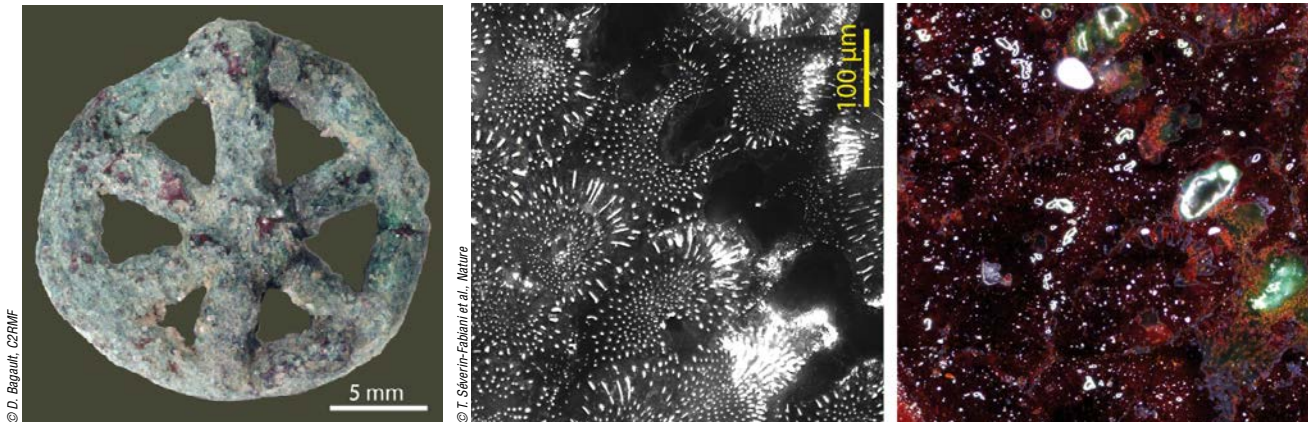


Archéologie



SOLEIL fait la lumière sur la cire perdue

Au synchrotron SOLEIL, en utilisant l'imagerie par photoluminescence, des chercheurs ont décrypté la fabrication du plus ancien objet métallique fondu par la technique de la cire perdue.

La cuprite, de formule Cu_2O , est le principal produit de l'oxydation du cuivre. En exploitant sa semiconductivité, une équipe menée par Loïc Bertrand, du synchrotron SOLEIL, et par Benoît Mille, du Centre de recherche et de restauration des musées de France, vient de révéler comment, à la fin du V^e millénaire avant notre ère, la plus ancienne cire perdue de l'humanité fut coulée.

Ce procédé de fonderie consiste à construire un modèle de cire de l'objet à réaliser, à le recouvrir d'argile, puis à le faire cuire en ayant prévu un trou pour que la cire fondue s'écoule. On obtient ainsi un moule dans lequel on peut couler du métal, ce qui donne, après refroidissement, l'objet final.

Les chercheurs ont étudié une rouelle, c'est-à-dire l'une de ces amulettes métalliques en forme de petite roue à rayons très utilisées pendant les âges métallurgiques pour faire des offrandes. Aujourd'hui, elle se présente sous la forme d'une petite masse corrodée large de deux centimètres entièrement en cuprite. Découverte en 1985 sur le site de Mehrgarh, à l'ouest de la vallée de l'Indus, elle date de

l'âge du Cuivre, le premier des âges métallurgiques, qui, dans cette région, s'étend de 4500 à 3600 avant notre ère.

L'étude de cette rouelle dans les années 2000 avait déjà révélé sa production à la cire perdue. Pour en préciser les modalités, les chercheurs ont tiré parti d'une propriété des semiconducteurs : la photoluminescence. En éclairant la rouelle avec une lumière d'énergie suffisante, ils ont déclenché l'émission de lumière par la cuprite. Cette lumière leur a permis de faire des analyses spectroscopiques et d'enregistrer des images très précises, dans le proche infrarouge, des défauts cristallins de la cuprite.

Les résultats confirment que la forme complexe de la rouelle a bien été coulée en un seul tenant, comme on le pensait. Ils montrent ensuite que le cuivre employé, probablement trouvé en pépites dans la nature, était particulièrement pur. Toutefois, les chercheurs ont été surpris de découvrir dans les images de photoluminescence (*ci-dessus*) des structures en bâtonnets, qui prouvent que des inclusions de cuprite ont été prises dans la masse de la rouelle dès son coulage. L'équipe de recherche en a déduit que l'atmosphère du

four où le cuivre fut fondu était oxydante. Ce four devait donc être assez rudimentaire. Dans les fonderies d'aujourd'hui, on fond en effet le métal dans une atmosphère non oxydante, afin d'éviter la formation d'oxydes.

En outre, l'observation à différentes échelles du matériau a montré que le mélange de cuprite et de cuivre d'origine a fondu à une température précise, qui a pu être déterminée à un degré près, ainsi que la température de solidification.

