fait dues à des erreurs de calcul. Pluton était juste au bon endroit au bon moment.

Et Pluton fut déclassée

Dans les années 1980, les planétologues ont suspecté que Pluton n'était peut-être pas seule dans cette région du Système solaire, mais juste le premier membre connu d'un vaste nuage de débris. En 1992, le deuxième corps de la ceinture de Kuiper a été découvert, et l'on a dénombré depuis plus de 1 500 planétoïdes. La découverte d'Éris en 2005, d'une taille équivalente à Pluton et un peu plus massive, souleva la question du statut planétaire de Pluton. Si la ceinture de Kuiper cachait d'autres objets aussi importants, il y aurait une profusion de nouvelles planètes. En 2006, l'Union internationale d'astronomie a alors décidé de reclasser Pluton dans la catégorie des planètes naines.

En étudiant ces planétoïdes de la ceinture de Kuiper, les astronomes se sont interrogés sur le scénario de leur formation. Ils sont trop massifs pour se former aussi loin du Soleil, où le disque protoplanétaire contenait peu de gaz et de poussière. À partir de simulations numériques, les chercheurs ont montré que ces corps seraient nés dans la région occupée aujourd'hui par Neptune. Comment ont-ils migré ? Peu après sa formation, le Système solaire était soumis à un régime chaotique et les planètes géantes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) ont probablement changé d'orbite et migré sur des centaines de millions de kilomètres. Leur influence gravitationnelle aurait alors déstabilisé les KBO, les éjectant vers les confins du Système solaire. Dans certaines simulations de ce processus, une planète géante est éjectée ; certains pensent donc qu'il y aurait eu cinq planètes géantes, et celle qui a été perdue serait la planète X.

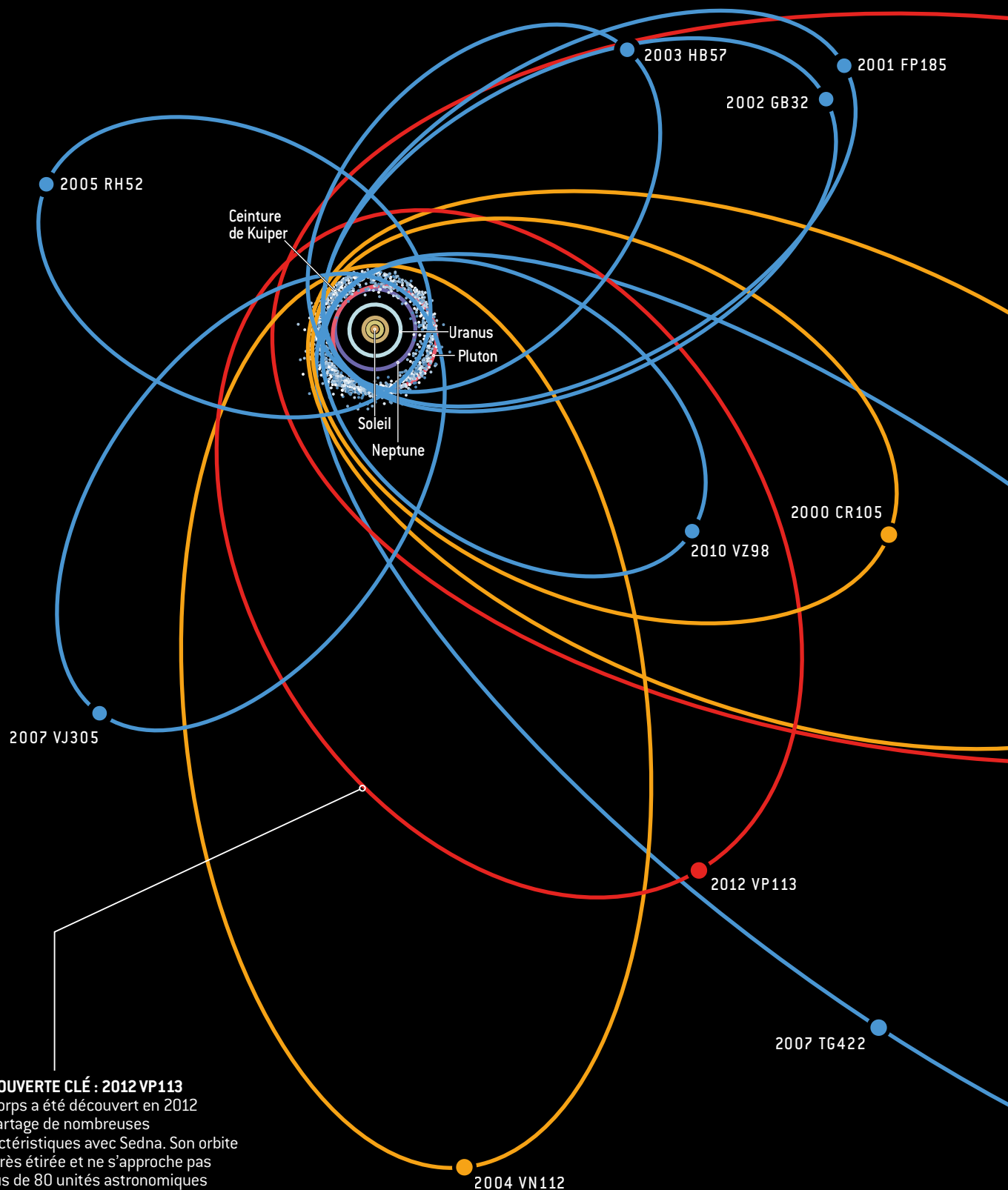
Ainsi, une super-Terre (une planète de quelques masses terrestres) formée dans les premiers temps du Système solaire pourrait se cacher au-delà de l'orbite de Neptune. La notion même de super-Terre n'est pas si exotique : de telles planètes ont été découvertes en nombre autour d'autres étoiles ces vingt dernières années. À tel point que certains planétologues s'interrogent sur l'absence d'un tel objet dans le Système solaire.

