

(brevets américains 2.130.947 et 2.130.948). Ces chercheurs désiraient prouver l'existence (initialement très contestée) de molécules géantes à chaîne linéaire, postulées par Herman Staudinger. D'autres exemples de fibres entièrement synthétiques sont le polyéthylène téréphtalate (polyester, Dacron), le polyacrylonitrile (Orlon, Dralon), le polypropylène isotactique et les copolymères élastomériques à base de polyéthylène glycol et de diisocyanates (Spandex, Lycra).

Les fibres synthétiques offrent aujourd'hui une extraordinaire panoplie de propriétés, de l'ultra-haute résistance (dix fois celle de l'acier) à d'exceptionnelles propriétés ignifuges. On ajuste ces propriétés en choisissant la composition chimique des molécules de la chaîne et en les disposant judicieusement à l'intérieur de la fibre.

Structures et propriétés des fibres

Pour comprendre et choisir les propriétés des fibres, nous prendrons en compte une hiérarchie de niveaux d'organisations dont les dimensions vont de la taille d'un atome à la longueur d'un câble transatlantique.

L'élément primordial est la composition et l'organisation atomique et moléculaire, à l'échelle de 0,1 à 1 nanomètre (ou milliardième de mètre). La nature des atomes détermine les propriétés intrinsèques et les caractéristiques physiques et chimiques. Ces atomes sont regroupés dans une entité de base, le monomère, simple dans le polyéthylène, complexe dans le Nylon.

Les groupes amides ($-C(O)NH-$) du Nylon établissent des liaisons hydrogène entre les différentes chaînes ; ces liaisons relativement fortes (environ un dixième de la force des liaisons covalentes entre les atomes de la chaîne principale) font que les nylons, même ceux à chaînes relativement courtes ont des bonnes propriétés mécaniques et ne gonflent pas en présence d'eau. En outre, la réactivité des groupements amides permet de colorer aisément les nylons avec des teintures ou, au contraire, de les rendre intachables, par réaction avec des composés fluorés, par exemple (voir *Halte aux taches*, page 102). En revanche, le polyéthylène

n'est constitué que d'unités $-CH_2-$ qui interagissent par des forces de Van der Waals (environ 100 fois plus faibles que les liaisons covalentes). Par conséquent, les fibres constituées de ce polymère ne sont pas affectées par la présence d'eau, sont difficiles à teindre, flue facilement et les propriétés mécaniques souhaitables n'apparaissent qu'avec des chaînes longues.

Verre ou cristal

La seconde caractéristique de la structure des fibres, et donc de leurs propriétés, apparaît à l'échelle du nanomètre. À cette échelle, les paramètres critiques sont la régularité et la flexibilité des liaisons chimiques entre les monomères du polymère. La régularité ou l'irrégularité des éléments de la chaîne déterminent notamment la capacité du polymère à s'ordonner en une structure cristalline (régulière) ou amorphe (désordonnée).

L'absence d'ordre n'est pas sans conséquence : un polymère non ordonné est généralement transparent et ne présente qu'une seule température de ramollissement au-delà de laquelle le matériau est un liquide dont la viscosité dépend de la longueur des chaînes et en dessous de laquelle le matériau est cassant. Un exemple classique de tels polymères amorphes est le polyméthacrylate de méthyle, utilisé dans les fibres optiques.

Les polymères comprenant des monomères qui se répètent régulièrement et qui sont solidarisés par le même type de liaison forment des domaines tridimensionnels ordonnés, c'est-à-dire des zones cristallines ou «cristallites» ; au-dessus de leur température de fusion, ces zones cristallines fondent et donnent une masse visqueuse. Toutefois la formation d'un ordre cristallin tridimensionnel nécessite un réarrangement complexe et souvent très lent des chaînes moléculaires, et toutes les parties des molécules ne se réarrangent pas à la même vitesse lors de la formation de la fibre (durée de l'ordre de quelques secondes). Même les polymères bien cristallisables n'engendrent que des matériaux semi-cristallins où seulement 30 à 70 pour cent de la matière est ordonnée.

