

aussi des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les gaz d'échappement des automobiles, qui contaminent l'atmosphère terrestre. Toutefois, la localisation et l'association de ces hydrocarbures dans les globules carbonatés rend leur découverte intéressante : dans ALH84001, ils sont toujours dans des régions riches en carbonates, y compris dans les globules. Leur dépôt est donc associé à la circulation du liquide à l'origine des globules. En outre, Richard Zare et Simon Clemett, de l'Université de Stanford, ont montré, grâce à une technique analytique sensible, qu'ALH84001 contient peu d'hydrocarbures aromatiques polycycliques différents et que tous ont été retrouvés parmi les produits de décomposition de micro-organismes terrestres. Ces hydrocarbures étaient à l'intérieur de la météorite, où la contamination est très improbable : les carbonates sont bien martiens et contiennent les vestiges d'anciens organismes vivants.

Enfin, en 1996, une équipe de l'Open University a montré que le carbone de ces molécules organiques a une composition isotopique proche de celle de micro-organismes qui utiliseraient le méthane comme source nutritive. Si cette découverte est confirmée, elle sera l'une des indications les plus solides en faveur d'une activité biologique dans la météorite martienne.

Des fossiles de microbes ?

D'autres particularités de la roche indiquent qu'au moins des vestiges de microbes sont entrés en contact avec la roche : dans les globules de carbonate, on a trouvé des corps ovoïdes et tubulaires d'environ 380 nanomètres de long (voir la figure 4) qui seraient les restes fossilisés de microbes eux-mêmes. Une bactérie terrestre de cette taille pourrait sans difficulté contenir l'ensemble des organites nécessaires à son fonctionnement (la taille minimale est d'environ 250 nanomètres). D'autres structures tubulaires incurvées découvertes dans les globules ont des longueurs de 500 à 700 nanomètres.

D'autres structures, dix fois plus petites que les bactéries terrestres, sont présentes dans ALH84001 : ovoïdes de 40 à 80 nanomètres de long, corps tubulaires de 30 à 170 nanomètres de long et de 20 à 40 nanomètres de diamètre environ. Ce sont peut-être les fossiles de petits appendices de bactéries, analogues à ceux que possèdent certaines bactéries



NASA Jet Propulsion Laboratory

5. DE LA GLACE couvre parfois une partie du sol martien rocheux, rouge, sur à peine quelques micromètres d'épaisseur. La vie qui aurait laissé des traces sur la météorite ALH84001 se serait toutefois développée en profondeur, à plusieurs kilomètres de cette surface.

terrestres. Surtout, ces structures ovoïdes et allongées ressemblent, par leur taille et leurs formes, aux nanobactéries terrestres, de 20 à 400 nanomètres de long, dont des fossiles ont été découverts dans des basaltes du bassin de la rivière Columbia, dans l'État de Washington.

Si ALH84001 se trouvait sur Mars il y a 4,5 milliards d'années, lorsque la planète était plus humide, plus chaude et possédait une atmosphère plus dense, nous devrions trouver des indices que la roche a été en contact avec l'eau. Pourtant la météorite ne contient que de très petites quantités de minéraux argileux hydratés : elle n'a séjourné que peu de temps, voire pas du tout, à la surface de Mars, riche en eau. En outre, ces minéraux ont pu aussi bien se former pendant le séjour de la météorite en Antarctique.

Quand les traces de vie que nous observons dans ALH84001 sont-elles apparues ? Nous pourrions examiner cette question si nous connaissions l'âge des carbonates, mais nous n'avons qu'une certitude : les carbonates ont cristallisé dans les fissures de la météorite après la cristallisation de la roche elle-même. Des âges de 1,3 à 3,6 milliards d'années ont été avancés. Si les carbonates dans ALH84001 s'étaient formés voici 3,6 milliards d'années, ils seraient les vestiges de la toute première vie martienne.

Si des organismes vivants ont existé sur Mars, ils ont peut-être des descendants aujourd'hui, dans des nappes d'eau souterraines par exemple. Mars est abondamment couverte de basaltes, fracturés par un bombardement d'astéroïdes dans ses premiers 600 millions d'années. Ces fractures constituaient des voies d'infiltration pour l'eau et des abris pour la vie lorsque la planète s'est refroidie. Une situation analogue existe sur Terre : des espaces entre

des coulées de lave successives permettent la circulation et la retenue d'eau souterraine qui contient des bactéries vivantes. Des organismes pourraient aussi subsister ou se développer sur Mars autour de sources chaudes ou de systèmes hydrothermaux souterrains, où des déséquilibres chimiques seraient maintenus, comme sur les «cheminées chaudes» riches en minéraux des fonds océaniques terrestres.

Nous espérons maintenant une mission vers Mars qui rapporterait de nouveaux échantillons, afin de résoudre le problème de la vie sur cette planète. Les indications actuelles doivent devenir des certitudes.

Everett GIBSON, David MCKAY et Kathie THOMAS-KEPRTA travaillent au Centre spatial Johnson de la NASA à Houston. Christopher ROMANEK travaille à l'Université de Georgie.

Mars, sous la direction de Hugh H. Kieffer, Bruce M. Jakosky, Conway W. Snyder et Mildred S. Matthews, University of Arizona Press, 1992.

Harry Y. MCSWEEN, *What We Have Learned about Mars from SNC Meteorites*, in *Meteoritics*, vol. 29, n° 6, pp. 757-779, novembre 1994.

David S. MCKAY et al., *Search for Past Life on Mars : Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001*, in *Science*, vol. 273, pp. 924-930, 16 août 1996.

