

TÉMOINS DE L'INSTANT ZÉRO DU SYSTÈME SOLAIRE



1. Tranche de la chondrite Northwest Africa 5162 (CV3). Les inclusions réfractaires sont les objets blanchâtres et/ou de forme irrégulière (trois sont indiqués par des flèches rouges, mais on peut en trouver bien davantage). Les objets sphériques plus petits qui dominent la météorite sont les chondres.
(Photo : Brigitte Zanda)

LES INCLUSIONS RÉFRACTAIRES

La quasi-totalité des météorites arrivant sur Terre chaque année se sont formées au début du Système solaire, il y a 4,56 à 4,57 milliards d'années. Elles contiennent les objets les plus anciens du Système solaire, les *inclusions réfractaires*. Celles-ci sont les reliques des toutes premières phases de notre Système solaire, à une époque dominée par de hautes températures. C'est sur elles que porte le présent article.

ASTÉROÏDES PRIMITIFS ET CHONDRITES

Il y a 4,56 à 4,57 milliards d'années, notre Système solaire était un disque de gaz et de poussières en rotation autour du jeune Soleil : c'était le *disque d'accrétion*. Cette poussière, initialement composée de grains de taille inférieure au micromètre (1 micromètre = 1 millième de millimètre), s'agglutina pour former des agrégats d'une taille de l'ordre du millimètre, qui subirent différentes histoires thermiques. Ces agrégats continuèrent à s'agglomérer pour former des objets de taille kilométrique et au-delà : les *planétésimaux*. C'est la collision entre ces planétésimaux qui engendra finalement les planètes. Tout se joua en quelques millions d'années ; après quoi tout le gaz qui formait le disque d'accrétion fut dissipé. Mais certains planétésimaux furent laissés de côté dans ce grand chantier, formant ce que l'on appelle aujourd'hui les astéroïdes, qui circulent majoritairement entre les orbites de Mars et Jupiter. C'est de ces astéroïdes que proviennent la plupart des météorites. Si certaines météorites proviennent d'astéroïdes qui ont partiellement fondu après leur agglomération, la majorité d'entre elles sont issues d'astéroïdes primitifs, qui n'ont subi (presque) aucune modification dans leur histoire, et peuvent nous donner des renseignements de première main sur le Système solaire primordial. Ces météorites primitives, ou chondrites, recèlent, cimentées dans une matrice à grains fins, des inclusions de taille généralement inférieure au millimètre (fig. 1). Autant d'objets qui, formés dans diverses conditions, en divers lieux et diverses époques dans le disque d'accrétion, y évoluaient librement avant de s'agglomérer pour former ces roches. Les plus abondants de ces objets sont les *chondres* (du grec « khondros », granule), des sphérules contenant du verre. On suppose qu'il s'agissait originellement d'agrégats de poussière qui ont subi un échauffement bref, peut-être consécutivement au passage d'une onde de choc. Celle-ci aurait causé leur fusion, avant que les gouttelettes ainsi formées ne se solidifient lors du refroidissement ultérieur.



UNE DÉCOUVERTE RELATIVEMENT RÉCENTE

Hormis les chondres, on connaît aussi des objets de forme irrégulière appelés *inclusions réfractaires* (fig. 2 à 5). Leur composition est en effet telle que, dans les conditions du disque d'accrétion, ils ne s'évaporent qu'à hautes températures, au-delà de 1 500 °C (dans les conditions du disque, on passe en effet directement de l'état solide à l'état gazeux, donc sans passer par l'état liquide, sauf événement bref, « hors équilibre », comme pour les chondres). De tous les composants des chondrites, ce sont les objets les plus anciens, les dernières datations (aluminium-magnésium et plomb-plomb) leur donnant un âge de 4 568 Ma (1 Ma = 1 million d'années). Les inclusions réfractaires définissent ainsi l'« instant zéro » du Système solaire, et ont à ce titre bénéficié d'une attention particulière de la part des cosmochimistes (les scientifiques qui étudient les météorites) et des astrophysiciens, ne serait-ce qu'à en juger par les publications de la dernière décennie.