Par conséquent, les fibres sont hétérogènes : elles présentent des zones cristallines dont les dimensions sont de

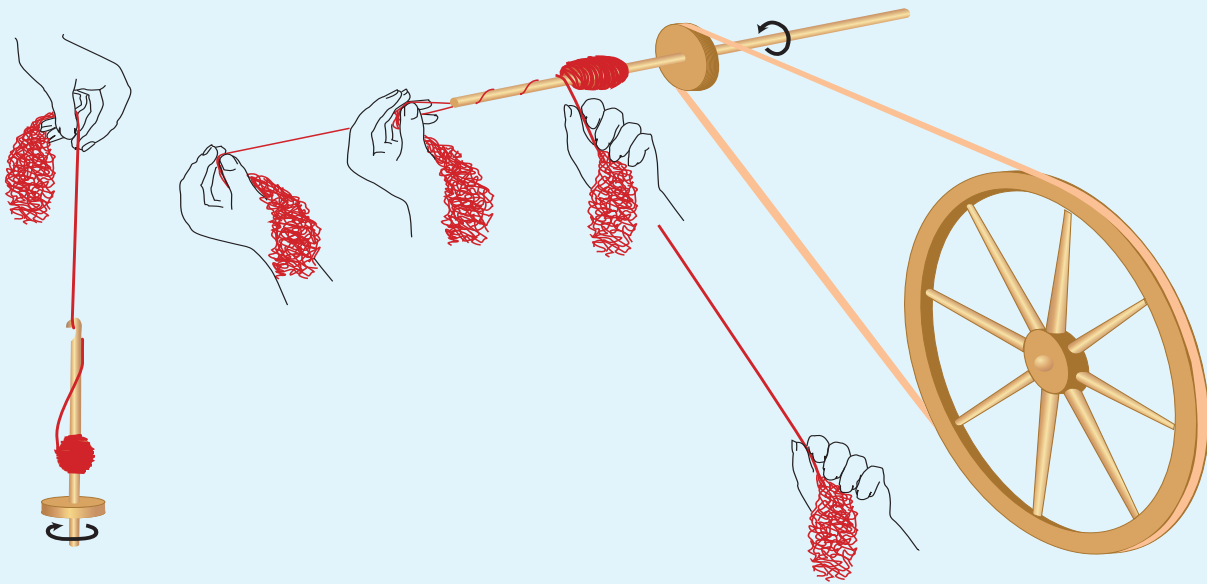


l'ordre de dix nanomètres, auxquelles des zones amorphes sont associées par liaisons covalentes.

