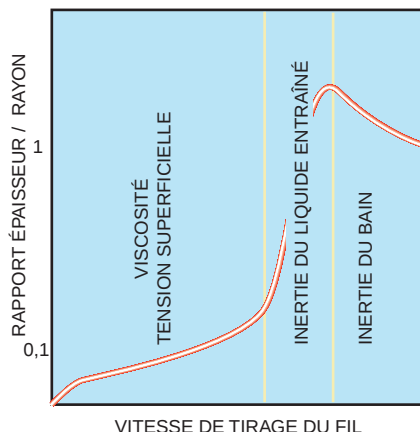


petite où le dépôt se forme, son inertie peut ne pas être négligeable par rapport aux forces de tension superficielle et d'entraînement par viscosité. On devine que l'inertie du fluide déjà en mouvement près du fil, dans le bain, a pour effet d'augmenter l'épaisseur du film : l'inertie fait que le fluide n'a pas le « temps » de s'écouler le long du fil. Cette inertie peut même vaincre la tension superficielle, si bien que l'épaisseur du film, dans ce cas, augmente de façon critique en fonction de la vitesse : à partir d'une vitesse égale à un mètre par seconde environ, doubler la vitesse du dépôt fait plus que décupler son épaisseur !

Plus vite encore (les vitesses usuelles d'ensimage sont de l'ordre de 10 à 30 mètres par seconde), l'inertie à considérer devient celle du bain, qui lui, globalement, est au repos. Or, le fil communique son mouvement au liquide, couche de molécules par couche de molécules, ce qui prend du temps. À grande vitesse, le temps de contact d'un morceau de fil avec le réservoir est faible et devient donc le facteur qui limite le volume entraîné. Dans sa célèbre théorie de la couche limite visqueuse (1904), Ludwig Prandtl a montré, plus précisément, que l'épaisseur du fluide ébranlé par le solide (et donc susceptible de partir avec lui) augmente comme la racine carrée de ce temps de contact. À ces vitesses, l'épaisseur du dépôt cesse donc de croître et, même, diminue comme l'inverse de la racine carrée de la vitesse d'ensimage. La loi de dépôt exprime alors un compromis entre viscosité (qui reste responsable du dépôt) et inertie, celle du fluide qu'il faut mettre en mouvement. L'action de la tension superficielle, qui était prépondérante à faible vitesse, devient négligeable.

Ensimage et bulles de savon

Les liquides utilisés dans la pratique de l'ensimage sont le plus souvent des liquides complexes : des émulsions (dispersions de gouttelettes d'huile dans l'eau) ou de l'eau contenant des molécules tensioactives, susceptibles de s'adsorber à la surface de la fibre et du liquide. Dans le cas où les effets inertiels dominent (à haute vitesse), les



2. LES DIVERS PHÉNOMÈNES qui déterminent l'épaisseur de liquide entraîné au cours de l'ensimage dépendent de la vitesse de tirage du fil.

phénomènes restent ceux que nous avons considérés, parce que les paramètres caractéristiques du liquide qui interviennent sont des paramètres de volume (viscosité et densité). En revanche, la situation est beaucoup plus riche à faible vitesse. On le devine en soufflant une bulle de savon : la bulle sort d'un bain d'eau savonneuse, avec une épaisseur bien définie, mais sans qu'aucun solide l'entraîne (et ça tient !). Une surface savonneuse a donc la même capacité qu'un solide à tirer avec elle de la matière fluide. Si l'on retire (lentement) un objet solide d'un bain savonneux, on s'attend donc à ce qu'il tire avec lui environ deux fois plus de matière que si le liquide était pur, puisque deux interfaces (entre le solide et le liquide, et entre le liquide et l'air) participent cette fois au dépôt. C'est bien ce que l'on observe quand on réalise l'expérience.

Il est frappant, et à première vue surprenant, que la gravité n'intervienne pas pour fixer l'épaisseur du dépôt. Cela est dû à la petite taille des fibres (10 à 100 micromètres) : à cette échelle, la force capillaire (nous sommes bien à l'échelle d'un cheveu), qui découle de la tension superficielle du liquide, domine les phénomènes liés à la gravité. Il n'en serait évidemment pas de même pour un gros objet (ou un individu) tiré d'un bain : on attend alors la même succession de lois pour l'épaisseur en fonction de la vitesse (croissance lente, puis progression rapide autour de un mètre par seconde, décroissance lente enfin), mais émoussées par la gravité, qui limite l'épais-

seur du film entraîné. Sortir quasi sec de son bain est donc une tâche malaisée : il faudrait le faire soit à vitesse presque nulle, soit à vitesse presque infinie !