James FREDRICKSON et Tullis ONSTOTT, *Les micro-organismes de l'intérieur du Globe*, in *Pour la Science*, décembre 1996.

Michael H. CARR, *Water on Mars*, Oxford University Press, 1996.

Jay BARBREE, Martin CAIDIN et Susan WRIGHT, *Destination Mars : In Art, Myth and Science*, Penguin Studio, 1997.

Jeffrey KARGEL et Robert STROM, *Les changements climatiques sur Mars*, in *Pour la Science*, janvier 1997.

Agrégats métalliques et nombres magiques

MATTHIAS BRACK

L'observation de minuscules agrégats métalliques révèle pourquoi les solides réagissent différemment des atomes qui les composent.

Quand on chauffe un morceau de métal jusqu'à l'évaporation et que l'on injecte la vapeur dans une chambre à vide, le jet se condense en minuscules agrégats composés de quelques atomes à quelques milliers d'atomes. Ces agrégats métalliques, de taille bien inférieure à celle des grains de sable, constituent un arrangement de la matière aux propriétés étonnantes.

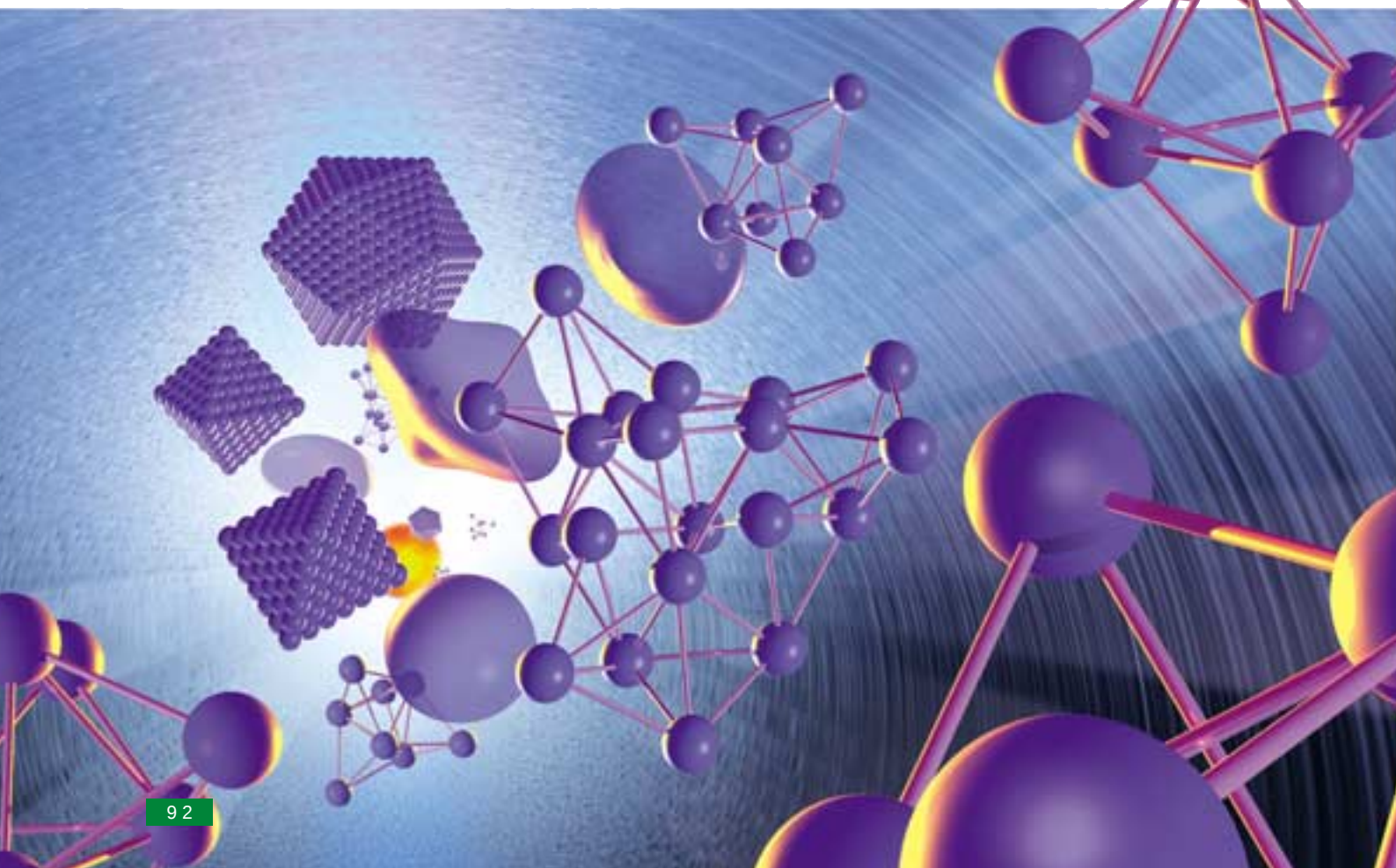
Bien que la plupart des expériences sur les agrégats mettent en jeu de minuscules solides, les agrégats métalliques