Les inclusions réfractaires, bien que remarquées au XIX^e siècle par Gustav Tschermak, du Muséum d'histoire naturelle de Vienne, dans la météorite de Renazzo, ne commencèrent à être étu-

2. Inclusion réfractaire de la météorite d'Allende, chondrite carbonée du type de Vigarano tombée en 1969 au Mexique.

C'est une CAI qui a gardé la forme irrégulière héritée de sa formation par condensation. On devine des sous-unités dont la CAI est peut-être issue par aggrégation. (Grossissement : 40 X. Micrographie prise en lumière polarisée et analysée par Gérard Odile.)

diées que dans les années 1960, notamment avec les travaux de Mireille Christophe Michel-Levy, au Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Elle avait étudié la météorite de Vigarano qui en était truffée, météorite tombée en Italie en 1910, appartenant aux chondrites carbonées, considérées comme la classe la plus primitive des chondrites. Mais l'étude des inclusions réfractaires ne prit véritablement son essor qu'à l'occasion de la chute de la météorite d'Allende au Mexique, le 8 février 1969. En effet, à cette date, plus de 3 tonnes de chondrites carbonées, du même type que Vigarano, s'abattirent sur une surface de 460 km² autour du village de Pueblito de Allende dans l'État du Chihuahua. Jusqu'alors, la masse totale conservée des chondrites carbonées – comme nous le verrons plus tard, la classe de chondrites où les inclusions réfractaires sont les plus abondantes – ne dépassait pas quelques dizaines de



kilogrammes, et ces 3 tonnes furent une manne providentielle pour les laboratoires autour du monde. Coïncidence heureuse, c'était l'année des premières missions Apollo sur la Lune (sans oublier les sondes soviétiques Luna), et les techniques d'analyse avaient été affûtées en vue des retours d'échantillons lunaires.

Les inclusions étudiées étaient essentiellement des inclusions riches en calcium et en aluminium, ce que l'on appelle des CAIs (pour l'anglais « Calcium-Aluminum-rich Inclusions »). Il existe aussi des inclusions réfractaires qui ne sont pas riches en calcium et en aluminium (qui ne sont donc pas des CAIs) : ce sont les agrégats amiboïdes à olivine, qui, comme le nom l'indique, sont des objets composés essentiellement d'olivine et dont les morphologies évoquent les amibes avec leurs pseudopodes. Ces objets ont des compositions intermédiaires entre les CAIs et les chondres.

Une observation importante est que les différents types de chondrites n'ont pas les mêmes abondances d'inclusions réfractaires. Alors que les chondrites carbonées peuvent contenir jusqu'à 5-10 % d'inclusions réfractaires, ces dernières ne représentent pas 0,1 % de la masse des chondrites ordinaires ou à enstatite (les deux autres grandes classes de chondrites). Peut-être cela indique-t-il que ces dernières se sont agglomérées plus tardivement, alors que le disque avait perdu l'essentiel de ses inclusions réfractaires. Malgré ces différences et les variations minéralo-

3. Inclusion réfractaire dans la météorite Acfer 331, une chondrite carbonée type de Mighei (CM2) trouvée en Algérie en 2001.

Dimensions de l'image : 3,7 mm x 2,5 mm.
(Micrographie prise en lumière polarisée et analysée par Georges Saccorani)

4. CAI dans la météorite de Vigarano (chondrite CV3).

Cette CAI a subi un épisode de fusion et a une forme compacte (bien qu'avec quelques invaginations), et une texture témoignant d'une cristallisation à partir d'un liquide. Elle contient des gros cristaux bleu-gris à blanc-bleu de méllilite, avec des inclusions de spinelle. Elle possède aussi un liseré, dit de Wark-Lovering, dû à un réchauffement rapide.