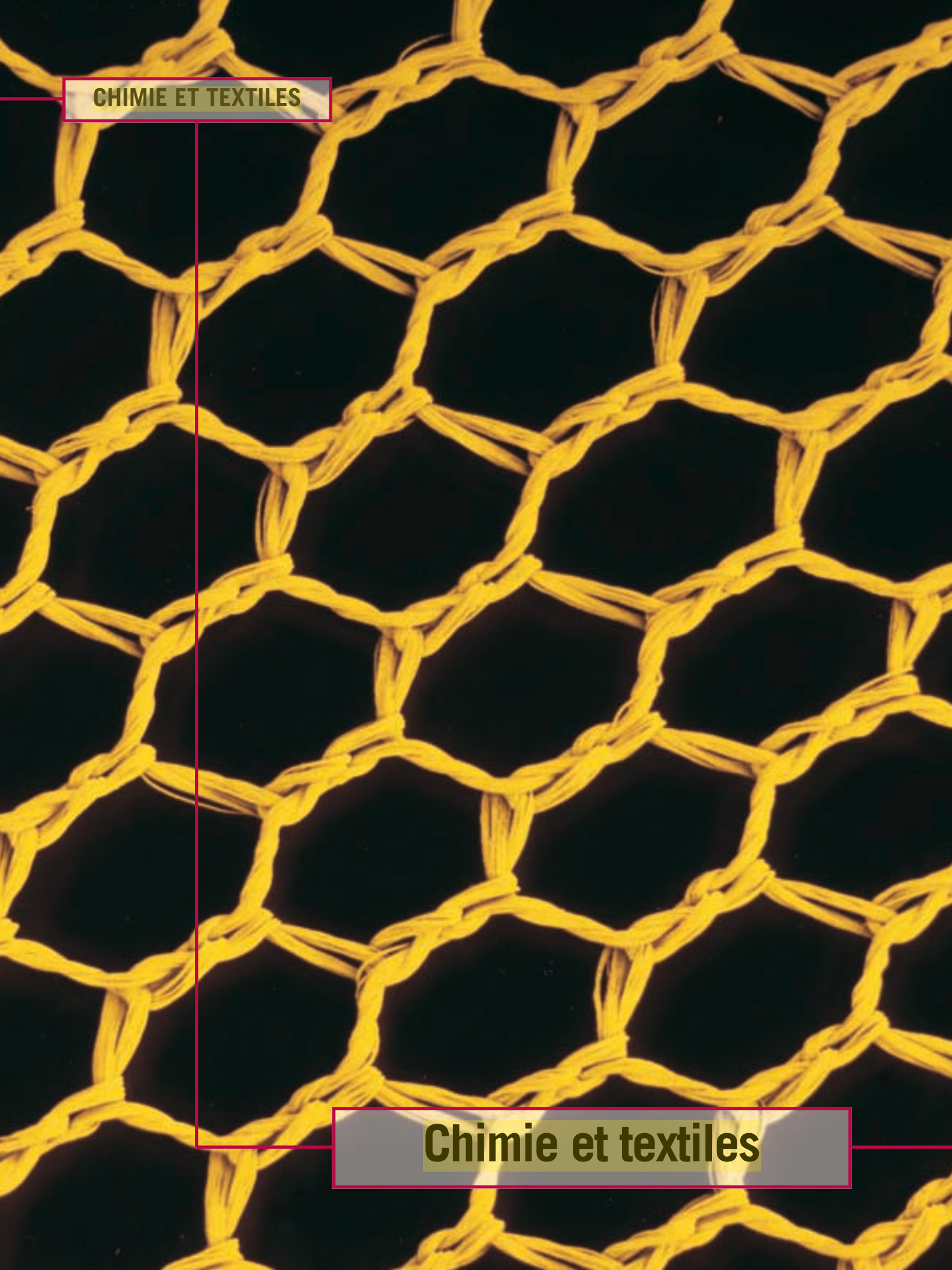
Gouttes filantes

Soulignons enfin qu'il pourrait être intéressant, dans certains cas, que l'ensimage se produise par lui-même, au lieu d'être forcé. Certes, un liquide mouillant posé sur un solide s'étale spontanément, mais le film de mouillage (qui est microscopique) progresse avec une lenteur extrême.

De ce point de vue, les gouttes filantes imaginées en 1994 par Colin Bain, à Oxford, et Thierry Ondařuhu, à Paris, sont un progrès remarquable : ces gouttes avancent toutes seules. Le principe en est le suivant : la goutte est constituée d'un solvant mouillant où sont dissoutes des molécules qui ont la double propriété de se greffer à la surface du solide et de n'être pas mouillées par le solvant. Si le greffage commence à se produire d'un côté de la goutte plutôt que d'un autre, alors ces deux côtés reposent sur des substrats de nature chimiquement différente : le solide vierge d'une part, et le solide tapissé de réactifs de l'autre. Cette asymétrie provoque le mouvement spontané de la goutte – jusqu'à épuiser le réservoir en réactifs, ou jusqu'à couvrir l'ensemble du solide.

Cette fois, c'est donc le dépôt qui engendre le mouvement (et non le mouvement qui provoque le dépôt, comme dans l'ensimage classique). La vitesse de ces gouttes automotrices dépend de la nature du réactif (et de la viscosité du solvant), mais elle est souvent de l'ordre de quelques centimètres par seconde. On peut donc imaginer de bombarder les fibres par un aérosol de gouttes filantes, pour réaliser un ensimage à la fois spontané et ciblé. Au total, toutes ces questions (qu'elles soient ouvertes comme celle-ci, ou mieux comprises comme dans le cas du dépôt forcé) sont de bons exemples où recherche appliquée et recherche fondamentale s'irriguent mutuellement.