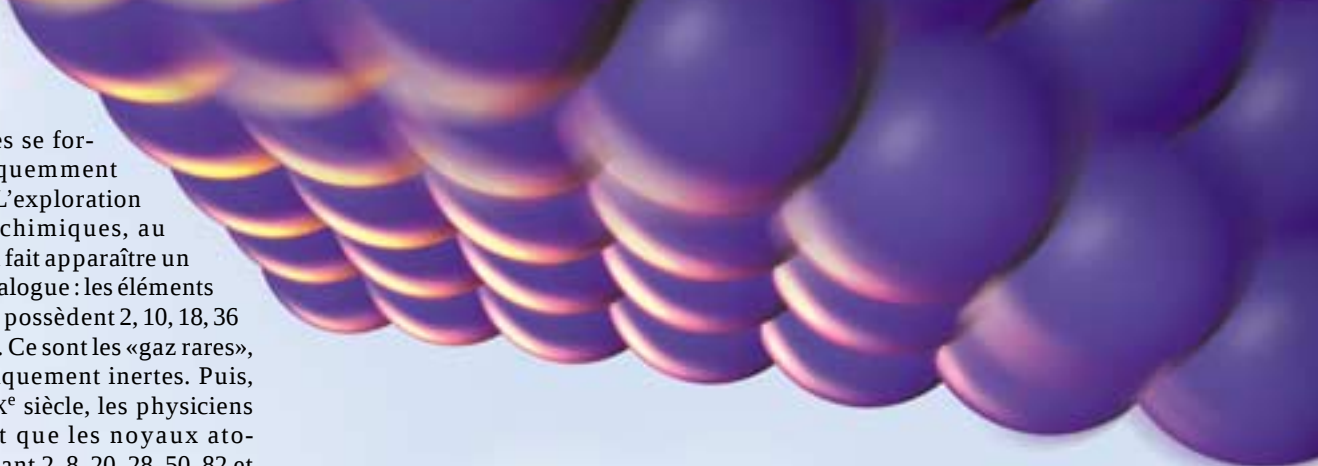
peuvent, en principe, être arbitrairement grands. Ce sont des systèmes intermédiaires entre les atomes, ou les molécules isolées, et les solides, ou les liquides macroscopiques. En ce sens, ils relient le microcosme au macrocosme.

Les physiciens s'étonnent de leurs propriétés. Pourquoi certains d'entre eux sont-ils plus stables que d'autres? À partir de combien d'atomes les propriétés d'un agrégat ressemblent-elles à celles de la matière organisée? Comment la structure d'un agrégat change-t-elle lorsqu'on lui ajoute des atomes?

Les chimistes, également, s'intéressent beaucoup aux agrégats, car ils savent que certains agrégats métalliques sont de remarquables catalyseurs de réactions chimiques. Ils aimeraient une meilleure compréhension de leurs propriétés, car ils en auraient ainsi une meilleure maîtrise. Après dix années de recherche, cette compréhension est proche.

Examinons d'abord pourquoi, lorsque l'on forme des agrégats métalliques,





certaines tailles se forment plus fréquemment que d'autres. L'exploration des éléments chimiques, au siècle dernier, a fait apparaître un phénomène analogue : les éléments les plus stables possèdent 2, 10, 18, 36 ou 54 électrons. Ce sont les «gaz rares», qui sont chimiquement inertes. Puis, au cours du XX^e siècle, les physiciens ont découvert que les noyaux atomiques contenant 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126 protons ou neutrons sont également exceptionnellement stables. Pour cette raison, ces noyaux sont dits «magiques». Le noyau du plomb, qui contient 82 protons, est «magiquement stable», et la forme de cet élément contenant 126 neutrons est «doublement magique».

Stabilité magique

Les agrégats métalliques peuvent être également magiques. En 1984, des physiciens de l'Université de Berkeley ont étudié des agrégats formés à partir de sodium métallique chauffé. Ils ont observé que les agrégats à 8, 20, 40 ou 58 atomes sont beaucoup plus nombreux que les autres. Cette abondance est due à leur exceptionnelle stabilité.

Aujourd'hui les physiciens savent que, quand on chauffe des agrégats instables à une température suffisante, ils perdent des atomes et se transforment en agrégats plus petits et plus stables. Pour les agrégats stables de sodium chaud, la séquence des nombres magiques continue avec 92, 138, 198, 344, 442, 554... Les agrégats de sodium (et de plusieurs autres métaux) contenant ce nombre d'atomes demeurent stables même lorsqu'ils sont chauffés jusqu'à devenir des gouttelettes liquides.

Pourquoi ces nombres ? Parce que les électrons de liaison ne peuvent avoir que certaines énergies.

Dans les atomes isolés, les électrons surnuméraires par rapport au nombre d'électrons des gaz rares sont faiblement liés et

s'éloignent facilement de l'atome. Ces électrons «de valence» sont responsables des différentes propriétés chimiques des éléments.

Dans un agrégat métallique (ou dans un morceau de métal plus gros) les électrons de valence ne restent pas attachés à leur atome d'origine, mais se déplacent librement entre les atomes : ils sont délocalisés. Néanmoins, ils demeurent à l'intérieur ou à proximité de l'agrégat, parce qu'ils sont attirés par les charges devenues positives des atomes qu'ils quittent (sans les électrons de valence, les charges positives du noyau ne sont plus équilibrées par un nombre égal de charges négatives, et l'atome, précédemment neutre, devient un ion positif).

Pour comprendre pourquoi un agrégat particulier est stable, les physiciens devraient calculer la configuration détaillée de tous les ions internes et de tous les électrons de valence. Le calcul de cette configuration est difficile, mais on obtient de bons résultats en modélisant un agrégat métallique par une «gelée» homogène, chargée positivement et capable d'attirer les électrons de valence.