À partir des années 2000, Ben Bromley, de l'université de l'Utah, et Scott Kenyon, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, ont simulé le destin d'une super-Terre qui se serait formée dans la région occupée actuellement par Jupiter

et Saturne. Dans la plupart des scénarios, la dynamique globale du système conduit l'orbite de cette planète à s'étirer de plus en plus, jusqu'à ce que la super-Terre soit éjectée du Système solaire. Mais si le phénomène se produit très tôt, quelque 10 millions d'années après la naissance des planètes, le gaz du disque protoplanétaire, pas encore complètement dissipé, freine la super-Terre, qui adopte une orbite quasi circulaire aux confins du Système solaire.

Lorsque Ben Bromley et Scott Kenyon ont entamé leurs travaux sur les super-Terres, personne n'avait encore imaginé la présence d'une telle planète au-delà de la ceinture de Kuiper. La situation a commencé à changer lorsque, en 2003, Mike Brown, Chad Trujillo, de l'observatoire Gemini, à Hawaï, et David Rabinowitz, de l'université Yale, ont découvert Sedna (voir la figure ci-dessus). Malgré de nombreux points communs avec Pluton, Éris et les autres KBO, ce corps glacé hors norme, d'un diamètre de 1 000 kilomètres, se distingue par sa trajectoire. Sedna ne s'approche pas à plus de 76 unités astronomiques du Soleil (l'UA désigne la distance moyenne Terre-Soleil, environ 150 millions de kilomètres) ; c'est plus du double de la distance Neptune-Soleil. Sedna s'en éloigne jusqu'à 930 UA sur son orbite allongée, qu'elle met 11 400 ans à parcourir.

Comme le souligne Chad Trujillo, les chercheurs étaient surpris par cette découverte, car rien ne permettait d'expliquer l'existence de Sedna. Sa trajectoire étirée rappelle celle des comètes, mais, contrairement à ces dernières, Sedna n'est pas soumise à l'influence gravitationnelle des planètes géantes.



DÉCOUVERTE CLÉ : 2012 VP113

Ce corps a été découvert en 2012 et partage de nombreuses caractéristiques avec Sedna. Son orbite est très étirée et ne s'approche pas à plus de 80 unités astronomiques du Soleil. Il effectue une révolution en 4 300 ans et s'éloigne jusqu'à 446 unités astronomiques de l'étoile.

Les objets lointains du Système solaire

Bien au-delà des huit planètes, de la ceinture d'astéroïdes et même de la ceinture de Kuiper, les astronomes ont découvert une dizaine d'objets dont les orbites sont atypiques. Ces corps glacés suivent tous des trajectoires très allongées autour du Soleil et restent bien au-delà de l'orbite de Neptune.

Ils partagent une autre caractéristique : ils atteignent leur périhélie – le point de l'orbite le plus proche du Soleil – quand ils croisent le plan de l'écliptique (le plan défini par l'orbite de la Terre autour du Soleil). L'influence gravitationnelle d'une super-Terre très distante du Soleil expliquerait ces propriétés.

DIX AUTRES OBJETS

Les astronomes ont trouvé dix autres objets qui présentent des points communs avec Sedna et 2012 VP113. Leur distance moyenne au Soleil est supérieure à 150 unités astronomiques (UA). On peut les classer en trois catégories : ceux associés au nuage d'Oort interne, qui n'approchent pas à moins de 50 UA, ceux qui s'approchent entre 40 et 50 UA et ne sont pas soumis à l'influence gravitationnelle de Neptune, et ceux qui frôlent l'orbite de Neptune, vers 30 UA.