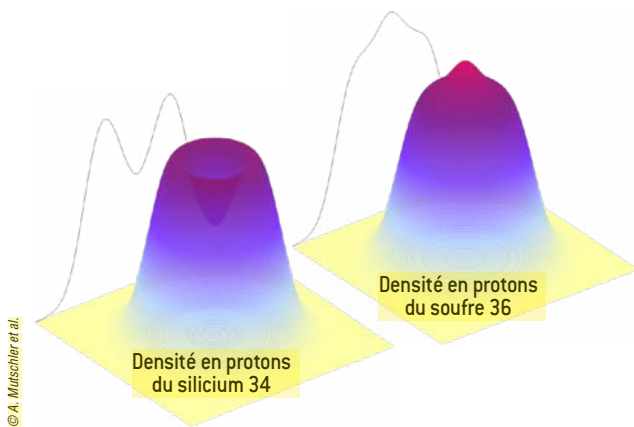
La réalisation d'une rouelle en cuivre pur étonne, car l'archéologie suggère que la cire perdue n'a été vraiment adoptée qu'après la mise au point d'alliages faciles à couler. De fait, les plus anciens objets complexes coulés par cire perdue connus avant la découverte de la rouelle, ceux de Nahal Mishmar, en Israël, ont été formés dans un alliage cuivre-arsenic. À Mehrgarh, les chercheurs ont constaté qu'un alliage très particulier de cuivre riche en plomb apparaît au cours de l'âge du Cuivre. Ainsi, l'emploi de cuivre pur pour produire la rouelle apparaît en quelque sorte comme une erreur de débutant...

F.S.

*Nature Communications,
en ligne le 15 novembre 2016*

La rouelle de Mehrgarh (à gauche) est, avec d'autres objets découverts en même temps, le plus ancien exemple d'utilisation de la technique de la cire perdue. Une image de l'intérieur de la rouelle obtenue par photoluminescence à haute dynamique spatiale (au milieu) révèle une structure en bâtonnets invisible autrement. Elle est comparée à une image du même endroit obtenue par microscopie optique (à droite).

Physique nucléaire



Des noyaux atomiques qui font des bulles

Certains noyaux exotiques présenteraient un creux en leur centre. Après quarante ans de recherche, l'existence de ces « noyaux bulles » vient d'être confirmée expérimentalement.

On se représente souvent les noyaux atomiques comme des amas sphériques de protons et neutrons. Pourtant, ils prennent parfois des formes étonnantes : en poire, en cigare, etc. Dans toutes ces configurations, le cœur du noyau est dense. Dès les années 1970, cependant, il a été suggéré que certains noyaux pouvaient avoir un cœur appauvri en protons et former des noyaux « bulles ». Un tel noyau a été mis en évidence par l'équipe d'Olivier Sorlin, chercheur au Ganil (le Grand accélérateur national d'ions lourds, à Caen).

L'existence des noyaux bulles a été longtemps considérée comme peu probable au regard des modèles décrivant la matière nucléaire. La structure nucléaire est surtout définie par l'interaction forte qui lie les protons aux neutrons. Les propriétés de cette force sont telles que la densité est uniforme et quasi universelle au cœur de tous les noyaux connus : environ 0,16 nucléon par femtomètre cube (soit une densité de 200 millions de tonnes par centimètre cube). Cette densité est quasi constante jusqu'à la

périphérie du noyau, où elle chute rapidement.

Quelques noyaux exotiques découverts par la suite, tels que les noyaux à halo, échappent à cette description. Mais qu'en était-il des noyaux bulles ? Si l'on considère que les protons et les neutrons du noyau atomique sont des objets quantiques, leurs probabilités de présence dans le volume du noyau se déduisent de leurs fonctions d'onde. Dans certains cas, elles s'annulent au centre du noyau. Des calculs prévoyaient que le silicium 34 présentait une déplétion en protons au centre de 40 % par rapport au soufre 36, qui a deux protons de plus que le silicium 34. Mais ces résultats dépendaient du modèle théorique utilisé, et il était donc crucial de les mettre à l'épreuve.

En analysant des données de collisions et de désintégrations au Laboratoire américain du cyclotron supraconducteur de l'université d'État du Michigan, Olivier Sorlin et ses collègues ont comparé la structure du silicium 34 et du soufre 36. Ils ont montré que les deux protons manquants du silicium sont ceux qui occupent

précisément le cœur du noyau de soufre. Le silicium présente donc un déficit de protons en son cœur : il s'agit bien d'un noyau bulle.

Les perspectives de l'étude des noyaux bulles sont nombreuses. Par exemple, les noyaux sont en général si denses qu'ils sont considérés comme très difficilement compressibles. Avec sa structure de noyau bulle, le silicium 34 présenterait un mode de compression tout à fait unique.

Par ailleurs, le silicium 34 n'est peut-être pas le seul noyau où la densité est atypique. Selon certains modèles, les noyaux superlourds présenteraient une « peau de neutrons » telle que la densité de neutrons à la surface du noyau serait caractérisée par une décroissance lente plutôt qu'abrupte. Au Ganil, le nouvel accélérateur d'ions Spiral2 a été inauguré le 3 novembre 2016. Il est dédié à l'étude de la structure de tels noyaux et révélera sans doute de nouvelles structures tout aussi exotiques dans les années à venir.

S. B.

A. Mutschler et al., *Nature Physics*, en ligne le 24 octobre 2016

Le noyau atomique du silicium 34 est étonnant : sa densité en protons (graphique à gauche) présente un déficit vers le centre du noyau, en comparaison avec un noyau plus classique tel que le soufre 36. Cette structure exotique de « noyau bulle » vient d'être mise en évidence. Au Ganil, à Caen, le nouvel accélérateur d'ions Spiral2 (ci-dessus à droite, quelques-uns de ses aimants de focalisation) permettra de rechercher d'autres noyaux bulles parmi les éléments superlourds.