Les énergies des électrons de valence sont quantifiées, c'est-à-dire que leurs énergies ont des valeurs déterminées, jamais des valeurs intermédiaires. En outre, dans un agrégat métallique tout comme dans un atome, les énergies accessibles ne sont pas espacées régulièrement, mais groupées en paquets de niveaux proches, séparés par de grands espaces. Pour des raisons historiques, ces paquets de niveaux d'énergie sont nommés couches électroniques, bien que les électrons ne soient pas phy-

siquement dans des couches. Le nombre d'électrons que peut contenir chaque couche est limité et, lorsqu'une couche est pleine, l'atome ne réagit pas avec les autres atomes. Les atomes dont les couches sont entièrement remplies sont ainsi particulièrement stables.

Dans les agrégats métalliques, les nombres magiques correspondent au nombre d'électrons de valence qui remplissent complètement une ou plusieurs couches et rendent ces agrégats stables (le même phénomène préside à la stabilité des noyaux atomiques : lorsque les protons et les neutrons remplissent complètement une couche, le noyau est stable).

Les agrégats métalliques les plus stables sont quasi sphériques ; les autres sont étirés ou aplatis, comme des crêpes ou des ballons de rugby, voire des poires, des citrons, des diamants ; parfois même, ils ne présentent aucune symétrie. Dans tous les cas, la forme est celle pour laquelle l'énergie totale de l'agrégat est minimale. Comme le même phénomène de déformation se retrouve à propos des noyaux atomiques, les physiciens des agrégats ont repris certains outils théoriques utilisés en physique nucléaire.

La mécanique quantique décrit parfaitement les couches électroniques des agrégats et les nombres magiques qui leur correspondent. Cette théorie est peu intuitive, mais on peut comprendre l'existence des nombres magiques en se fondant uniquement sur les concepts classiques, qui s'appliquent aux objets macroscopiques.

On doit alors utiliser la théorie des orbites périodiques, mise au point au début des années 1970 pour établir une passerelle entre la mécanique quantique et la mécanique classique. À l'aide de cette théorie, on détermine les énergies des principales couches dans un système contenant des électrons ou d'autres petites particules.

1. LORSQUE DU MÉTAL EST VAPORISÉ dans une longue tuyère où règne le vide, les agrégats métalliques créés peuvent être de petites molécules avec des liaisons rigides, de gros agrégats d'atomes qui s'empilent en polyèdres réguliers, ou bien des «gouttes liquides». Au cours d'expériences différentes, on obtient ces différentes variétés en abondance.

Supercouches

Comment appliquer cette théorie aux agrégats ? Un gros agrégat métallique peut être considéré comme une sphère creuse contenant des électrons de valence qui se déplacent à vitesse constante le long de lignes droites. Ces électrons rebondissent sur la surface interne de la sphère avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, à la façon d'ondes lumineuses réfléchies par un miroir. Ce modèle simple suffit, parce que les électrons de valence se déplacent librement à l'intérieur de l'agrégat sans pouvoir s'en échapper.

Les particules à l'intérieur d'une cavité sphérique ont des trajectoires périodiques : elles vont et viennent le long d'un diamètre ou se déplacent selon des polygones réguliers. En tenant uniquement compte des orbites périodiques les plus courtes et les plus fréquentes, les physiciens calculent une valeur approchée de la répartition des niveaux d'énergie permis. Les trois orbites les plus courtes sont les diamètres, les triangles équilatéraux et les carrés, mais, pour des raisons géométriques, les diamètres sont assez rares.

En n'utilisant que des trajectoires triangulaires ou carrées, on calcule une répartition des niveaux d'énergie que l'on peut qualifier, en un sens, de périodique : en fonction de l'énergie, les niveaux d'énergie permis sont régulièrement espacés. Cependant, la périodicité n'a pas une valeur unique : deux périodes coexistent qui correspondent aux deux orbites dominantes (triangle et carré). De même que deux ondes sonores de fréquences proches interfèrent et produisent des battements de fréquence inférieure, les deux

ensembles de couches interfèrent pour produire des regroupements des niveaux d'énergie, nommés supercouches (voir la figure 2).

En principe, les supercouches devraient également exister dans les noyaux atomiques, mais on ne les y observe pas, car les noyaux ne sont jamais assez gros : il faut 800 à 1 000 particules pour produire la première supercouche d'énergie, alors que le plus gros noyau jamais créé ne contient pas plus de 200 neutrons et de 120 protons. En 1991, des physiciens de l'Institut Niels Bohr de Copenhague et de l'Institut Max Planck de Stuttgart ont découvert des supercouches dans des agrégats chauds de sodium. Peu après, des chercheurs du Laboratoire Aimé Cotton, à Orsay, ont détecté des supercouches dans des agrégats de lithium, tandis que des physiciens de l'Université de Lyon-I en ont trouvé dans des agrégats de gallium.

