

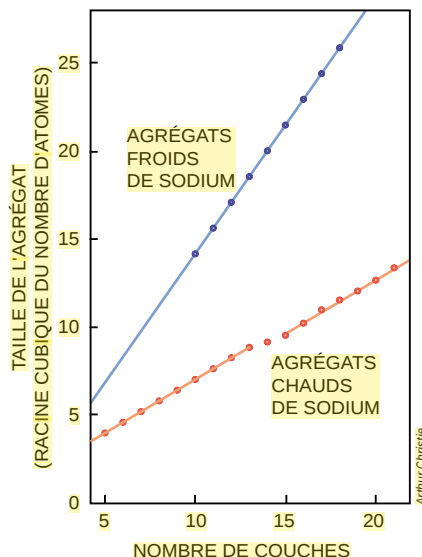
ont laissés s'associer à basse température. Curieusement, les agrégats les plus stables sont différents de ceux qui se forment à température élevée : de nouveaux nombres magiques apparaissent, correspondant à des groupes d'atomes rassemblés en icosaèdres parfaits, volumes à 20 faces triangulaires.

Ces icosaèdres grossissaient progressivement, par ajout de couches d'un atome de sodium d'épaisseur. Le nombre d'atomes ajoutés à chaque couche forme la séquence de nombres magiques. Les formes polyédriques simples créées de cette façon sont plus stables que des arrangements irréguliers, car l'énergie nécessaire pour maintenir les atomes en place est inférieure lorsque le nombre d'arêtes est minimisé.

La taille des agrégats métalliques froids magiques augmente linéairement avec le nombre de couches atomiques, mais moins vite que la taille des agrégats métalliques chauds magiques n'augmente avec le nombre de couches électroniques. De surcroît, la pente de la droite qui représente la taille en fonction du nombre de couches varie selon le type d'agrégats froids : différentes pentes indiqueraient des polyèdres de formes différentes. Les agrégats froids de sodium ou de calcium, par exemple, pour lesquels la pente est égale à 1,5 environ, sont très probablement des icosaèdres. La pente pour des agrégats comportant un nombre égal d'atomes de sodium et d'iode ou de sodium et de chlore est exactement égale à 1, ce qui signifie qu'ils ont la forme d'un cube. La raison pour laquelle l'une des formes apparaît plutôt qu'une autre demeure mal comprise.

Le cas des agrégats froids d'aluminium ou d'indium est particulier. En traçant leur taille (en fait, la racine cubique des nombres magiques correspondants) en fonction du nombre de couches, on trouve une pente égale à 0,220, inférieure à celle trouvée dans le cas de couches électroniques stables (0,6) et à celles d'atomes assemblés sous forme de tétraèdres (0,550), d'octaèdres (0,874), d'icosaèdres (1,493) ou de cubes (1,0). Aucun assemblage d'atomes en polyèdres réguliers ne correspond à la série de nombres magiques trouvés pour ces agrégats. Quelle forme ont-ils ?

Des physiciens de l'équipe de Stuttgart ont proposé une explication :



**3. LA TAILLE DES AGRÉGATS, exprimée par la racine cubique du nombre d'atomes qu'ils contiennent, croît linéairement avec le nombre de couches. La pente de la droite dépend de la température des agrégats dans le jet. Les agrégats froids de sodium sont constitués d'arrangements compacts d'atomes en couches d'icosaèdres. Cette géométrie donne une pente d'environ 1,5 (droite bleue). À l'inverse, la forme géométrique des agrégats chauds de sodium est commandée par les couches électroniques donnant une pente d'environ 0,6 (droite rouge). Le décalage visible pour la couche 14 est la manifestation d'une super-couche telle qu'elle est prévue par la théorie des orbites périodiques.**

ces agrégats d'aluminium et d'indium formeraient des octaèdres, mais, entre un nombre magique et le suivant, les atomes ajoutés couvriraient seulement une des faces triangulaires de l'octaèdre. Ce comportement expliquerait la faible valeur de la pente. Cette interprétation plausible soulève cependant une nouvelle question : pourquoi des octaèdres complets ne sont-ils pas plus stables que ceux dont une ou deux faces triangulaires seulement est recouverte ?

