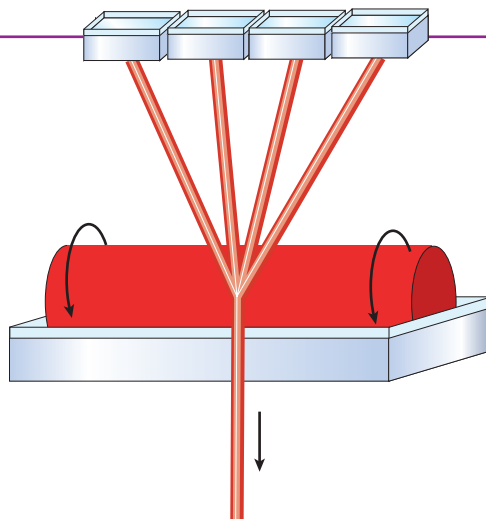


L'ensimage

DAVID QUÉRÉ

La vitesse de tirage d'un fil hors d'un bain détermine la quantité de liquide entraîné. On explore la physique de cette opération.



Une fraction de seconde après sa fabrication, une fibre textile est ensimée, c'est-à-dire rapidement entraînée hors d'un bain contenant un lubrifiant. Cette opération limite la casse pendant le tirage des fibres et donne de la cohésion aux mèches ainsi formées (sur la figure ci-dessus, à droite, les fibres tirées sont réunies en un fil par l'intermédiaire d'un rouleau contre lequel elles frottent). Parfois, aussi, on profite de l'ensimage pour déposer des promoteurs d'adhésion à la surface des fibres, quand on les destine à renforcer des matériaux composites. C'est là une affaire de chimistes, mais c'est la physique qui permet le dosage des molécules qui seront déposées sur la fibre.

En effet, il existe plusieurs manières de faire cette opération : on peut pulvériser sur les fibres un aérosol (dispersion de gouttelettes) ou les faire passer dans un bain dont elles ressortent continûment mouillées (voir la figure 1). Chaque fois qu'un solide est tiré d'un bain (ou, inverse-

ment, chaque fois qu'un liquide est déplacé sur un solide), le solide s'enrobe du liquide, du moins si celui-ci est mouillant, c'est-à-dire s'il a la propriété de s'étaler spontanément sur le solide. Dans le cas inverse, le mouvement relatif du solide et du liquide n'engendre pas nécessairement un dépôt : pensons à une goutte d'eau glissant sans laisser de trace sur une feuille de matière plastique ou de nénuphar. La première tâche de celui qui formule l'ensimage est donc d'assurer le mouillage, par exemple en incorporant dans le bain de liquide des molécules tensioactives (des détergents) qui favorisent l'étalement des liquides.

Vitesse et dépôt

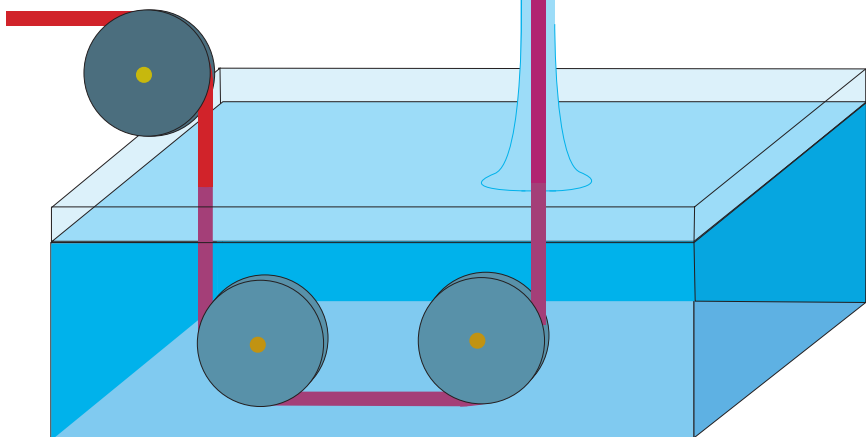
Quelle sera l'épaisseur du film liquide déposé sur une fibre qui traverse un bain d'ensimage ? Un liquide visqueux (c'est-à-dire dont les molécules se déplacent en frottant

les unes par rapport aux autres), au voisinage immédiat d'un solide, se déplace à la vitesse du solide. Ainsi, quand on peint un mur (fixe), la peinture adhère à ce mur : les molécules du liquide, au contact du solide, y adhèrent en raison des forces d'attraction intermoléculaires. De même, au cours de l'ensimage, le liquide au voisinage de la fibre que l'on tire part avec elle. La question est donc d'identifier quel est ce voisinage. Il existe plusieurs réponses à cette question, selon la vitesse à laquelle s'effectue le dépôt.

Le cas des vitesses faibles a été compris, dans les années 1940, par trois physiciens russes : Lev Landau, Benjamin Levich et Boris Derjaguin. À la sortie du bain, la surface du liquide est déformée par le mouvement de la fibre ; cette déformation est limitée par les forces de tension superficielles qui tendent à réduire l'aire de la surface liquide (la tension superficielle est engendrée par les forces de cohésion entre les molécules du liquide).

L'épaisseur du film résulte ainsi des actions antagonistes de la viscosité, qui provoque le dépôt, et de la tension superficielle, qui s'y oppose. Un paramètre unique et sans dimension, nommé le nombre capillaire, compare l'intensité de ces deux actions : c'est le produit de la viscosité par la vitesse du dépôt, que divise la tension superficielle du liquide. L'épaisseur d'ensimage est égale au rayon de la fibre que multiplie le nombre capillaire élevé à la puissance $2/3$.

À vitesse de tirage supérieure, l'inertie du liquide emporté par le solide complique la physique de l'ensimage. Quand ce fluide, entraîné dans le bain par le contact du fil, arrive en surface, dans la zone très



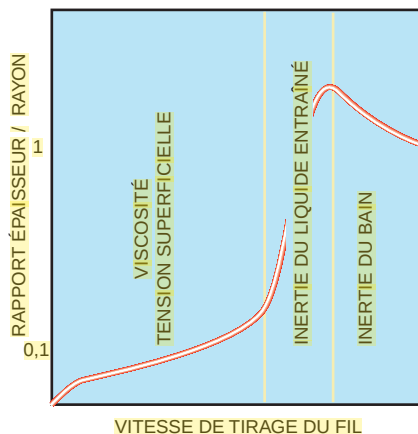
1. L'ENSIMAGE est l'opération par laquelle on charge les fils d'un liquide portant diverses molécules qui en modifient l'aspect ou les propriétés. L'épaisseur de liquide entraînée peut être ajustée par la vitesse d'entraînement.

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 Ondařuh, 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).