Trois catégories d'objets lointains

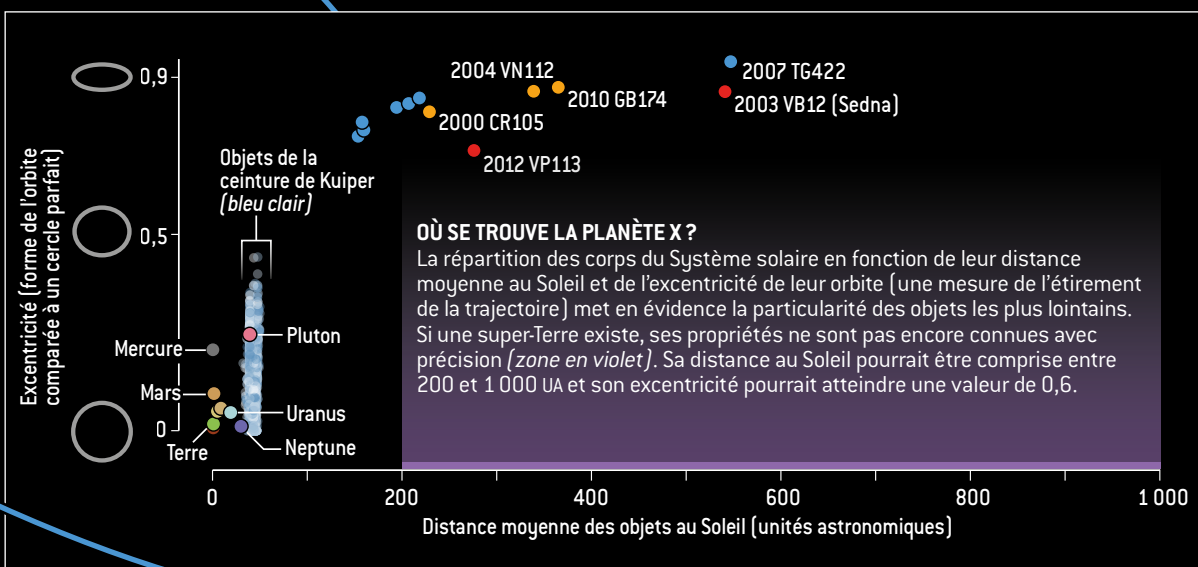
- Objets du nuage d'Oort interne
- Objets non soumis à l'influence de Neptune
- Objets épars

2003 VB12 (Sedna)

2010 GB174

DÉCOUVERTE CLÉ : SEDNA

Repéré en 2003, Sedna est un des objets connus les plus éloignés dans le Système solaire. Son orbite est très étonnante. Ce planétoïde gelé, de 1 000 kilomètres de diamètre, s'éloigne jusqu'à 930 unités astronomiques du Soleil et ne s'en approche pas à moins de 76 unités astronomiques. Il met 11 400 ans pour décrire un tour complet.



Une nouvelle piste pour la planète X



Les planétologues Mike Brown (à gauche) et Konstantin Batygin (à droite), de l'institut de technologie de Californie, ont étudié une poignée de corps de la ceinture de Kuiper dont les orbites présentent des anomalies. Grâce à des simulations numériques, ils confortent l'hypothèse qu'une planète cachée est à l'origine de ces singularités. Konstantin Batygin nous explique leurs travaux.

POUR LA SCIENCE

Les objets que vous avez étudiés étaient déjà ceux au cœur des travaux de Chad Trujillo et Scott Sheppard en 2014. Quelle est la nouveauté dans vos résultats ?

Konstantin Batygin : Chad Trujillo et Scott Sheppard ont remarqué que les objets de la ceinture de Kuiper les plus distants (au-

delà de 250 unités astronomiques) avaient un argument du périhélie (angle qui relie le périhélie et le point de l'orbite qui coupe le plan de l'écliptique) du même ordre de grandeur. Ils l'ont expliqué par la présence d'une planète inconnue en orbite circulaire. Cette planète participe à un effet de résonance gravitationnelle, nommé mécanisme de Kozai, qui influe sur la forme des orbites, leur inclinaison par rapport à l'écliptique et leur ellipticité. Cependant, les deux chercheurs ont constaté qu'ils pouvaient reproduire correctement l'orbite de l'objet 2012 VP113, mais pas celle des autres. Leur solution était incorrecte, mais nous nous en sommes inspirés pour attaquer le problème.

PLS

Quelle a été votre approche ?