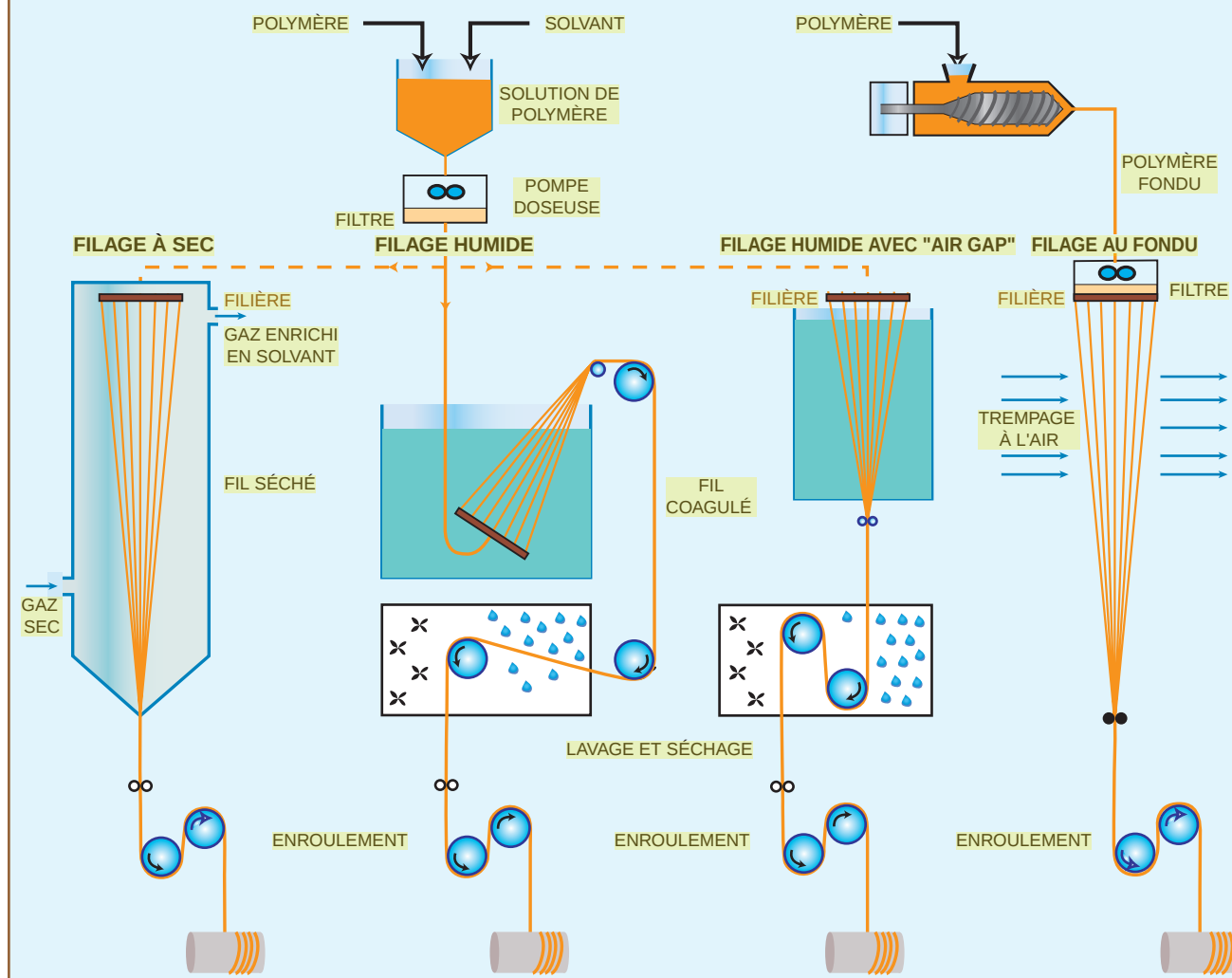
Ces matériaux semi-cristallins présentent deux températures de transition, la température de fusion cristalline et la température de transition vitreuse, située entre 0,5 et 0,8 fois la valeur de la température de fusion (en kelvins ou degrés au-dessus du zéro absolu). Entre ces deux températures, la matière est résistante et supporte d'importants allongements sans rompre. De tels polymères sont le polypropylène isotactique, les Nylons 6.6 et 6, le poly(éthylène téréphtalate) et le polyéthylène linéaire.

La plus ou moins grande flexibilité de la liaison entre les monomères de la chaîne du polymère détermine sa rigidité. Aux deux extrêmes, le Nylon 6.6 est très souple, et l'aramide poly (para-phénylène téréphtalamide) (PPTA), utilisé dans des fibres hautes performances (par exemple, le Kevlar et le Twaron), est très rigide. En l'absence de forces extérieures (pas de cisaillements dus à un écoulement qui oriente les molécules), les polymères souples s'enroulent en pelote, alors que les polymères rigides conservent leur structure linéaire. Les polymères les plus communs sont souples. Depuis leur découverte à la fin des années 1960 par Stéphane Kwolek, de la Société Du Pont de Nemours, quelques autres macromolécules «rigides» ont été synthétisées.

3. FILAGE À L'ANCIENNE : FUSEAU ET ROUET



4. LES TECHNIQUES DE FILAGE MODERNES



La flexibilité des macromolécules a d'importantes conséquences sur leurs températures de transition thermique et, par voie de conséquence, sur leurs utilisations possibles. Par exemple, le PPTA, plutôt rigide, a une température de fusion cristalline qui dépasse 600 °C, alors que le Nylon 6.6, son homologue souple, fond déjà vers 265 °C. D'autre part ces transitions, ainsi que d'autres propriétés associées à la rigidité de la chaîne, sont d'une importance capitale pour la transformation des polymères en fibres.

Nous allons maintenant examiner la conformation et l'arrangement des macromolécules au sein de la fibre. Les caractéristiques structurales dépendent bien sûr de la longueur réelle (ou de la masse molaire) de la chaîne moléculaire, mais apparaissent en général entre 10 et 100 nanomètres.

À cette échelle, la question principale est : l'arrangement des polymères est-il isotrope ou existe-t-il une orientation préférentielle, le long de l'axe de la fibre par exemple ? Cette dernière configuration, plutôt rare, confère aux fibres des propriétés inhabituelles, mécaniques et autres. Une structure non orientée est désirable si l'on veut réaliser des fibres à propriétés isotropes, par exemple les fibres optiques.