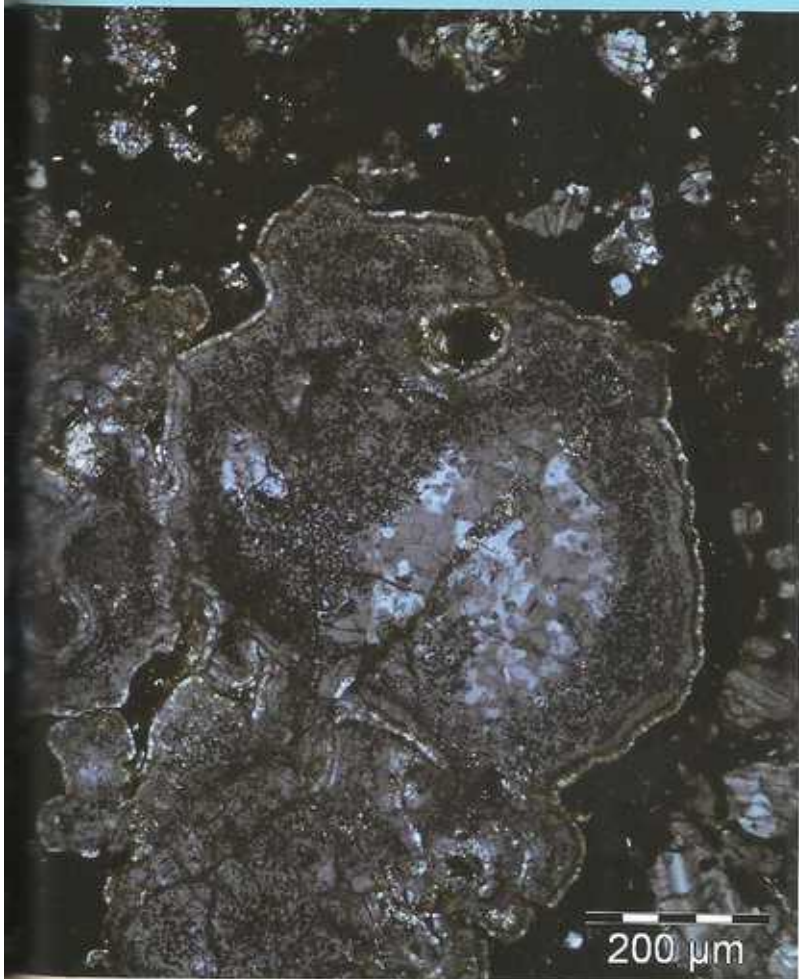
giques, les similitudes entre les inclusions réfractaires des divers types de chondrites suggèrent que toutes les inclusions réfractaires ont une origine commune avant leur dispersion dans le disque d'accrétion et leur incorporation dans les chondrites. Mais quelle est cette origine ?

UN PHÉNOMÈNE DE CONDENSATION À L'ORIGINE DES INCLUSIONS RÉFRACTAIRES

Historiquement, le premier modèle concernant la formation des inclusions réfractaires est le *modèle par condensation*. Les premiers calculs furent effectués par Harold Urey dans les années 1950, avant même que les inclusions réfractaires ne soient étudiées, mais c'est bien la chute d'Allende qui conféra à ce modèle toute son importance, avec notamment les travaux de Lawrence Grossman, à l'université de Chicago.



L'idée de ce modèle était que le disque d'accrétion était initialement très chaud, à cause de la chaleur dégagée lors de l'effondrement gravitationnel du nuage interstellaire dont il était issu. Le modèle consistait à calculer, par ordinateur, quels seraient les premiers minéraux se condensant lors du refroidissement du gaz (au-dessus de 2 100 °C, toute la matière est à l'état gazeux), et l'évolution de la composition minéralogique de la partie solide lorsque la température diminuait lentement. D'après ces calculs, les premiers minéraux qui se condensent étaient le corindon, l'hibonite, la méllilite, le spinelle, c'est-à-dire des minéraux typiques des inclusions réfractaires (lire encadré p. 40). À plus basses températures apparaissent l'olivine, le pyroxène, le plagioclase, etc., que l'on retrouve dans les chondres (qui sont passés par un épisode de fusion ultérieur) et la matrice.



Le modèle par condensation expliquait ainsi la composition des différents composants des chondrites, les inclusions réfractaires étant les premiers solides formés à partir du gaz.

Mais comme souvent, la réalité est plus complexe. D'un point de vue astrophysique, il paraît irréaliste de supposer que tout le disque d'accrétion était à haute température. On observe dans les chondrites, à côté des inclusions réfractaires, des grains (notamment présolaires) qui manifestement n'ont jamais connu de hautes températures. Seules les régions les plus internes du disque étaient susceptibles d'être assez chaudes en permanence pour produire des CAIs, à quoi s'ajoute la possibilité d'échauffements localisés transitoires plus loin du Soleil, par exemple lors du passage d'ondes de choc. Les inclusions réfractaires ont sans doute connu une histoire thermique mouvementée, et beaucoup ont subi des modifications depuis leur formation : épisode de fusion (comparer fig. 4 à fig. 2 et 3), ne serait-ce que superficiellement, évaporation partielle, recristallisation, sans parler d'éventuelles altérations une fois incorporées à l'astéroïde parent. Même si le modèle par condensation ne peut être accepté au pied de la lettre, il n'en demeure pas moins que, très probablement, les inclusions réfractaires se sont primitivement formées par condensation à partir d'un gaz chaud, sans préjudice des péripéties ultérieures. Mais où et quand ?

