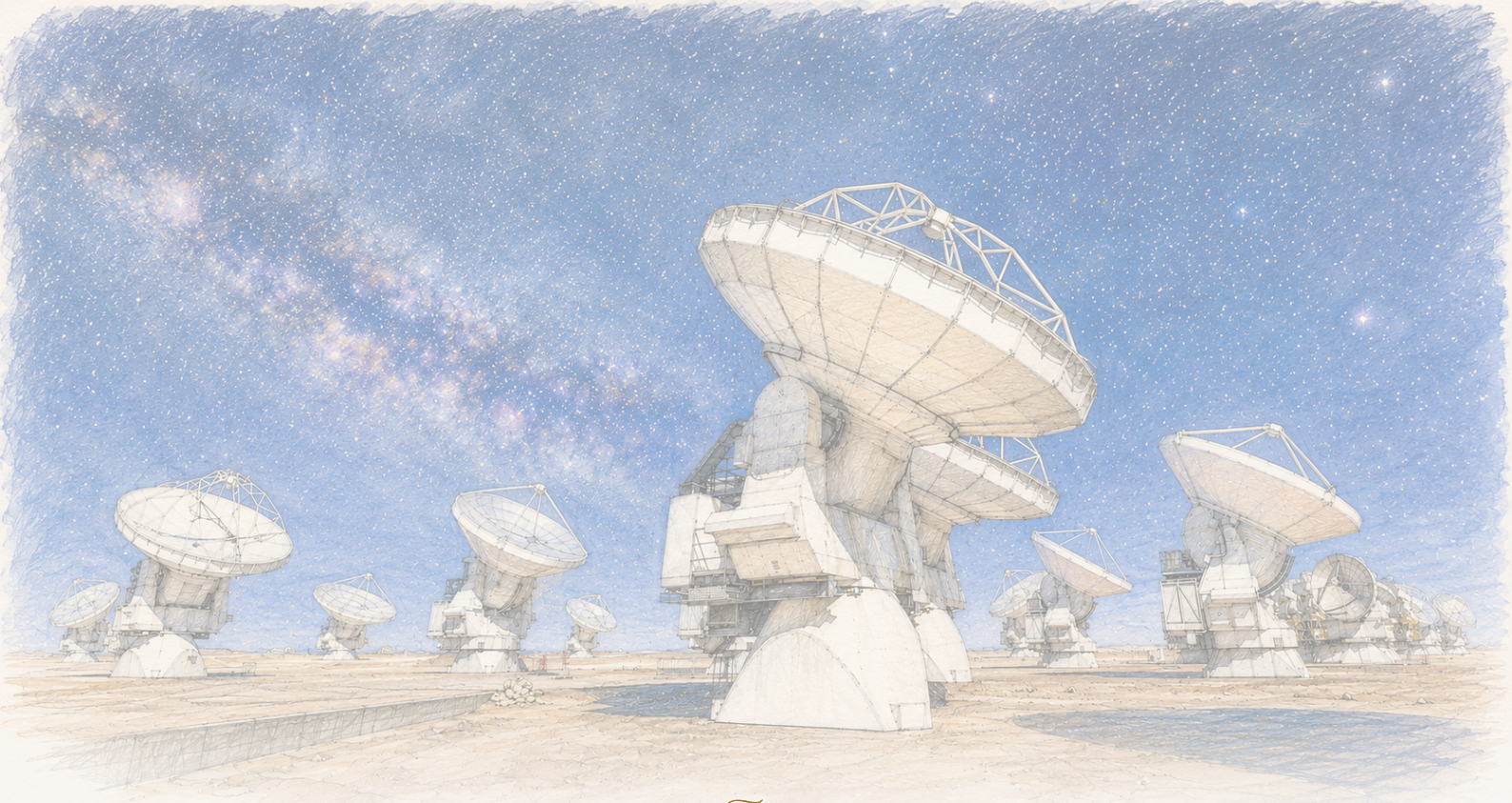




## The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

La comète interstellaire 3I/ATLAS porte une eau formée dans un environnement plus froid que nos comètes — une première lecture chimique d'un autre système planétaire