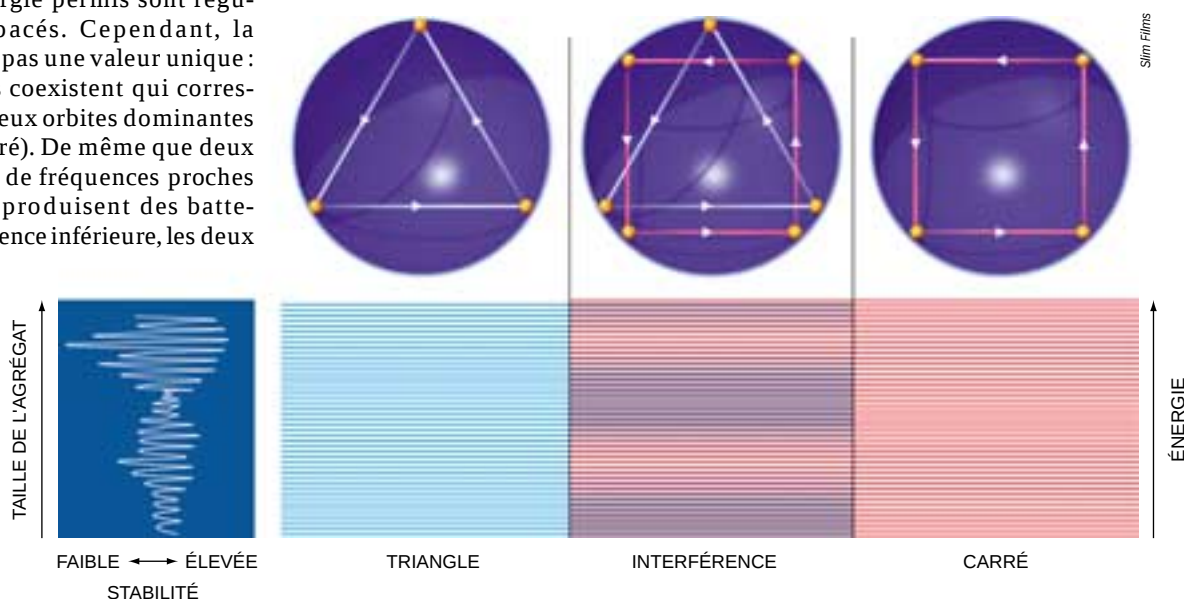
La théorie des orbites périodiques prévoit que la racine cubique des nombres magiques (approximativement, le rayon de l'agrégat) croît d'une même quantité d'une couche à la suivante. Effectivement, quand on représente la racine cubique des nombres magiques trouvés pour plusieurs agrégats métalliques chauds en fonction du nombre de couches, on obtient une

droite dont la pente est égale à 0,61 (voir la figure 3). Ce résultat expérimental est en accord à un pour cent près avec le calcul théorique effectué pour la cavité sphérique (0,603). Le calcul informatique qui utilise le modèle de la gelée et les règles de la mécanique quantique prédit exactement la même pente (pour les agrégats comprenant plus de quelques milliers d'atomes, le temps de calcul informatique est toutefois trop long).

Polyèdres parfaits

Platon pensait que les constituants ultimes de la matière avaient la forme des cinq polyèdres réguliers (cube, tétraèdre, octaèdre, icosaèdre et dodécaèdre). Pour les agrégats métalliques froids, il n'était pas très loin de la réalité : lorsque de nombreux atomes métalliques (plus de 1 000) s'assemblent lentement, à des températures relativement basses, ils s'empilent de manière compacte, comme des oranges sur un étalage, et forment des solides de forme régulière. Les physiciens déduisent la configuration de ces agrégats froids en observant comment leur stabilité dépend de leur taille.

Cette relation entre la forme et la stabilité est apparue en 1991, lorsque des physiciens de Stuttgart ont produit des atomes de sodium qu'ils



2. DANS LA THÉORIE DES ORBITES PÉRIODIQUES, on considère que les agrégats métalliques forment des sphères creuses contenant des électrons qui rebondissent sur les parois (en haut). À l'aide de cette théorie, les physiciens calculent les niveaux d'énergie approximatifs des électrons (barres horizontales sur les trois diagrammes en bas, à droite). Les deux trajectoires périodiques principales (triangles et carrés) interfèrent pour former des

ensembles de couches nommées supercouches (bandes alternativement claires et sombres dans le diagramme central). À partir de la figure d'interférence calculée pour une taille d'agrégat donnée, on calcule la stabilité de l'agrégat. En répétant ce calcul en fonction de la taille, on obtient le diagramme de gauche, dans lequel le regroupement des niveaux d'énergie apparaît. Deux supercouches sont ainsi visibles.

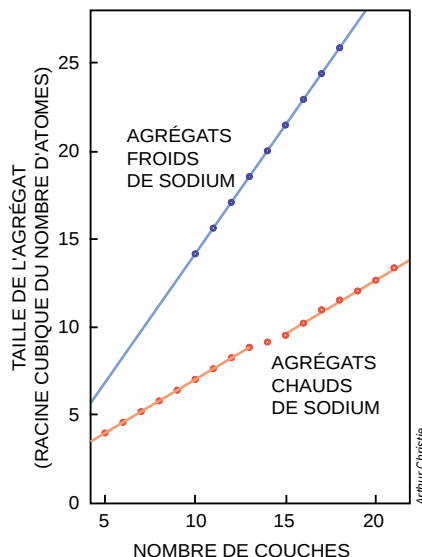
ont laissés s'associer à basse température. Curieusement, les agrégats les plus stables sont différents de ceux qui se forment à température élevée : de nouveaux nombres magiques apparaissent, correspondant à des groupes d'atomes rassemblés en icosaèdres parfaits, volumes à 20 faces triangulaires.