K. B. : L'argument du périhélie n'est pas la seule anomalie liée à ces objets. Quand on regarde leur position dans le Système solaire, on voit que les orbites sont toutes concentrées dans une certaine région de l'espace et qu'elles sont toutes dans un même plan. Nous avons effectué des simulations numériques pour en comprendre l'origine.

PLS

Et le phénomène serait lié à une planète X ?

K. B. : Tout à fait ! Nos simulations montraient que nous pouvions expliquer toutes les caractéristiques des orbites si une planète de dix masses terrestres, dotée d'une orbite assez allongée, évoluait loin du Soleil, entre 250 et 1 150 unités astronomiques.

PLS

Votre modèle prévoyait aussi l'existence d'objets qui suivent une trajectoire très inclinée. Qu'en est-il ?

K. B. : Nous pensions que ce point du modèle allait tuer notre scénario, car nous ne connaissons pas de tels objets. Imaginez notre surprise lorsque nous avons appris qu'il en existait ! On en connaît cinq, dont Drac, découvert en 2008.

PLS

Quels sont les obstacles pour observer la planète X et confirmer cette hypothèse ?

K. B. : La planète est très distante. Mais certains des plus grands télescopes (*Subaru*, *Keck*) pourraient la détecter. Nos travaux limitent la zone du ciel à explorer et nous pensons que cinq ans seront nécessaires pour la trouver.

Lance Hayashida/Caltech

Durant la décennie suivante, dix autres objets aux orbites allongées et restant à bonne distance de Neptune ont été découverts. Plus petits que Sedna, ils n'étaient pas non plus aussi extrêmes dans leurs caractéristiques orbitales, ni par l'éirement de leur trajectoire ni par la distance du périhélie au-delà de Neptune. Mais tous partageaient cette spécificité de la position du périhélie par rapport au plan de l'écliptique. Et cette coïncidence était étrange.

« Sedna aurait pu être une anomalie unique, placée sur cette orbite par un événement inconnu », explique Chad Trujillo, « mais nous ne pouvions pas vraiment le savoir avant d'en trouver un autre. » Or, en 2014, après dix ans de recherche, Chad Trujillo et Scott Sheppard ont annoncé la découverte d'un objet aux propriétés très proches de celles de Sedna.

Ils avaient désormais un deuxième Sedna. Connue sous le nom provisoire de 2012 VP113, cet objet a une orbite située entre 80 et 446 UA, qu'il parcourt en 4300 ans. Comme Sedna, 2012 VP113 n'est pas soumis

à l'influence gravitationnelle de Neptune. Et la position de son périhélie par rapport au plan de l'écliptique est similaire à celle de la poignée de KBO de type Sedna.

Chad Trujillo et Scott Sheppard en ont conclu qu'un corps massif extérieur au Système solaire avait en partie façonné les orbites de ces objets. Le perturbateur pouvait être une super-Terre en orbite circulaire à plus de 250 UA du Soleil. Pour Meg Schwamb, de l'université Yale, personne n'avait jugé crédible l'hypothèse de la planète X jusqu'à la publication de l'article de Chad Trujillo et Scott Sheppard.

Mais est-ce la seule explication possible ? Par exemple, Hal Levison, du Centre de recherche américain du Sud-Ouest, a proposé que Sedna, 2012 VP113 et les autres corps étaient sur des orbites différentes à l'époque où le Soleil jeune se trouvait encore au sein de l'amas d'étoiles où il s'est formé. Et avant que l'amas ne se soit dispersé, les étoiles les plus proches du Soleil ont pu influencer sur les orbites des corps qui atteignaient les confins du Système solaire, les renvoyant

■ BIBLIOGRAPHIE

K. Batygin et M. E. Brown,
Evidence for a distant giant planet in the solar system,
The Astronomical Journal,
vol. 151(2), article 22, 2016.

A. Doressoundiram,
La mystérieuse planète X : mythe ou réalité,
Dossier Pour la Science,
n° 90, janvier-mars 2016.

C. A. Trujillo et S. S. Sheppard,
A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units,
Nature, vol. 507,
pp. 471-474, 2014.

vers le cœur du système sur des orbites très étroites et étirées. Scott Sheppard a aussi imaginé des effets de marée galactiques – des forces se manifestant lorsque le Soleil passe dans des régions plus ou moins denses lors de son périple autour de la Voie lactée. L'astronome concède que les simulations numériques d'un tel phénomène n'ont rien donné de probant. Mais d'autres scénarios de ce genre sont encore à explorer.

Ainsi, plusieurs effets sont susceptibles d'avoir envoyé ces corps glacés hors norme sur des orbites oblongues, mais seule l'hypothèse de la super-Terre reproduit les caractéristiques de ces objets lointains. Cette hypothèse ou le hasard !

