

Quatre ans plus tard, avec Horst Hann, ancien élève de H. Gleiter, nous avons essayé de fabriquer des matériaux non métalliques avec des grains nanométriques. En quelques mois, nous avons obtenu une céramique composée d'agrégats d'oxyde de titane de dix nanomètres de diamètre (l'oxyde de titane est un pigment blanc, très utilisé dans diverses industries, de la peinture à la pâte à papier).

Notre technique ressemblait à celle des chimistes russes ou japonais. Lorsque l'on fait bouillir de l'eau près d'une fenêtre et qu'il gèle dehors, les molécules d'eau qui s'évaporent rencontrent l'air froid de la pièce et se condensent en fines gouttelettes d'eau suspendues dans l'air. La convection

naturelle conduit l'air et les gouttelettes vers la vitre froide, où l'eau liquide se condense en cristaux de glace. De la même façon, lorsqu'un métal est chauffé à une température supérieure à sa température de fusion, des atomes s'en évaporent. Pour fabriquer un nanomatériau, on refroidit ces atomes avec un gaz inerte, tel l'hélium, qui ne réagit pas chimiquement avec eux : les atomes d'hélium absorbent l'énergie des atomes métalliques, qui se condensent en petits agrégats solides. Le diamètre de ces agrégats quasi sphériques est ajustable entre 1 et 100 nanomètres par le réglage de la vitesse d'évaporation des atomes métalliques, et de la nature et de la pression du gaz inerte.

Pour obtenir un métal nanophase, on fait évaporer ce métal, et l'on agglomère les agrégats formés avant qu'ils ne puissent réagir avec des molécules de leur environnement. Pour obtenir une céramique, au contraire, les agrégats métalliques doivent réagir avec un gaz (l'oxygène pour l'oxyde de titane) avant d'être agglomérés. La simplicité de cette méthode nous laissait penser que nous pourrions fabriquer la forme nanophase de la plupart des matériaux, métaux, céramiques, semi-conducteurs, polymères, et composites de ceux-ci. Nous nous sommes toutefois concentrés sur les céramiques et les métaux, afin de bien comprendre le comportement de ces matériaux.



Ayant d'abord fabriqué de la poudre ultrafine d'oxyde de titane, nous avons cherché à l'agglomérer en un bloc de taille macroscopique. Qu'obtiendrait-on par un frittage, où l'on comprime la poudre tout en la chauffant suffisamment pour que les grains se lient les uns aux autres en échangeant des atomes? Les chimistes pensaient que le frittage d'une poudre nanométrique interviendrait à une température inférieure à celles qui sont habituellement nécessaires et produirait un solide plus compact (de petits grains sont plus faciles à empiler de façon compacte). Toutefois, avant la mise au point de notre méthode de synthèse, les poudres céramiques fines étaient obtenues par des techniques de précipitation à partir de solutions ; ces agglomérats étaient difficiles à compacter, et les solides frittés que l'on fabriquait étaient souvent poreux.

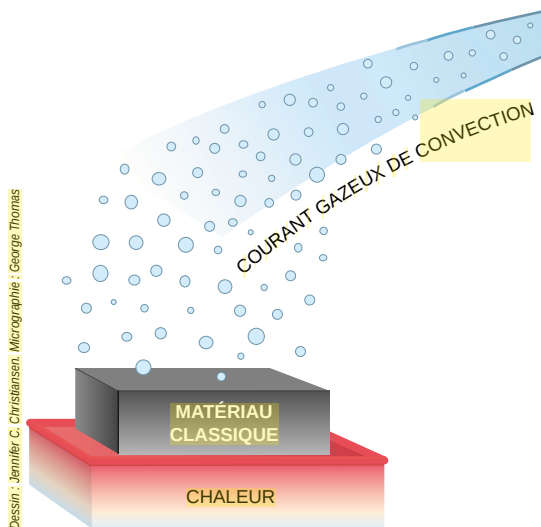
## Une céramique plus dure

Nos poudres nanométriques de titane étaient également agglomérées, mais ces agglomérats étaient si fragiles que

les grains se soudaient ou se dislocaient aussitôt. En outre, notre poudre ultrafine avait d'excellentes propriétés mécaniques et rhéologiques. Elle pouvait être frittée à des températures inférieures d'environ 600 °C à celles requises pour l'oxyde de titane classique (1 400 °C). Le solide obtenu était aussi plus dur et moins cassant.

L'oxyde de titane nanophase est même malléable : à température ambiante, il prend la forme du moule où on le presse. De surcroît, de nombreuses autres céramiques nanophases ont la même propriété. En 1988, nous avons analysé plus finement ces propriétés. À température ambiante, l'oxyde de titane nanophase devient beaucoup plus malléable lorsque la taille de ses grains est inférieure à 30 nanomètres. Cette découverte ouvrait la voie vers la mise en forme directe par emboutissage : on pourrait fabriquer rapidement et à faible coût des pièces en céramique, pour l'industrie automobile, par exemple. En outre, ces pièces résisteraient mieux aux hautes températures ou à l'atmosphère corrosive qui règnent dans un moteur.