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-

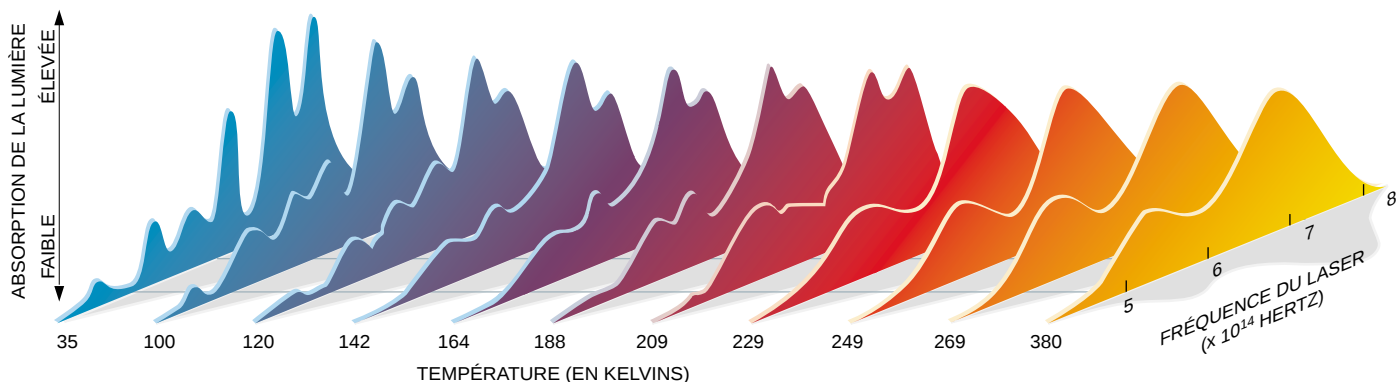
raient être observés au microscope électronique, mais les agrégats sont formés à l'intérieur du jet d'atomes, et on ne peut les arrêter sans les déformer.

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-

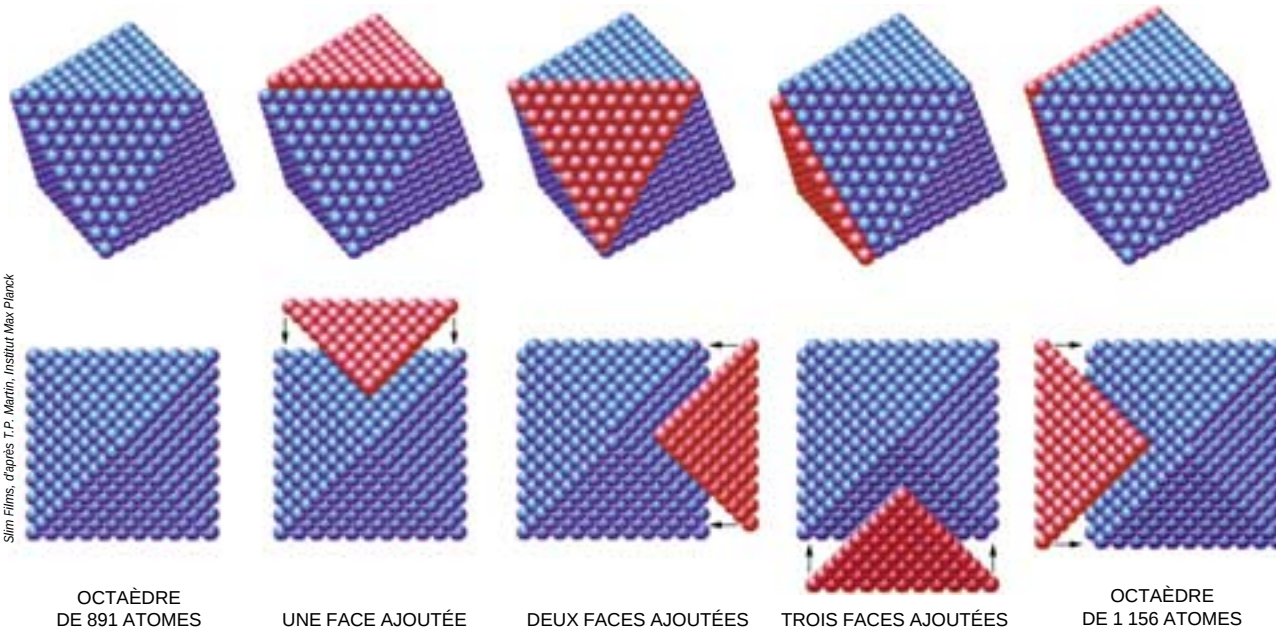
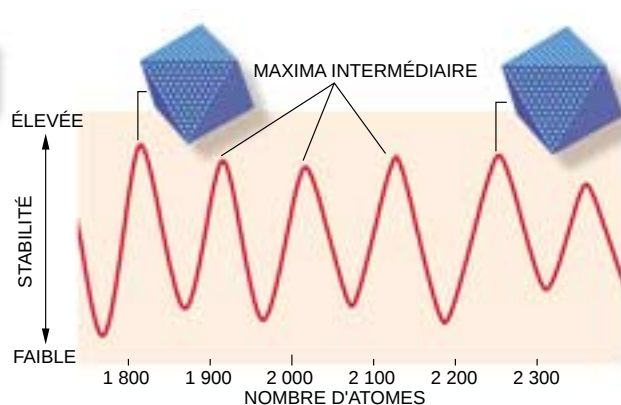
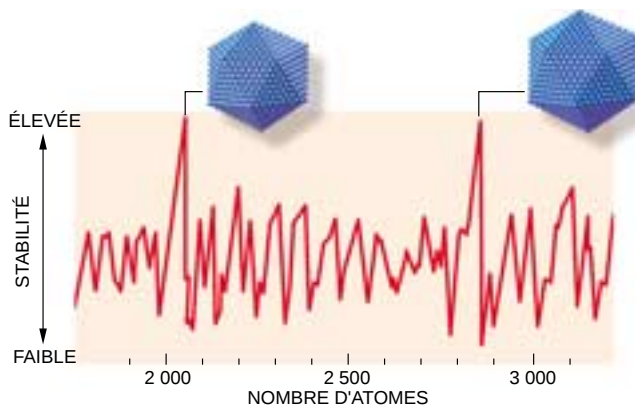
cules. À mesure que la température augmente, le spectre devient plus régulier, avec seulement deux gros renflements (en orange) : c'est l'indication que les agrégats sont «liquides», dépourvus de structure interne.