Les nombres magiques provenant de l'empilement des atomes ne déterminent pas de manière univoque la forme des polyèdres formés. Par exemple, la série des nombres magiques associés aux agrégats en forme d'icosaèdre est identique à celle que l'on trouve pour des cubo-octaèdres (des cubes aux coins coupés). L'étude d'agrégats froids de calcium indique que, pour cette suite de nombres magiques, les agrégats formés sont des icosaèdres, mais comment en être certain, alors qu'on n'a jamais vu d'icosaèdres directement ? S'ils étaient au repos, les agrégats les plus gros pour-

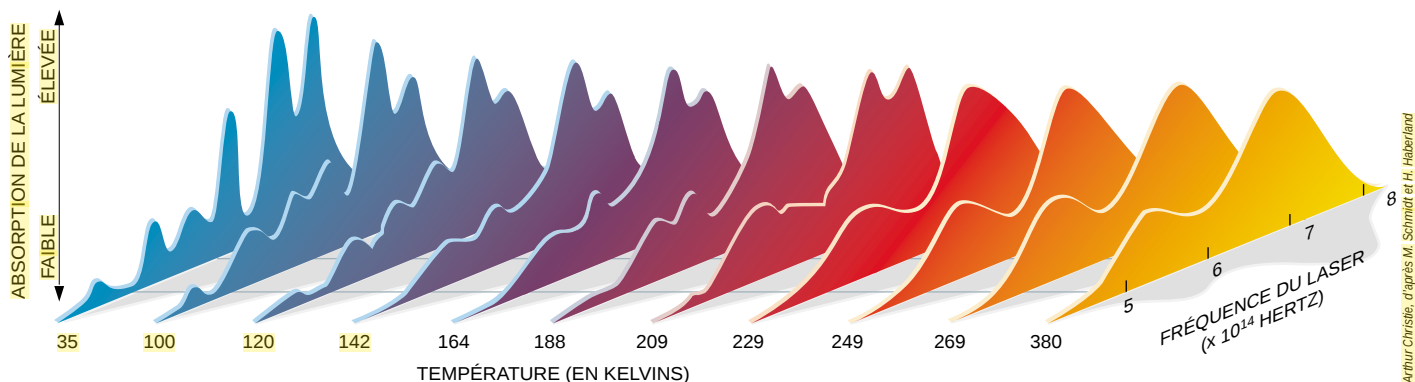
raient être observés au microscope électronique, mais les agrégats sont formés à l'intérieur du jet d'atomes, et on ne peut les arrêter sans les déformer.

## Couches en compétition

La forme et la stabilité des agrégats métalliques sont déterminées par les niveaux d'énergie électronique et les niveaux d'énergie atomique. La dimension et la température sont des facteurs décisifs qui commandent quel type de couche prévaut. Toutefois, la mesure de la température des agrégats est difficile dans les jets ; peut-on même définir une température ? En physique, on ne peut définir une température que pour des systèmes composés de nombreuses particules en équilibre thermodynamique. Or, dans les jets, chaque agrégat suit son propre chemin, sans interaction avec ses voisins : isolé, il n'est pas en équilibre thermodynamique avec ses voisins.

Malgré tout, les tendances sont claires. Lorsque l'on chauffe la tuyère de la source, les couches d'icosaèdres bien formés d'agrégats froids de sodium semblent disparaître. Cette transition correspond probablement à la fusion des agrégats, de sorte qu'ici la température de fusion dépend de la taille des agrégats.

La même transition de phase a lieu dans des agrégats d'aluminium. Lorsque la température de la source est supérieure à 225 °C, température bien inférieure à la température de fusion de l'aluminium solide (660 °C), la pente de la droite représentant la taille des agrégats magiquement stables en fonction du nombre de couches n'est plus égale à 0,220, comme c'est le cas lorsque les agrégats sont octaédriques, mais à 0,6 environ, valeur qui correspond à une stabilité déterminée par les couches électroniques. Bien que la température de la tuyère soit inférieure à la température de fusion du métal solide, on peut supposer que ces agrégats ont fondu. Il n'y a pas lieu de s'en étonner : la notion de température, comme celle de transition de phase entre solide et liquide, est mal définie pour des objets de cette taille. La surface des agrégats, en fondant localement, pourrait détruire l'assemblage ionique, ce qui permettrait à la stabilité que confèrent les couches électroniques complètement remplies de prendre le contrôle.



Arthur Christie, d'après M. Schmidt et H. Haberland

**4. L'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE LASER** par les agrégats de sodium révèle que leur structure dépend de leur température de formation. À basse température, l'absorption varie beaucoup avec la fréquence (en bleu), une caractéristique de l'absorption par des molé-