*À l'aide d'ALMA, des astronomes ont contraint le rapport entre hydrogène « lourd » et hydrogène ordinaire dans l'eau de 3I/ATLAS — le troisième objet interstellaire connu — et découvert un fort enrichissement en deutérium : au moins environ 40 fois les océans terrestres et 30 fois une comète typique du Système solaire. Cela indique une eau formée dans des conditions plus froides que celle de nos propres comètes. Le résultat est une limite inférieure obtenue indirectement — l'eau ordinaire elle-même n'a jamais été détectée directement — et ne dit rien sur la vie ou la technologie, seulement sur la chimie et le froid.*

---

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso  
· AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Water D/H in 3I/ATLAS as a Probe of Formation Conditions in Another Planetary System*, L. E. Salazar Manzano, T. Paneque-Carreño et al., *Nature Astronomy* (2026) · DOI: 10.1038/s41550-026-02850-5





L'antenne DV-59 au premier plan, avec plusieurs antennes d'ALMA observant le ciel nocturne éclairé par la Lune. Crédit : Alex Pérez / Observatoire ALMA.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

## Une comète venue d'une autre étoile, et l'empreinte inscrite dans son eau

Il arrive que quelque chose traverse le Système solaire sans lui avoir jamais appartenu. Ni roche égarée de la ceinture d'astéroïdes, ni comète revenant du nuage de Oort au bout de sa longue trajectoire, mais un objet engagé sur une orbite hyperbolique ouverte — arrivé de l'espace interstellaire, destiné à contourner une seule fois le Soleil puis à repartir pour toujours. Nous en avons désormais observé trois. Le premier, 'Oumuamua, en 2017, avait presque disparu avant même que l'on s'accorde sur sa nature. Le deuxième, 2I/Borisov, en 2019, était incontestablement une comète. Le troisième, découvert en juillet 2025, est 3I/ATLAS — et il est arrivé entouré d'une chevelure assez active pour permettre une véritable analyse chimique.

Voici le point à retenir avant que le bruit ne commence. Une comète interstellaire est, au sens littéral, un fragment d'un autre système planétaire : de la glace et de la poussière condensées autour d'une autre étoile, très probablement éjectées autrefois par une impulsion gravitationnelle, parties à la dérive dans la Galaxie, puis passées assez près de notre Soleil pour que leurs glaces commencent à se vaporiser précisément là où nos télescopes pouvaient les observer. C'est là le fait réellement

remarquable, et il est assez stupéfiant pour n'avoir besoin d'aucun embellissement.

Il en reçoit malgré tout. Les objets interstellaires attirent une forme particulière de traitement à bout de souffle — lumières tamisées, *et si quelqu'un l'avait construit ?* — et 3I/ATLAS n'y a pas échappé. La réponse honnête à cette question est la plus banale, et la plus banale est aussi la plus intéressante : c'est une comète. La vraie question n'a jamais été de savoir si quelqu'un l'avait fabriquée. Elle était plus discrète : si l'on pouvait lire la chimie d'un objet assemblé autour d'une autre étoile, que nous apprendrait-elle sur la famille de cette étoile ? Et comment la lire ?

Cette fois, l'instrument de lecture est l'eau. Une molécule d'eau contient deux hydrogènes et un oxygène, mais une petite fraction de son hydrogène est du *deutérium* — un jumeau plus lourd, c'est-à-dire un atome d'hydrogène ordinaire doté d'un neutron supplémentaire. Le rapport entre hydrogène lourd et hydrogène ordinaire dans l'eau, noté D/H, n'est pas aléatoire. Il dépend largement, par la chimie, de la température à laquelle l'eau s'est formée : plus son berceau était froid et calme, plus elle a emprisonné de deutérium. Et comme une comète est en quelque sorte un congélateur profond — capable de conserver ses glaces au froid pendant des milliards d'années — le rapport D/H de son eau peut garder l'empreinte des conditions dans lesquelles cette eau s'est formée.