Les indices sont finalement peu nombreux. Les douze objets étudiés par Scott Sheppard et Chad Trujillo ne sont que bien peu de corps parmi les millions que compterait la ceinture de Kuiper. Le phénomène est vraiment marginal et le devient d'autant plus si l'on suit le point de vue de Meg Schwamb et de son collègue Ramon Brasser, de l'institut de technologie de Tokyo. Selon Meg Schwamb, leurs travaux montrent que, parmi les douze objets, seuls quatre sont vraiment similaires à Sedna ; les autres s'approchent assez de Neptune pour subir un effet gravitationnel qui expliquerait leurs propriétés. « L'alignement des quatre autres », ajoute Ramon Brasser, « pourrait alors être le fruit du hasard avec une probabilité d'environ 1 % ». Cependant, un tel résultat ne permet ni d'exclure ni de confirmer l'hypothèse d'une planète X.

Les planétologues ont appris à être prudents. Dans les années 1980, le physicien Richard Muller, de l'université de Californie à Berkeley, pensait expliquer les extinctions massives des espèces sur Terre en invoquant une étoile peu lumineuse ou une naine brune – un objet de masse intermédiaire entre une étoile et une grosse planète – en orbite autour du Soleil à une distance de 10 000 UA. Ainsi, tous les 26 millions d'années environ, cet astre, que le chercheur a surnommé Némésis, perturberait quelques comètes du nuage d'Oort (une ceinture de corps glacés située bien au-delà de l'orbite de Sedna) et les propulserait vers la partie interne du Système solaire. La collision de ces comètes et de la Terre aurait provoqué la disparition de nombreuses espèces vivantes.

Toutes les recherches de Némésis se sont soldées par un échec. Le programme d'observation *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE) de la Nasa n'a rien détecté. Kevin Luhman, qui a conduit l'étude, explique : « Nous aurions dû voir tout objet de la taille de Jupiter présent jusqu'à une distance d'environ 30 000 à 40 000 UA du Soleil. Et nous devrions voir un objet de la taille de Saturne s'il se trouve jusqu'à 10 000 à 15 000 UA. » Ils n'ont rien vu. Une super-Terre telle que la planète X serait plus proche, mais aussi

« Il faudra environ cinq ans pour trouver la planète X avec un télescope tel que Subaru »

Mike Brown et Konstantin Batygin

moins brillante et plus petite, de quoi échapper à l'œil affûté de WISE.

Avec seulement une poignée d'objets pour se mettre sur la bonne voie, les planétologues ne peuvent pas encore dire si une super-Terre se cache dans le Système solaire. L'observation d'autres objets ayant les mêmes caractéristiques orbitales est cruciale. En novembre 2015, les astronomes ont donc été très enthousiastes à l'annonce de la découverte de V774104, dont le périhélie est encore plus éloigné du Soleil que celui de Sedna.

Pour Scott Sheppard, qui était à la tête de l'équipe ayant découvert cet objet, il est trop tôt pour dire si son orbite confirme ou infirme l'hypothèse d'une planète géante cachée. Et il est prématuré de se prononcer sur les quarante autres objets que l'équipe a repérés dans ce qui est

« la plus vaste étude des confins du Système solaire jamais menée ». Mais plus ils accumuleront de données, plus les chercheurs pourront conclure quant à la présence d'un corps massif.

Début janvier 2016, Mike Brown et Konstantin Batygin ont conforté l'hypothèse d'une planète X de type super-Terre d'une dizaine de masses terrestres (voir l'entretien page ci-contre). Leurs simulations numériques expliquent plusieurs caractéristiques des orbites des KBO, mais elles décrivent aussi d'autres objets connus dont les orbites sont très inclinées par rapport au plan de l'écliptique. C'est le cas de Drac, découvert en 2008, dont l'orbite est inclinée de 108 degrés par rapport à l'écliptique. Alessandro Morbidelli, de l'observatoire de la Côte d'Azur et spécialiste du Système solaire trouve ces arguments convaincants (voir l'entretien pages 34 et 35).

Il reste à observer cette planète ! Les planétologues ont hâte de disposer du LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*), un télescope en cours de construction au Chili et qui devrait être opérationnel en 2021. Il ne sera pas plus grand que les télescopes actuels, mais son champ de vision lui permettra de scruter de plus vastes régions du ciel.

Pour l'instant, indique Chad Trujillo, les astronomes ont fouillé environ 10 degrés carrés du ciel – la pleine lune, par comparaison, couvre un quart de degré carré – à la recherche d'objets peu brillants. Le LSST pourra surveiller des dizaines de milliers de degrés carrés. Si une super-Terre se cache dans un recoin du Système solaire, et si elle est assez grande et lumineuse, le LSST pourra la débusquer.