David QUÉRÉ est physicien au Laboratoire de physique de la matière condensée (Collège de France, Paris).



CHIMIE ET TEXTILES

Chimie et textiles

Les fibres artificielles résistantes

DOETZE SIKKEMA • MAURITS NORTHOLT

Grâce à la compréhension des mécanismes moléculaires qui régissent leur comportement, on met au point des fibres de plus en plus résistantes.

En 1892, trois chimistes anglais inventent la viscose à partir de la cellulose des végétaux dissoute dans une solution de soude, puis à nouveau cristallisée. Dans les années 1930, Wallace Carothers, chimiste de la Société Dupont de Nemours, crée la première fibre entièrement synthétique. Ces travaux précurseurs marquent le début de l'ère des fibres artificielles résistantes que l'on utilise aujourd'hui sous forme de câbles ou pour renforcer des matériaux divers, nommés alors composites, et des objets tel un gilet pare-balles.

Les fibres artificielles sont composées de polymères, c'est-à-dire de longues chaînes obtenues par liaison chimique de petites molécules, ou monomères. Pour être résistantes, elles doivent être rigides, solides et peu déformables. De plus, elles doivent tolérer les chocs, être légères, supporter les variations de température et adhérer aux matériaux qu'elles renforcent.

La plupart de ces qualités s'obtiennent par de nombreuses liaisons physiques et chimiques entre les chaînes de polymères ; ainsi, les forces se répartissent dans toute la fibre. Cependant,

la solidité d'une fibre résistante dépend aussi de l'alignement des liaisons chimiques du polymère le long de son axe. Plus les liaisons entre les monomères seront parallèles à l'axe de la fibre, plus elles résisteront à une traction. Ces contraintes sont dans tous les cahiers des charges des chimistes spécialisés dans la fabrication de fibres.

En outre, dans de nombreuses applications, par exemple l'aérospatiale, la qualité primordiale est la légèreté : les fibres résistantes doivent être composées d'atomes légers, tels ceux de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène.

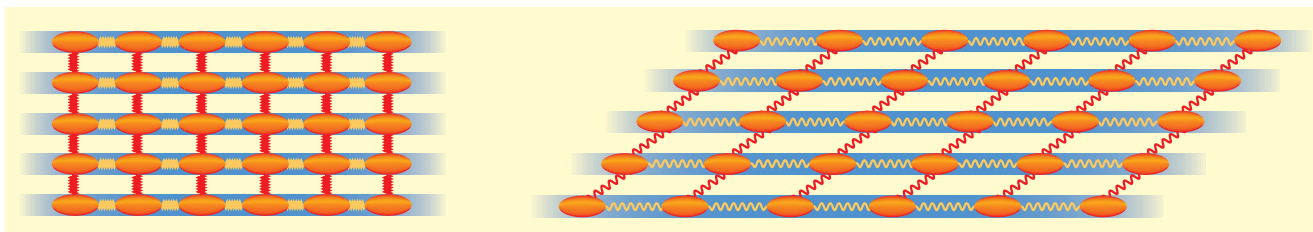
Depuis la découverte des polymères, les chimistes ont inventé des matériaux filables variés : nous étudierons les fibres de polyéthylène, d'aramide, de carbone et de polybenzobisoxazole, mises au point par l'armée de l'air américaine.

Toutefois, des progrès restent possibles. La conception de matériaux polymères organiques ayant des propriétés mécaniques déterminées impose la compréhension des fondements moléculaires des propriétés mécaniques. Quelques équipes,

notamment, étudient comment la structure moléculaire des fibres artificielles procure à ces dernières une résistance aux contraintes. Après avoir étudié leurs résultats, nous exposerons et comparerons les qualités des principales fibres disponibles. Enfin, nous décrirons la structure de la fibre M5, que nous avons récemment mise au point dans notre laboratoire, au Centre de recherche de la Société Akzo Nobel. Ses performances sont encore supérieures aux fibres précédemment citées.

La mécanique des fibres

À l'inverse de nombreux matériaux, tels les métaux et le caoutchouc, qui ont les mêmes propriétés quelle que soit la direction de la force qui s'exerce sur eux, les fibres artificielles réagissent différemment selon que la force est parallèle ou perpendiculaire à leur axe. Les chaînes de polymères sont beaucoup plus courtes que les fibres elles-mêmes : dans une fibre, la contrainte est transmise d'une chaîne moléculaire à une autre, parallèle et adjacente, par des liaisons physiques,



1. LES CHAÎNES DE POLYMÈRES D'UNE FIBRE RÉSISTANTE (en bleu) sont soumis à plusieurs contraintes lorsque la fibre est étirée : l'alignement des chaînes de polymères concerne les liaisons covalentes

(en jaune) qui relient les monomères (en orange) du polymère, tandis que les forces de cisaillement s'appliquent sur les liaisons faibles (en rouge) qui joignent les chaînes de polymères.