Nous connaissons assez bien les empreintes de notre propre système : les océans terrestres et les différentes familles de comètes du Système solaire se regroupent dans une plage relativement étroite. Ce que personne n'avait encore pu établir, c'était cette même empreinte pour de l'eau formée autour d'une *autre* étoile. C'est ce que cet article a entrepris de lire dans 3I/ATLAS.

## Ce qu'ont fait les auteurs

Ils ont dirigé ALMA — le grand réseau d'antennes radio dans le désert chilien — vers 3I/ATLAS le 4 novembre 2025, six jours après le passage de la comète autour du Soleil. Ils l'ont réglé pour capter la faible lueur millimétrique de trois molécules dans la chevelure : l'eau ordinaire ( $\text{H}_2\text{O}$ ), l'eau *lourde* (HDO, où un hydrogène est remplacé par un deutérium) et le méthanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ).

Le rapport D/H recherché correspond en pratique au rapport entre eau lourde et eau ordinaire. Il leur fallait donc les deux. Les chercheurs ont ensuite traité les spectres avec un modèle de transfert radiatif décrivant une atmosphère cométaire en expansion — un code appelé SUBLIME — et les ont ajustés avec le même type d'outils statistiques que ceux utilisés pour retrouver la composition des atmosphères d'exoplanètes, afin d'en déduire la température, l'écoulement et la quantité de chaque molécule produite par la comète.

Un problème conditionne tout ce qui suit : **ils n'ont pas réellement détecté l'eau ordinaire**. Le HDO et le méthanol sont apparus ; le  $\text{H}_2\text{O}$  est resté sous le niveau du bruit. Ce n'est pas faute d'eau ordinaire — elle est bien plus abondante que sa forme lourde. La visibilité d'une raie ne dépend pas seulement de la quantité de molécules présentes, mais aussi de la facilité d'observation de cette raie particulière, et deux facteurs jouent ici contre celle de l'eau. Le premier est l'atmosphère : la raie du  $\text{H}_2\text{O}$  que les chercheurs pouvaient viser, près de 183 GHz, se trouve précisément là où l'air terrestre chargé d'eau absorbe le plus fortement. Lire depuis le sol l'eau d'une comète à cette fréquence revient un peu à essayer de voir une bougie dans le brouillard. L'article note que ces bandes de basse énergie de l'eau

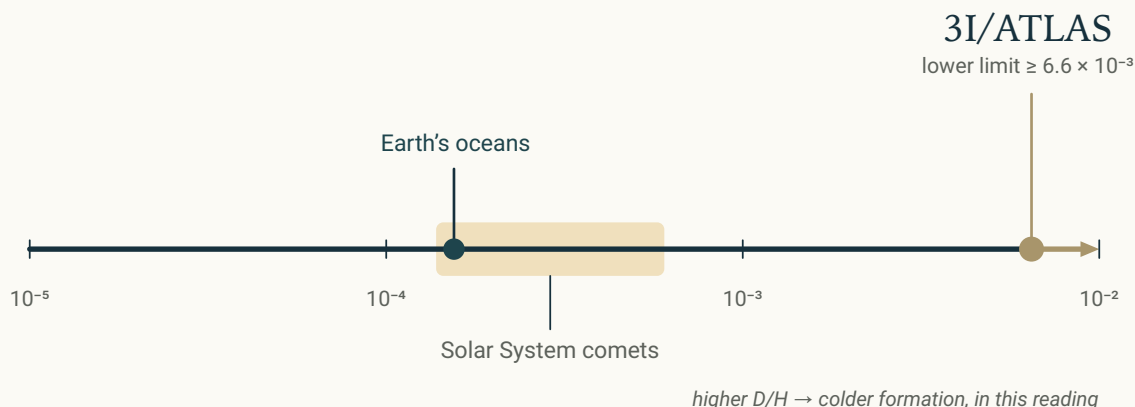
subissent une forte absorption atmosphérique, tandis que la raie de l'eau lourde, HDO, proche de 241 GHz, se situe dans une fenêtre plus propre. Le deuxième facteur est la sensibilité : le canal de l'eau était beaucoup plus bruyé — environ 500 mJy par faisceau, contre 21 pour HDO —, de sorte que même un signal abondant pouvait rester caché. Entre le brouillard et le bruit, l'eau ordinaire, pourtant abondante, est restée sous le seuil, tandis que l'eau lourde, bien plus rare mais observée dans une fenêtre propre et calme, est apparue clairement. Depuis l'espace, au-dessus de l'atmosphère, cette même eau est beaucoup plus facile à voir : le JWST a détecté plus tard l'eau de la comète dans l'infrarouge, après le périhélie. La non-détection par ALMA concerne donc cette raie particulière vue à travers l'atmosphère terrestre, pas une absence d'eau. Il a ainsi fallu déduire *indirectement* la quantité d'eau ordinaire — principalement à partir de l'excitation des raies du méthanol, qui dépend de la fréquence à laquelle ses molécules entrent en collision avec celles d'eau. C'est bien une mesure, mais elle dépend d'un modèle, et les auteurs l'indiquent explicitement.