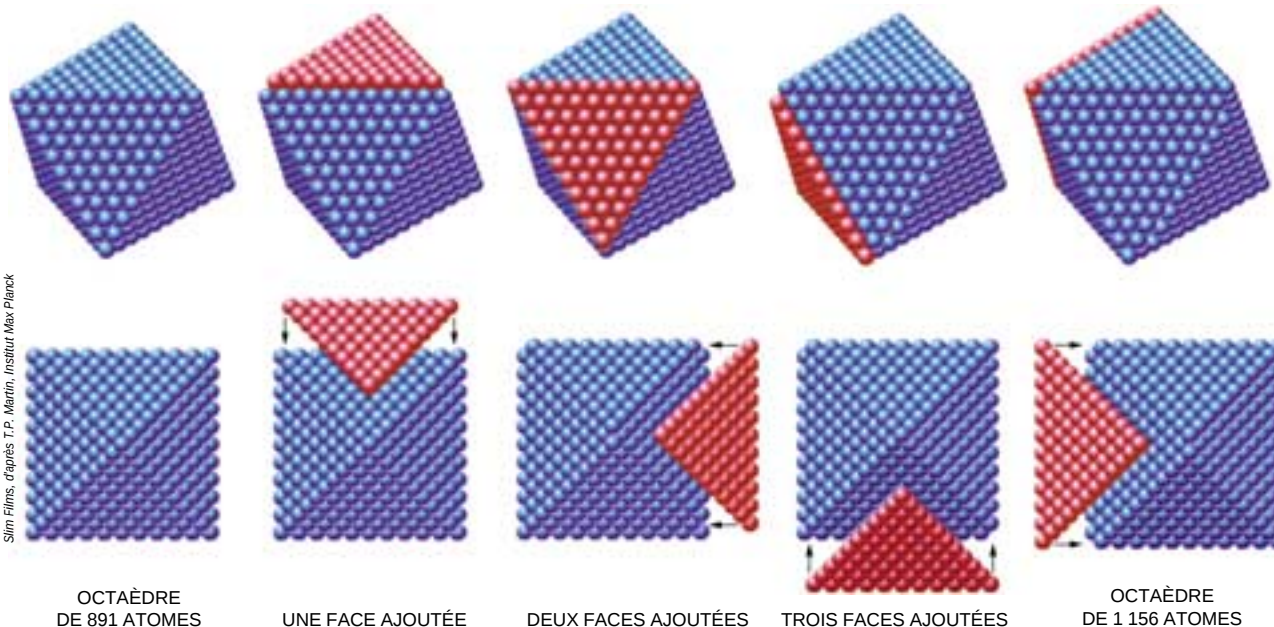
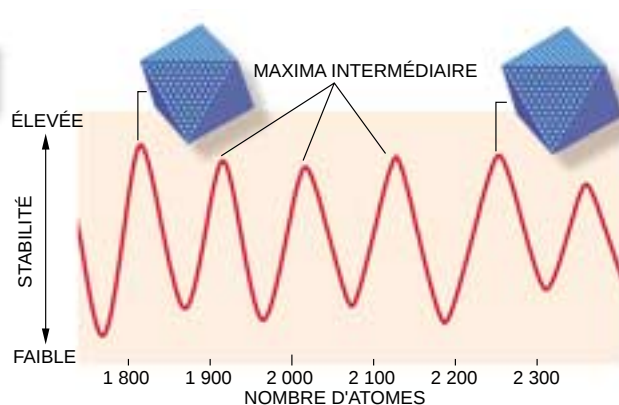
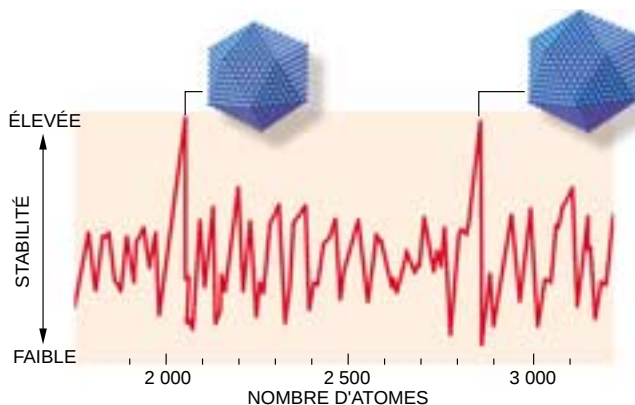
cules. À mesure que la température augmente, le spectre devient plus régulier, avec seulement deux gros renflements (en orange) : c'est l'indication que les agrégats sont «liquides», dépourvus de structure interne.

## L'assemblage des atomes dans les agrégats froids

Les physiciens expliquent la stabilité exceptionnelle des agrégats métalliques froids à l'aide de la géométrie. Les agrégats froids de sodium, par exemple, sont particulièrement stables lorsque les atomes se disposent sous la forme d'icosaèdres, des polyèdres à 20 faces (à gauche).

La stabilité d'agrégats froids d'atomes d'aluminium assemblés en minuscules octaèdres est plus difficile à expliquer. Elle est

importante lorsque les atomes forment des octaèdres réguliers (à droite), mais des maxima se produisent également pour des octaèdres irréguliers : on suppose que la stabilité est également accrue lorsque les atomes ne couvrent qu'une seule des faces d'un octaèdre (parties colorées en rouge, ci-dessous). Comme l'ajout d'une quatrième face conduirait à un octaèdre parfait, on s'attend à ne trouver que trois maxima intermédiaires de stabilité, ce qui est le cas.



Slim Films, d'après T.P. Martin, Institut Max Planck