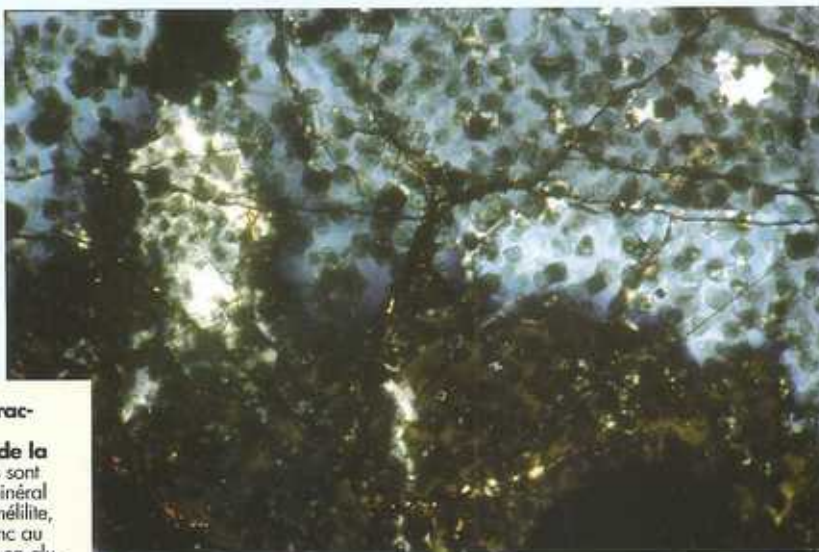
5. Une inclusion réfractaire dans la chondrite ordinaire de Bishunpur (LL3), tombée en Inde en 1895

(image en électrons rétrodiffusés prise par l'auteur). Les inclusions réfractaires sont rarissimes dans les chondrites ordinaires. Celle-ci (de forme allongée dans la direction diagonale) contient du spinelle (noir), du plagioclase anorthite (gris foncé) et du clinopyroxène alumineux (gris clair). Autour de l'inclusion, on trouve des chondres (débordant l'image), des fragments de chondres et des zones de matrice ; les grains blancs de tailles diverses (quasiment absents de l'inclusion réfractaire) sont des grains de métal ou de sulfure. Concernant la barre d'échelle, rappelons qu'un micronètre [1 μm] correspond à un millième de millimètre.

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES CAIs

Les CAIs contiennent des proportions variables d'hibonite ($\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$), de spinelle (MgAl_2O_4), de méllilite (mélange entre $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ et $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), de plagioclase (surtout l'anorthite $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), de pyroxène (surtout le diopside $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, avec plus ou moins d'aluminium et de titane), d'olivine (forstérite Mg_2SiO_4), etc. Les plus étudiées, pour des raisons de disponibilité et de commodité d'analyse, ont été des inclusions à gros grains, qui peuvent atteindre plusieurs centimètres de diamètre, abondantes dans les chondrites carbonées du type de Vigarano (les CV), mais ces grosses inclusions se sont avérées être largement atypiques des CAIs présentes dans l'ensemble des chondrites, souvent des agrégats à grains fins à spinelle, pyroxène et plagioclase (voir fig. 5). Pour citer un exemple important, dans les chondrites carbonées du type de

Mighei (les CM) — le groupe de chondrites carbonées le plus représenté en nombre de chutes, avec par exemple les météorites de Murchison et de Paris —, les CAIs n'ont essentiellement pas de silicate (c'est-à-dire de minéraux contenant du silicium et de l'oxygène) et sont dominées par l'hibonite : c'est dans les chondrites qu'on trouve le rare corindon (Al_2O_3) : en cela, elles sont plus réfractaires encore que leurs homologues des CV. ●



Zoom sur une inclusion réfractaire de la météorite de Vigarano (similaire à celle de la figure 3). Les cristaux verdâtres sont majoritairement du spinelle. Le minéral dans lequel ils sont inclus est la méllilite, qui change de teinte du bleu-blanc au marron (en bas) quand la teneur en aluminium décroît au profit du magnésium.

Micrographie en lumière polarisée et analyse prise par Catherine Collat.

UNE FORMATION PROBABLEMENT À PROXIMITÉ DU JEUNE SOLEIL...