## Ce qu'ils ont découvert

- **De l'eau lourde, mais pas d'eau ordinaire.** Le HDO et plusieurs raies du méthanol ont été clairement détectés ; le H<sub>2</sub>O ne l'a pas été. Comme le rapport D/H repose sur une *limite supérieure* du taux de production d'eau ordinaire — traité délibérément comme tel puisque la raie de l'eau est restée sous le bruit —, le rapport de deutérium obtenu est une **limite inférieure**, pas une valeur unique.
- **Un fort enrichissement en deutérium.** Dans leur scénario prudent, le rapport D/H de l'eau est **supérieur à  $6,6 \times 10^{-3}$**  — plus de **40 fois** la valeur des océans terrestres et plus de **30 fois** celle d'une comète typique du Système solaire. Selon chacune de leurs deux estimations, 3I/ATLAS se situe tout en haut de l'ensemble des mesures du rapport D/H de l'eau réalisées à ce jour.
- **Il ne s'agit probablement pas d'une anomalie propre à cette nuit-là.** La mesure provient d'une seule époque d'observation, mais un examen préliminaire de données ALMA voisines ne montre pas de grande variation d'un jour à l'autre, et une analyse indépendante de 3I/ATLAS par le JWST, effectuée plus d'un mois après, va dans le même sens : une eau riche en deutérium.

## Where 3I/ATLAS's water sits on the deuterium scale

Water D/H ratio — logarithmic scale



Position de l'eau de 3I/ATLAS sur l'échelle du deutérium : très loin du côté riche en deutérium, au-delà des océans terrestres et de toute la population des comètes du Système solaire, représentée ici sous forme de plage approximative. La flèche indique une *limite inférieure* — la valeur réelle pourrait être plus élevée. Un rapport D/H élevé renseigne sur des *conditions de formation froides*, pas sur une adresse d'origine.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

## Ce que cela signifie probablement

Un rapport D/H élevé dans l'eau est la signature d'une eau qui a gelé dans un environnement très froid — sous environ 30 K — et qui n'a pas ensuite été fortement remaniée par la chaleur. La lecture la plus nette est donc que l'eau de 3I/ATLAS s'est formée dans des conditions *plus froides et plus calmes* que celle des comètes de notre propre Système solaire — et, par conséquent, que le système planétaire dont elle provient a assemblé ses glaces différemment du nôtre.

Les auteurs restent prudents sur l'étape suivante, et nous devrions faire de même. Deux voies peuvent produire une eau aussi riche en deutérium, et cette mesure ne permet pas de les départager : l'eau pourrait avoir *hérité* de son enrichissement du nuage froid où le système est né, ou celui-ci pourrait avoir été fixé plus tard, pendant la formation de la comète dans un disque externe froid. Dans les deux cas, la conclusion qui compte demeure : les conditions ayant façonné 3I/ATLAS n'étaient pas celles qui ont façonné nos comètes. Mais le *pourquoi* reste ouvert.