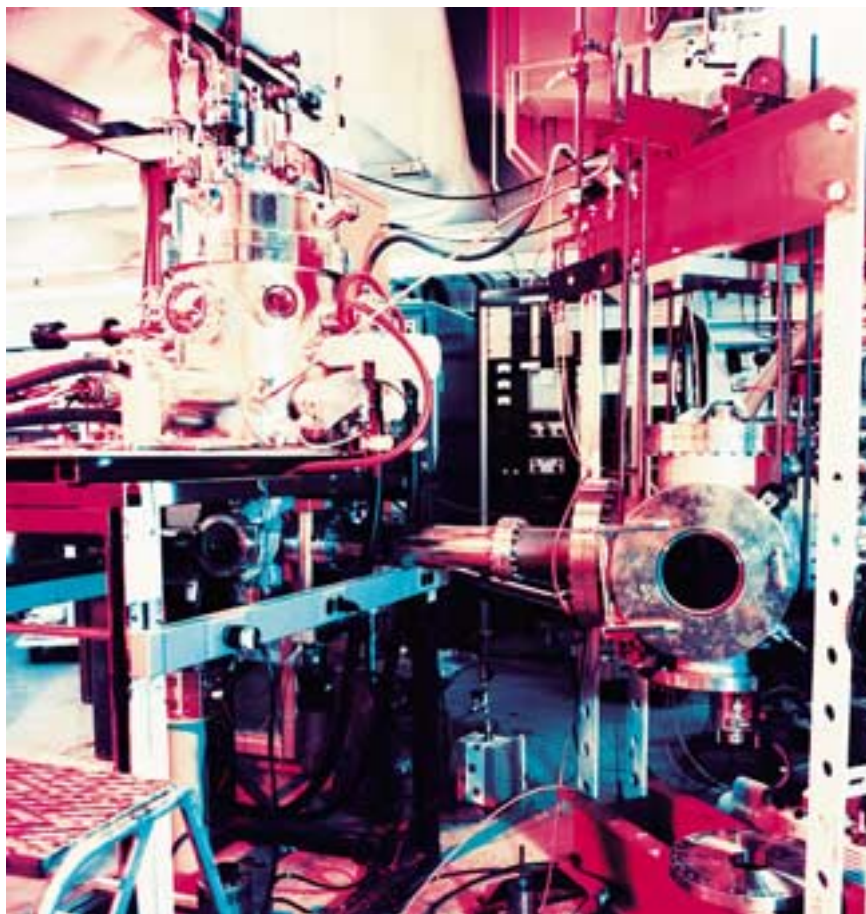
**3. QUAND ON CHAUFFE un bloc métallique au-dessus de son point de fusion, des atomes s'évaporent. Ils se condensent en agrégats qui sont conduits, par convection, jusque dans un tube collecteur, où ils sont refroidis. Ces agrégats sont ensuite retirés du tube, puis compactés dans une presse.**



Dessin : Jennifer C. Christiansen. Micrographie : George Thomas

Une autre équipe a déformé de l'oxyde de titane nanophase très dense en le comprimant à des températures aussi élevées que 800 °C ; la déformation peut atteindre 60 pour cent sans rupture, alors que les céramiques ordinaires cassent toujours dans de telles conditions. Récemment, une équipe a démontré la faisabilité de l'emboutissage de l'oxyde de titane nanophase, rapprochant ce procédé de l'industrialisation.

Comment des matériaux si fragiles que des céramiques se déforment-ils ainsi sans casser, quand ils sont de type nanophase? Lorsque l'on marche sur un tas de sable, les grains glissent les uns sur les autres. Dans le cas d'un solide massif, en revanche, les grains sont liés, de sorte que si l'on comprime en un point, beaucoup de liaisons intergranulaires se rompent simultanément et une cassure apparaît. Lorsqu'une fracture commence à se former, des atomes voisins se déplacent pour la combler : plus les grains sont petits, plus la distance que ces atomes doivent parcourir est courte, et donc plus la réparation est rapide. Des grains nanométriques glissent donc plus facilement les uns sur les autres que des grains millimétriques. Les céramiques ordinaires que sont les minéraux se déforment ainsi, mais en plusieurs millions d'années. Les céramiques nanophases, qui ressemblent plus à un tas de sable, supportent une déformation rapide, compatible avec les procédés industriels.



Silvia Otté

**2. ON FABRIQUE LES NANOMATÉRIAUX à l'aide d'une chambre de synthèse (en haut, à gauche) et d'une presse (en bas, à droite).**