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

Récemment, des physiciens de l'Université de Fribourg ont observé une transition de phase un peu différente, mais non sans rapport. Pour mieux contrôler la température de petits agrégats de sodium, ils les ont étudiés dans de l'hélium gazeux dont ils savaient ajuster la température avec précision. Dans ce mélange d'atomes d'hélium et d'agrégats de sodium, de nombreuses collisions se produisent. Toutefois, l'hélium étant chimiquement inerte, la structure des agrégats n'est pas modifiée, tout au moins à des températures modérées. L'hélium est donc un milieu où un équilibre thermodynamique s'établit.

Les physiciens ont étudié la manière dont les agrégats de sodium d'une taille donnée absorbent la lumière d'un faisceau laser : l'absorption de la lumière en fonction de la fréquence du laser – ce que l'on nomme le spectre d'absorption – renseigne sur l'état physique des particules éclairées. Ils ont observé que le spectre de molécules froides et solides diffère de celui que l'on obtient pour des gouttelettes chaudes et liquides. À une température inférieure à -173°C , le spectre comporte plusieurs pics étroits, ce qui est caractéristique d'une molécule rigide. Aux températures supérieures à 107°C , le spectre possède uniquement deux renflements, dont les maxima se trouvent à des fréquences prévues par la théorie de la «gelée» sans structure.

Pour les agrégats les plus petits, dont la structure interne est importante, on peut calculer rigoureusement, à l'aide de la mécanique quantique, le comportement de tous les électrons de chaque atome. Ces calculs révèlent la structure moléculaire de ces agrégats et expliquent de façon précise leur stabilité. Dans le cas des agrégats plus gros, contenant une

centaine d'atomes ou même davantage, de tels calculs sont excessivement longs, et les physiciens utilisent le modèle de la gelée. Pour les agrégats de plusieurs milliers d'atomes, les physiciens doivent renoncer à la mécanique quantique et employer la théorie simplifiée des orbites périodiques, à moins qu'ils ne s'en remettent à l'information indirecte que donnent les nombres magiques obtenus expérimentalement, à partir de la mesure de la proportion des agrégats produits suivant leur taille (les plus abondants étant les plus stables).

Depuis 1984, les physiciens ont parcouru un long chemin dans la compréhension et l'application des nombres magiques aux agrégats métalliques. Des agrégats icosaédriques de sodium contenant jusqu'à 21 000 atomes ont été fabriqués. Pourtant, la structure cristalline du sodium solide n'est pas l'icosaèdre, car aucun matériau solide ne peut être construit en empilant des icosaèdres : de même que des tuiles pentagonales ne couvrent pas parfaitement un plan, sans vides ni chevauchements, les icosaèdres n'ont pas la symétrie qui permet de remplir entièrement l'espace. Pour cette raison, même les plus gros agrégats de sodium fabriqués à ce jour n'ont pas une organisation de leurs atomes semblable à celle que l'on trouve dans le sodium solide.

Si les physiciens ont obtenu une foule d'informations sur les agrégats métalliques et sur les nombres magiques qui assurent leur stabilité, ils ignorent toujours la réponse à cette question fondamentale : à quel moment et comment la transformation entre un agrégat et un solide massif se produit-elle ? Les agrégats métalliques constituent un étrange arrangement de la matière qui réserve certainement bien des surprises.

Matthias BRACK est professeur de physique théorique à l'Université de Ratisbonne, en Allemagne.

Pierre JOYES, *Les agrégats inorganiques élémentaires*, éditions de physique, 1990.

Sven BJØRNHOLM, *Clusters, Condensed Matter in Embryonic Form*, in *Contemporary Physics*, vol. 31, n° 5, pp. 309-324, septembre 1990.

M.L. COHEN et W.D. KNIGHT, *The Physics of Metal Clusters*, in *Physics Today*,

vol. 43, n° 12, pp. 42-50, décembre 1990.

Walt A. de HEER, *The Physics of Simple Metal Clusters : Experimental Aspects and Simple Models*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 65, n° 3, 1^{ère} partie, pp. 611-676, juillet 1993.