Faudra-t-il attendre 2021 ? Pas sûr. En décembre dernier, des astronomes ont annoncé qu'ils avaient peut-être pris des images d'une super-Terre en utilisant le système *Alma* (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) au Chili, mais la plupart de leurs collègues restent sceptiques. Par ailleurs, les résultats récents de Mike Brown et Konstantin Batygin restreignent la zone du ciel à étudier. D'après eux, il faudra cinq ans environ pour fouiller ce champ avec un télescope déjà opérationnel tel que *Subaru*, au Japon. La chasse est ouverte ! ■

« Les nouveaux arguments en faveur de l'existence d'une neuvième planète sont convaincants »

Des simulations suggèrent qu'une planète dix fois plus massive que la Terre serait située bien au-delà de Pluton.

Elle expliquerait les orbites des objets les plus lointains du Système solaire. Un scénario en accord avec les modèles de formation des planètes.

Entretien avec Alessandro Morbidelli



Alessandro MORBIDELLI est astronome à l'observatoire de la Côte d'Azur et spécialiste de la dynamique du Système solaire.

Cent soixante-dix ans après la découverte de Neptune – et dix ans après que Pluton a été déclassée en planète naine –, le Système solaire compte-t-il enfin une planète de plus ? Dans un article publié le 20 janvier dans *The Astronomical Journal*, Mike Brown et Konstantin Batygin, de l'institut de technologie de Californie, affirment qu'une planète massive se cache dans les confins du Système solaire. Bien que l'annonce ait fait sensation, cette « planète 9 » est loin d'avoir été observée ! Les astronomes ont déduit sa présence de l'analyse des orbites de certains petits corps glacés situés au-delà de Neptune. Mais pour Alessandro Morbidelli, chercheur à l'observatoire de la Côte d'Azur et spécialiste de la dynamique du Système solaire, cette neuvième planète a de fortes chances d'être bien réelle. Il nous explique pourquoi.

POUR LA SCIENCE

Quelles sont les caractéristiques de la planète supposée ?

ALESSANDRO MORBIDELLI : Elle serait environ dix fois plus massive que la Terre et située sur une orbite très lointaine et très elliptique : au plus près, elle passerait à environ 250 unités

astronomiques du Soleil (l'unité astronomique, ou UA, est la distance moyenne Terre-Soleil, soit 150 millions de kilomètres) – soit 8 fois plus loin que Neptune –, et s'éloignerait au-delà de 1 200 UA. Son orbite serait très inclinée, d'environ 30 degrés par rapport à l'écliptique (le plan de révolution de la Terre). Les calculs ne disent rien sur sa composition, mais étant donné sa masse, on peut penser qu'elle ressemblerait à une petite Neptune, avec un noyau rocheux et une enveloppe de gaz. Si elle existe, ce n'est pas une planète naine, on peut vraiment parler de neuvième planète !

PLS

Puisqu'elle n'a pas été observée directement, qu'est-ce qui suggère son existence ?

A. M. : L'alignement étrange des orbites de certains petits objets situés aux confins du Système solaire. Au-delà de l'orbite de Neptune (à 30 UA), il existe une vaste population de petits corps : la ceinture de Kuiper. Son plus célèbre représentant – mais pas le plus gros – est Pluton. Mais en 2003, une équipe dirigée par Mike Brown a découvert Sedna, un objet encore plus lointain, dont l'orbite s'étend entre 76 et 950 UA, hors de l'influence de Neptune. On a découvert depuis treize objets semblables, qui s'approchent au plus près au niveau de Neptune et s'éloignent au moins jusqu'à 300 UA.

PLS

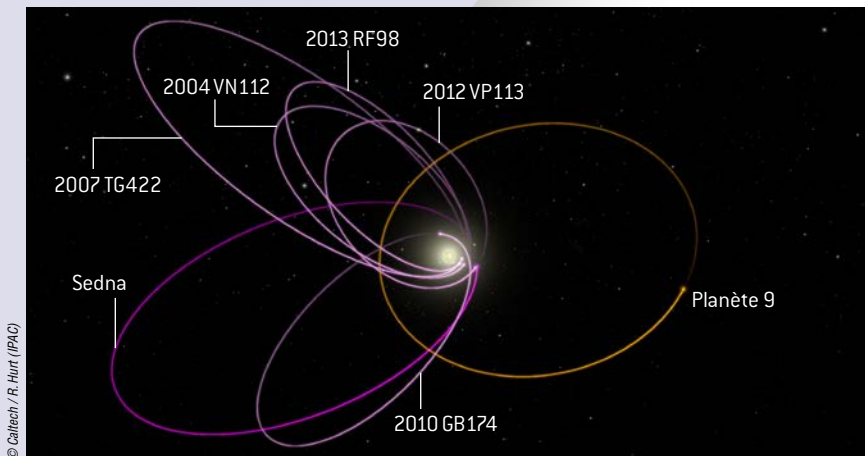
Qu'est-ce qui peut expliquer les orbites de ces objets distants ?