En raison de leur processus de croissance, les molécules constituant les fibres naturelles, adoptent une configuration parallèle. Pour les polymères synthétiques, cet arrangement moléculaire résulte du processus de fabrication de la fibre.

À l'échelle macroscopique, on observe que les fils des textiles classiques sont généralement constitués de fibres entrelacées, continues ou discontinues. Les fibres ont généralement un diamètre entre cinq micromètres (ou millionième de mètre) et 50 micromètres (le diamètre d'un cheveu humain) et présentent des sections de diverses formes. Ces dernières déterminent de nombreuses caractéristiques physiques de la fibre, comme la diffusion de la lumière (brillance), l'état de surface (absorption de l'eau et adhérence), le toucher (voir *De l'étoffe à la main*, page 144), ainsi que les propriétés mécaniques (souplesse, drapé).

Un dernier commentaire quant à la porosité des fibres : la plupart des fibres qui constituent les fils naturels ou synthétiques forment des faisceaux denses d'une largeur de 5 à 10 nanomètres, séparés par des vides oblongs. Cette porosité détermine la capacité du fil à absorber des liquides. En revanche, les textiles employés dans les membranes

de dessalement de l'eau de mer ou les membranes échangeuses d'ions ont une structure poreuse différente : les fibres sont creuses, et leur paroi, d'une épaisseur de l'ordre du nanomètre, présente une perméabilité sélective pour certaines molécules.

La formation des fibres

Pour former des fils naturels, on récolte, on nettoie ou l'on traite chimiquement des fibres relativement courtes que l'on file pour former des filés de fibres ou que l'on agglomère pour obtenir des non-tissés, avec ou sans additifs. Dans certains cas, par exemple le jute, on extrait les fibres des parois végétales ou de l'écorce par des procédés complexes, comme le rouissage. La formation de fibres à partir de matières naturelles fait rarement intervenir des manipulations et des réarrangements au niveau moléculaire ou même à des échelles de longueur plus grandes ; les propriétés macroscopiques de ces fils sont déterminées par la nature des fibres constitutives, modifiées principalement par l'art et la manière dont elles sont assemblées pour donner le produit final.

En revanche, dans la production des fibres, artificielles ou synthétiques, des processus (macro) moléculaires

5. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES FIBRES

Les propriétés mécaniques des fibres sont habituellement mesurées en tension axiale : on mesure l'allongement en fonction de la charge. Pour supprimer l'effet de la géométrie de la fibre, les résultats de ces essais charge/allongement sont consignés en termes de contrainte (σ , force par unité de surface de la section) et d'allongement (ϵ , élancement par unité de longueur initiale). La contrainte est exprimée en newtons par mètre carré (N/m²) ou en pascals (Pa) et souvent en MPa (10⁶ Pa), tandis que l'allongement est sans dimension.

Au XVII^e siècle déjà, Robert Hooke a observé qu'un objet soumis à une charge faible (déformation élastique) s'étire proportionnellement à la force appliquée. Cette proportionnalité est la loi de Hooke : $\sigma = E \epsilon$.

La constante de proportionnalité E , ou *module d'élasticité de Young*, mesure la rigidité. Comme la déformation est sans unité, la rigidité s'exprime avec la même unité que la contrainte. La surface sous la zone d'élasticité de la courbe charge-allongement correspond à la *résilience*, la capacité de stocker l'énergie sous forme élastique. La surface sous la totalité de la courbe mesure le travail nécessaire pour casser la fibre, également dénommée *résistance mécanique*. La charge au point de rupture est la *résistance de la fibre* ou *ténacité*.

Les propriétés mécaniques des fibres sont exprimées par unité de masse linéaire et non par unité de surface de la section. Par exemple, la charge par unité de masse linéaire s'appelle *contrainte spécifique* et s'exprime en N/tex ou en gramme-force par denier. Une quantité spécifique, comme la contrainte spécifique, est la quantité elle-même divisée par la densité. La rigidité spécifique exprimée en N/tex est importante dans les applications où l'on cherche à gagner du poids. La même chose vaut pour la résistance spécifique d'une fibre, également dénommée *ténacité à la rupture*. Les diagrammes de la rigidité spécifique en fonction de la ténacité à la rupture pour diverses fibres sont présentés ci-contre.