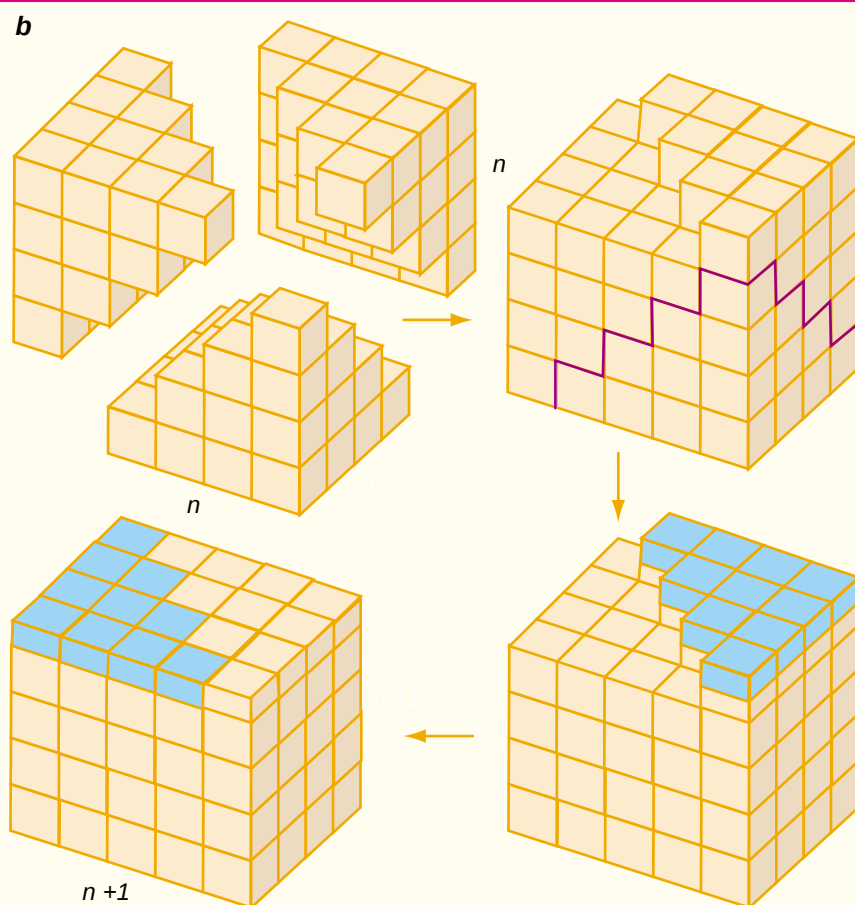
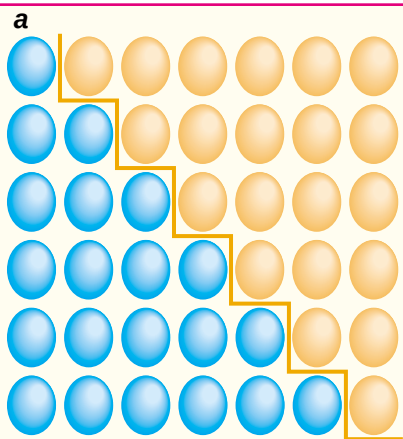
Matthias BRACK, *Self-Consistent Helium Model and Semiclassical Approaches*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 65, n° 3, 1^{ère} partie, pp. 677-732, juillet 1993.

T.P. MARTIN, *Shells of Atoms*, in *Physics Reports*, vol. 273, n° 4, pp. 199-242, août 1996.

Les preuves sans mots

JEAN-PAUL DELAHAYE

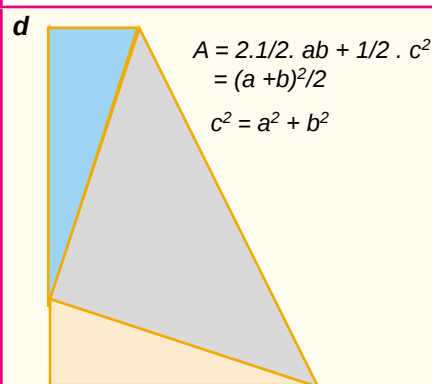
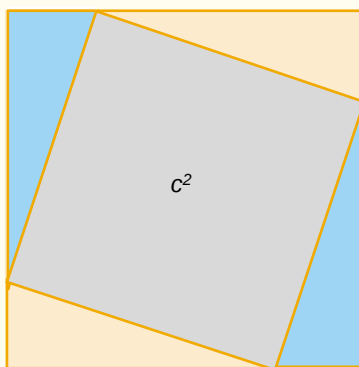
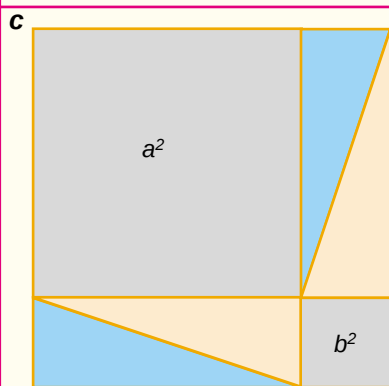
En mathématiques, un petit dessin vaut-il mieux qu'un long discours ?



Il y a quelques années, il était bien vu de mettre le moins possible de dessins dans un livre de géométrie. On trouve encore en vente des ouvrages de géométrie dont certains chapitres ne comportent absolument aucune figure : j'en ai un chez moi, paru en 1967, dont le chapitre sur les barycentres ne contient aucun triangle, aucun segment, ni aucune illustration d'aucune sorte !

Le grand traité de mathématiques de Nicolas Bourbaki ne possède pas de tome consacré exclusivement à la géométrie, mais inclut quand même un livre d'algèbre de plus de 500 pages qui traite de droites, de plans, d'espaces, de parallèles, de parallélogrammes, de symétries, d'homothéties, de projections, de quadrilatères, du théorème fondamental de la géométrie projective, du théorème de Pappus, du théorème de Desargues, etc. Pas une figure !

L'idée derrière ce qui semble de navrantes aberrations est qu'une figure ne prouve rien et qu'au contraire, il faut s'en méfier, car elle n'est jamais *quelconque* : quand vous dessinez un triangle, il possède peut-être une caractéristique particulière qui vous donne l'illusion d'un résultat général erroné. Le raisonnement, même quand il concerne des



1. (a) : Preuve de $1 + 2 + 3 + \dots + n = n(n+1)/2$. (b) : Preuve de $1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + n^2 = 1/3[n(n+1)(n+1/2)]$. Preuve due à Man-Keung Siu (1984). (c) et (d) : deux démonstrations du théorème de

Pythagore. La première est due à un auteur inconnu qui vivait en Chine, vers -200 avant J.-C. La seconde est l'œuvre du vingtième président des États-Unis, James Garfield.