A. M. : En 2014, après avoir découvert le dernier connu, VP 113, Scott Sheppard, de l'institut Carnegie pour les sciences, à Washington, et Chad Trujillo, de l'observatoire Gemini, à Hawaï, ont remarqué que tous ces objets ont une caractéristique commune : ils passent à leur périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil) quand ils croisent le plan de l'écliptique et en se déplaçant du sud vers le nord. Les deux astronomes ont alors imaginé que cette configuration pouvait résulter de l'influence de planètes massives et lointaines, mais sans parvenir à le démontrer.

PLS

Que manquait-il pour y parvenir ?

A. M. : Mike Brown et Konstantin Batygin ont poussé plus loin l'analyse des objets distants et ont fourni des arguments convaincants. Ils ont montré que sept d'entre eux ont en fait une orbite chaotique, et se trouvent dans un « alignement » de circonstance. En revanche, les six autres objets, dont Sedna et VP 113, sont dans un véritable alignement physique : leurs orbites sont dans un même plan, incliné d'environ 20 degrés, et sont d'orientations voisines. Le duo



LES ORBITES DES SIX OBJETS LES PLUS DISTANTS DU SYSTÈME SOLAIRE (en violet) sont regroupées dans la même région et dans un même plan incliné par rapport au plan du Système solaire. Une telle configuration serait maintenue par l'influence d'une planète de 10 masses terrestres sur une orbite « anti-alignée » (en orange).

a calculé que cela n'avait que 0,007 % de chance d'être dû au hasard. Il doit donc y avoir un corps massif dont l'influence gravitationnelle maintient ces objets dans cette configuration.

PLS

Comment les deux astronomes ont-ils déterminé les caractéristiques de ce corps ?

A. M. : Tester toutes les masses et orbites possibles serait beaucoup trop lourd. Konstantin Batygin a d'abord réduit le problème à des configurations planes pour déterminer certains paramètres, puis est « remonté en sens inverse » en élaborant des modèles plus complexes. Il a abouti à un modèle qui prend en compte l'évolution de tous les corps en jeu sur plus de 4 milliards d'années.

Les simulations numériques de ce modèle indiquent qu'avec une planète de 10 masses terrestres placée au départ sur une orbite entre 250 et 1 200 UA, les seuls corps distants qui subsistent après 4 milliards d'années évoluent sur des orbites similaires à celles des six objets observés. L'orbite de la neuvième planète supposée est dans le même plan, mais dans la direction opposée.

En outre, le modèle prédit que cette planète injecte aussi un autre groupe d'objets sur des orbites presque perpendiculaires au plan de l'écliptique, voire rétrogrades. Or depuis 2002, on a découvert cinq objets qui correspondent à cette description et dont l'origine restait inexpliquée.

PLS

Mais d'où viendrait cette planète ? Il paraît peu probable qu'elle ait pu se former au-delà de la ceinture de Kuiper.

A. M. : En effet. Mais mes collègues André Izidoro et Sean Raymond, de l'observatoire de Bordeaux, et moi avons justement étudié un scénario sur la formation d'Uranus et de Neptune qui s'accorde bien avec l'hypothèse de la neuvième planète.

Revenons dans le premier million d'années du Système solaire. Jupiter et Saturne sont déjà formées, mais pas Uranus et Neptune. Or l'axe de rotation de ces deux planètes est très incliné (respectivement 98° et 30°). Seules des collisions majeures peuvent expliquer un tel basculement.

Nous avons donc imaginé un modèle où Uranus et Neptune se sont formées à partir de protoplanètes de 5 à 7 masses terrestres. Perturbées par Jupiter et Saturne, certaines entrent en collision et fusionnent pour engendrer des planètes plus massives, comme attendu. Mais dans ce jeu de billard cosmique, il y a toujours d'autres protoplanètes qui sont repoussées par les deux géantes et éjectées du Système solaire.

Or le Soleil est né dans un amas stellaire en même temps que des centaines d'étoiles sœurs, qui se sont depuis dispersées. Dans ces conditions, des chercheurs ont calculé que ces proches voisines auraient empêché 15 à 20 %

des protoplanètes éjectées de s'échapper en les confinant sur des orbites très elliptiques.