Il s'agit donc de la première lecture de l'empreinte de formation de l'eau dans une matière provenant d'un autre système planétaire — et cette empreinte ne correspond pas à la nôtre.



## Ce que cela ne démontre *pas*

- Cela ne dit **rien** sur la vie, la technologie ou une intention. Rien n'a été « construit » ; « interstellaire » décrit une trajectoire, pas un récit d'origine. Il s'agit d'une mesure de chimie de l'eau.
- Il ne s'agit **pas** d'une valeur précise du rapport D/H. C'est une *limite inférieure*, et l'eau concernée n'a jamais été détectée directement : son abondance a été déduite de l'excitation d'une autre molécule, le méthanol, en supposant que l'eau est le principal partenaire avec lequel celui-ci entre en collision.
- Cela ne révèle **pas** où 3I/ATLAS est née. L'étoile d'origine ne peut pas être identifiée de manière fiable, et un rapport D/H élevé renseigne sur des *conditions*, pas sur une adresse d'origine.
- Cela ne tranche **pas** la raison de l'enrichissement en deutérium. Un héritage venu d'un nuage natal froid et une fixation pendant la formation dans le disque sont tous deux compatibles avec les données ; l'article ne choisit pas entre eux.
- Il s'agit d'**un seul** objet, mesuré à **une seule** époque. La corroboration est encourageante, mais elle ne constitue pas une longue série temporelle.

## Quelle est la solidité des preuves ?

Deux aspects doivent être évalués séparément : le sens du résultat et sa valeur exacte.

- **Le sens est robuste.** Le fait que l'eau de 3I/ATLAS soit nettement enrichie en deutérium repose sur une limite inférieure prudente, se situe bien au-dessus de toute la population des comètes du Système solaire et est étayé par une analyse indépendante du JWST. Cette partie n'est pas fragile.
- **La valeur repose sur une chaîne de modélisation.** Comme  $\text{H}_2\text{O}$  n'a pas été détecté, l'abondance de l'eau — et donc le rapport D/H — dépend d'une estimation indirecte obtenue à partir de l'excitation du méthanol. Celle-ci suppose que l'eau est le partenaire de collision dominant dans la chevelure — hypothèse plausible près du périhélie, même si une contribution du  $\text{CO}_2$  ne peut être exclue — et utilise des taux de collision approximatifs et, de l'aveu des auteurs, mal contraints. Ceux-ci signalent tous ces points et présentent délibérément le résultat comme une limite plutôt que comme une mesure.
- **L'interprétation est bien motivée, mais pas unique.** Une formation froide est l'explication naturelle d'un rapport D/H élevé ; on ignore encore si ce froid a été hérité ou imposé plus tard, et le système d'origine ne peut pas être identifié.

En bref : le fait que l'eau se soit formée dans le froid repose sur des bases solides ; son degré précis de froid et sa cause exacte sont laissés honnêtement ouverts.

## Pourquoi c'est important

Pendant des décennies, les questions de l'origine de l'eau terrestre et de ce qui détermine son empreinte de deutérium dans les systèmes planétaires en formation n'ont reçu de réponses qu'à partir de mesures réalisées dans notre propre Système solaire. C'est la première fois que cette carte est étendue à une matière dont il est certain qu'elle s'est formée autour d'une autre étoile.

La réponse n'est pas « tout ressemble à chez nous ». C'est l'inverse : un autre système peut déposer ses glaces dans des conditions assez froides pour laisser une empreinte que nos comètes n'ont jamais portée. C'est un élément concret et modeste en faveur d'une idée discrètement immense : la chimie et l'histoire des solides qui forment les planètes peuvent varier d'une étoile à l'autre. Et nous ne l'avons pas obtenu grâce à une sonde envoyée à des années-lumière, mais en interceptant un fragment égaré d'un autre système pendant son passage et en lisant son eau avant sa disparition.