Les hautes températures requises pour la production d'inclusions réfractaires étaient, nous l'avons dit, plus facilement atteignables près du Soleil, à une distance inférieure à 1 UA environ (1 UA (« unité astronomique ») = distance Soleil-Terre = 150 millions de kilomètres). Il faut noter que ces températures n'étaient pas tant générées par le rayonnement du Soleil que par la turbulence interne au disque d'accrétion, qui occasionnait des frottements à petite échelle. C'est parce que la chaleur était générée plus rapidement, et était d'autant mieux retenue dans le disque que le gaz était dense, que les régions les plus proches du Soleil étaient les plus chaudes. Comme la masse du disque diminuait avec le temps, les hautes températures régnaient surtout au début de son his-

toire, et cela est cohérent avec le fait que les inclusions réfractaires semblent n'avoir été produites que pendant une courte période (à l'échelle de la durée de vie du disque), d'une durée inférieure à une centaine de milliers d'années, au tout début du Système solaire, c'est-à-dire, rappelons-le, il y a 4 568 Ma.

Comment les inclusions réfractaires ont-elles été transportées de leur région d'origine à celle où se sont agglomérées les chondrites, qui devait plus ou moins correspondre à la position actuelle de la ceinture principale d'astéroïdes, entre 2 et 3 UA du Soleil ? Le transport a même dû aller plus loin, car on a identifié deux inclusions réfractaires parmi les échantillons que la mission Stardust a ramenés en 2006 de la comète Wild 2, probablement formée au-delà de l'orbite de Neptune, à 30 UA du Soleil.

... UNE DISPERSION DANS LE SYSTÈME SOLAIRE...

Une première théorie, proposée en 1996 par Frank Shu (université de Berkeley), postulait qu'à 0,06 UA du Soleil, se trouvait une région très chaude, appelée « point X », d'où partaient des vents guidés par des champs magnétiques. Ces vents auraient pu emporter des solides formés à hautes températures qui seraient retombés plus loin dans le disque. Ainsi serait expliquée non seulement la présence des inclusions réfractaires, mais aussi la formation des chondres qui auraient été formés dans la même région. C'était la théorie du vent X.

Mais il devint clair, dans les années 2000, que les chondres s'étaient formés 1 à 3 Ma après les inclusions réfractaires. Non seulement les chondres n'avaient pas pu se former dans le même environnement que



les inclusions réfractaires – rares d'ailleurs sont les inclusions contenant un assemblage des deux types d'objets – mais cette théorie expliquait mal pourquoi la production et le transport d'inclusions réfractaires ne s'étaient pas poursuivis au-delà des cent premiers milliers d'années. Ces considérations n'empêchent pas le vent X d'avoir existé, mais elles permettent de douter de son association au transport des composants des chondrites vers les régions externes du disque.

Depuis quelques années, le modèle le plus en vogue, développé sous différentes formes par Fred Ciesla (université de Chicago), Jeffrey Cuzzi (Nasa) et Alan Boss (Carnegie Institution for Science) est celui de la *diffusion turbulente*. Comme le disque d'accrétion était turbulent, il est en effet concevable que les mouvements erratiques du gaz aient pu envoyer certains des objets initialement formés près du Soleil à de plus grandes distances de celui-ci. Il y aurait donc eu une diffusion à partir des régions internes vers les régions externes du Système solaire primitif. Comme la diffusion était plus efficace au début alors que le disque était relativement compact, et qu'à l'époque, la région de formation des inclusions réfractaires était plus étendue, ce modèle

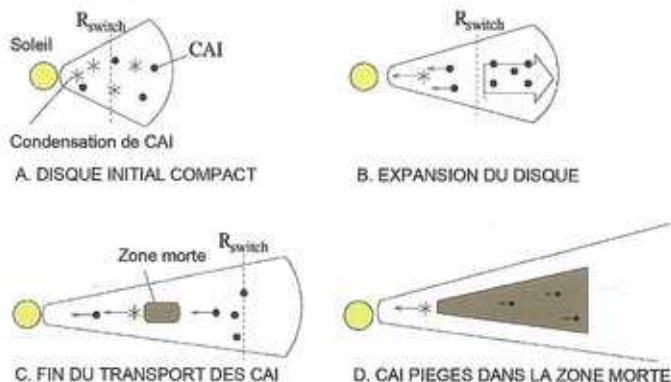
rendait compte de l'ancienneté des inclusions réfractaires relativement aux chondrites.