Ce scénario, déjà avancé pour Sedna, fonctionne bien pour la neuvième planète. Une autre possibilité, avancée par Konstantin Batygin, est que le gaz du disque protoplanétaire aurait pu freiner la protoplanète éjectée au point qu'elle finisse par se stabiliser sur une orbite elliptique, mais cela reste à montrer.

PLS

Cette découverte rappelle celle de Neptune : en 1846, Urbain Le Verrier avait prédit son existence et sa position en analysant les perturbations de l'orbite d'Uranus. À la différence près que Neptune avait été immédiatement observée là où Le Verrier l'avait indiquée. Quelles sont les chances d'observer la neuvième planète ?

A. M. : Il s'agit d'un objet très peu lumineux. Si l'on suppose que son albédo (la façon dont elle réfléchit la lumière) est similaire à celui de Neptune, sur la partie la plus éloignée de son orbite, la neuvième planète doit avoir une magnitude de 23, soit 1 500 fois plus faible que celle de Pluton !

En outre, on ignore où elle se trouve sur son orbite. Sa période est de l'ordre de 20 000 ans, et elle passe la majorité de son temps sur la partie de son orbite éloignée du Soleil. En 2013, le relevé du ciel *Wise* (*Widefield Infrared Survey Explorer*) a permis d'écarter l'existence d'une planète de la taille de Saturne ou plus à moins de 10 000 UA, mais cela n'exclut pas l'existence d'une planète plus petite que Neptune. D'autres observations semblent écarter la présence de la neuvième planète vers son périhélie.

Autre problème : les grands télescopes capables de détecter un objet si faible (*Hubble*, *Keck*, etc.) ont des champs de vision très étroits. Mike Brown et Konstantin Batygin, ainsi que Scott Sheppard et Chad Trujillo, se sont tournés vers le télescope de 8 mètres de diamètre *Subaru*, à Hawaï, dont le champ est plus large, pour chercher la neuvième planète. Mais il faudra peut-être attendre l'entrée en service en 2021 du LSST, un télescope 8,5 mètres doté d'un champ de 9,6 degrés carrés. Avec cet instrument, si l'on n'a pas observé la neuvième planète d'ici à 2030, on pourra conclure qu'elle n'existe pas ! ■

Propos recueillis par Philippe RIBEAU-GESIPPE

La cité oubliée de Jinsha

Mayke Wagner et Pavel Tarasov

La découverte fortuite au Sichuan, en Chine, d'une ancienne cité atteste de l'existence d'une riche culture qui révérait l'éléphant, il y a plus de deux mille ans.

Les érudits chinois de l'Antiquité écrivaient beaucoup. Ils écrivaient tellement qu'il semble qu'à partir du III^e siècle avant notre ère, aucune question historique chinoise ne soit restée sans réponse. Aucune ? Pas vraiment. Les chroniqueurs des trois premières dynasties chinoises – les dynasties Xia (2100-1600 avant notre ère), Shang (1600-1046) et Zhou (1046-771) – passaient sous silence les cultures voisines, qu'ils tenaient pour négligeables. L'étaient-elles ? Manifestement pas, puisque l'on a découvert au Sichuan la cité de Jinsha, où florissait une culture riche et complexe au début du I^{er} millénaire avant notre ère. Les anciens Chinois pouvaient-ils vraiment ignorer son existence ?

Leur ignorance apparente est d'autant plus étonnante que les chroniqueurs chinois ont écrit sur tout ce qui a précédé l'Empire du Milieu jusqu'au XXI^e siècle avant notre ère. Or dès la première grande fouille chinoise en 1928, ces sources se sont révélées fiables : c'est en se fondant sur leurs écrits que l'on a découvert Yin Xu (littéralement les « ruines des Yin »), la capitale de la dynastie Shang, que l'on nomme aussi la dynastie Yin. À partir du XVI^e siècle avant notre ère, les rois Yin (ou Shang) ont régné depuis cette ancienne ville sur une grande partie de la plaine chinoise orientale. La frontière sud de leur royaume était la rive du cours moyen du Changjiang, aussi appelé le Yangtsé.

L'ESSENTIEL

- Les cultures voisines de la Chine antique ne sont jamais mentionnées par les chroniqueurs chinois. De ce fait, les archéologues les ont cru négligeables...
- ... jusqu'à ce qu'ils découvrent leur complexité, comme par exemple sur le site de Jinsha, au Sichuan.
- Dans cette cité fondée à la fin du II^e millénaire avant notre ère s'était développée une culture riche et singulière.
- Jinsha était peut-être la capitale d'un royaume disparu, jamais mentionné mais connu des anciens Chinois.

© Huang Zheng / Shutterstock.com

CE DISQUE SOLAIRE mis au jour à Jinsha est devenu le symbole de sa culture.