## Résumé clair

3I/ATLAS est le troisième objet interstellaire connu et la deuxième comète interstellaire active — un fragment d'un autre système planétaire qui traverse le nôtre une seule fois. En utilisant ALMA près du passage de la comète au plus près du Soleil, des astronomes ont détecté de l'eau lourde (HDO) et du méthanol dans sa chevelure, mais pas d'eau ordinaire, puis en ont déduit le rapport entre deutérium et hydrogène dans l'eau. Ils concluent à un fort enrichissement en deutérium — une limite inférieure supérieure à  $6,6 \times 10^{-3}$ , soit environ 40 fois les océans terrestres et 30 fois une comète typique du Système solaire — qui indique une eau formée dans des conditions plus froides et moins remaniées que celle des comètes du Système solaire. Ce chiffre est une limite inférieure obtenue indirectement à l'aide d'un modèle, pas une mesure directe. Il ne permet pas de savoir si l'enrichissement a été hérité d'un nuage natal froid ou fixé plus tard dans un disque froid, ni d'où provient la comète. Il s'agit malgré tout de la première lecture de cette empreinte chimique particulière pour de l'eau venue d'une autre étoile — et elle ne correspond pas à la nôtre.

## Vérification sans détour

**Ce que montre l'article :** à partir d'observations par ALMA de la comète interstellaire 3I/ATLAS près du périhélie, une limite inférieure du rapport D/H de son eau supérieure à  $6,6 \times 10^{-3}$  dans le scénario prudent — environ 40 fois les océans terrestres et 30 fois une comète typique du Système solaire —, ce qui implique une eau formée dans des conditions nettement plus froides et moins remaniées thermiquement que celle des comètes du Système solaire. Une analyse indépendante du JWST va dans le même sens.

**Ce qui est plausible, mais non démontré :** que l'enrichissement ait été hérité directement d'un nuage préstellaire froid, plutôt que fixé pendant la formation de la comète dans un disque protoplanétaire froid. Les deux scénarios conviennent ; les données ne permettent pas de les distinguer.

**Ce que l'article ne montre pas :** quoi que ce soit sur la vie, la technologie ou une origine artificielle ; une valeur précise du rapport D/H — il s'agit d'une limite inférieure ; l'identité ou la position de l'étoile d'origine ; le mécanisme précis à l'origine du rapport D/H élevé ; ou l'absence de toute variation de la chevelure dans ce résultat obtenu à une seule époque.

**Principales limites :** le  $\text{H}_2\text{O}$  n'a pas été détecté directement. L'abondance de l'eau — et donc le rapport D/H — est déduite indirectement de l'excitation du méthanol, en supposant que l'eau est le partenaire de collision dominant et en utilisant des taux de collision approximatifs que les auteurs qualifient de mal contraints ; le résultat est une limite dépendante du modèle et issue d'une seule époque d'observation ; le système d'origine ne peut pas être identifié.

**Quel degré de confiance un lecteur non spécialiste devrait-il accorder au résultat ?** Un degré élevé pour le fait que l'eau de 3I/ATLAS est réellement riche en deutérium, qu'elle s'est formée dans un environnement plus froid que celle de nos comètes et que cela ne dit absolument rien sur des extraterrestres. Un degré modéré pour l'ampleur exacte de l'enrichissement, qui est une limite inférieure dépendante du modèle. Un degré faible pour sa cause précise et son lieu de naissance, qui restent ouverts. La bonne posture : un émerveillement discret devant une carte postale chimique venue d'un autre système stellaire — pas un mystère, et pas un vaisseau spatial.

---

## Sources

Nature Astronomy (2026)

<https://doi.org/10.1038/s41550-026-02850-5>

arXiv 2603.07026

<https://arxiv.org/abs/2603.07026>

Independent JWST corroboration (Cordiner et al., arXiv 2603.06911)

<https://arxiv.org/abs/2603.06911>

ALMA data archive (project 2025.A.00002.T)

<https://almascience.nrao.edu/aq/>