... ET UNE PRÉSERVATION JUSQU'À NOUS

Mais comment les inclusions réfractaires ont-elles pu être préservées dans le disque pendant plus de 3 Ma, jusqu'à leur incorporation dans les chondrites ? Il y a en effet deux obstacles : premièrement, si on fait la moyenne des mouvements turbulents, on trouve que, généralement, le gaz du disque se dirige plutôt vers le Soleil, qui à cette époque n'a pas terminé sa croissance. Les inclusions réfractaires tendraient donc à être également entraînées vers le Soleil. Deuxièmement, le gaz et les inclusions réfractaires n'évoluent pas exactement à la même vitesse, d'où un frottement entre les deux, dont le résultat est que la dérive des inclusions réfractaires vers le Soleil est encore plus rapide que celle du gaz. Tout cela ne devrait pas permettre de garder les inclusions réfractaires en quantités significatives plus de quelques centaines de milliers d'années dans le disque.

Une première solution avancée par Jeffrey Cuzzi est de supposer que les régions internes du disque d'accrétion

auraient été enrichies en éléments réfractaires, et donc auraient pu produire plus d'inclusions réfractaires que l'on estime généralement, et ce de façon à compenser leur déperdition dans les millions d'années qui suivent. Mais la possibilité même d'un tel enrichissement, compte tenu de la matière disponible, demeure incertaine. Une deuxième solution a été développée dans le cadre de ma thèse de doctorat. Nous avons étudié dans quelle mesure, à la lumière des connaissances astrophysiques actuelles, le disque a pu rester turbulent pendant son histoire. On se rend compte qu'après une centaine de milliers d'années, a dû apparaître dans le disque toute une zone, s'étendant de moins de 1 UA jusqu'à plusieurs dizaines d'UA, où la turbulence était très réduite : c'est ce que Charles Gammie (université de l'Illinois) avait appelé en 1996 la *zone morte*. Or dans ces conditions de turbulence réduite, le mouvement général du gaz vers le Soleil aurait été ralenti. Non seulement la vitesse du gaz, qui entraîne les inclusions réfractaires, aurait été diminuée, mais le gaz s'accumulant dans cette zone morte aurait augmenté de densité, lui permettant de mieux retenir les solides. Comme la zone morte a dû perdurer plusieurs millions d'années, le problème de la préservation des inclusions réfractaires serait ainsi simplement résolu. Nous avons récemment publié cette idée dans le journal *Astronomy & Astrophysics* (voir aussi fig. 6). L'avenir nous dira ce qu'il faut en penser.



6. Schéma du scénario complet que nous avons récemment proposé, en quatre phases. Le disque d'accrétion est présenté en coupe (le disque étant symétrique par rapport au Soleil, nous n'en présentons qu'une partie). Nous partons d'un disque d'accrétion initial très compact, de quelques UA de rayon, où la région de formation des CAI est assez étendue (phase A). L'expansion du disque favorise le transport des CAI vers l'extérieur du Système solaire par des mouvements turbulents (phase B). Ce transport cesse après une centaine de milliers d'années, mais les CAI sont empêchés de retourner vers le Soleil par l'apparition de la zone morte (phase C), qui les piège pendant plusieurs millions d'années (phase D). C'est dans la zone morte que s'agglomèrent finalement les chondrites. « R_{switch} » est la distance au-delà de laquelle le flot moyen du gaz est dirigé vers l'extérieur, et en deçà de laquelle il est dirigé vers le Soleil.

LES INCLUSIONS RÉFRACTAIRES, UN SUJET ACTIF DE RECHERCHE

Pour résumer, les inclusions réfractaires sont les plus anciens solides du Système solaire. Elles se sont probablement formées par condensation à partir d'un gaz chaud, mais ont ensuite subi différents épisodes de chauffage jusqu'à leur agglomération avec les autres composants des chondrites, quelques millions d'années plus tard. Le transport des inclusions réfractaires semble avoir été assuré par des mouvements turbulents dans le disque d'accrétion. Les relations de parenté entre les inclusions réfractaires et les autres composants des chondrites, qui constituent ensemble la matière première avec laquelle les planètes ont été bâties, restent encore un sujet brûlant d'investigation. Les inclusions réfractaires, premiers témoins de la genèse du Système solaire, n'ont pas fini de fasciner les chercheurs...