

CHAPITRE NEUF

FILAGE A TRÈS HAUTE VITESSE D'UN POLYMÈRE FONDU- Exemple du polyester PET.

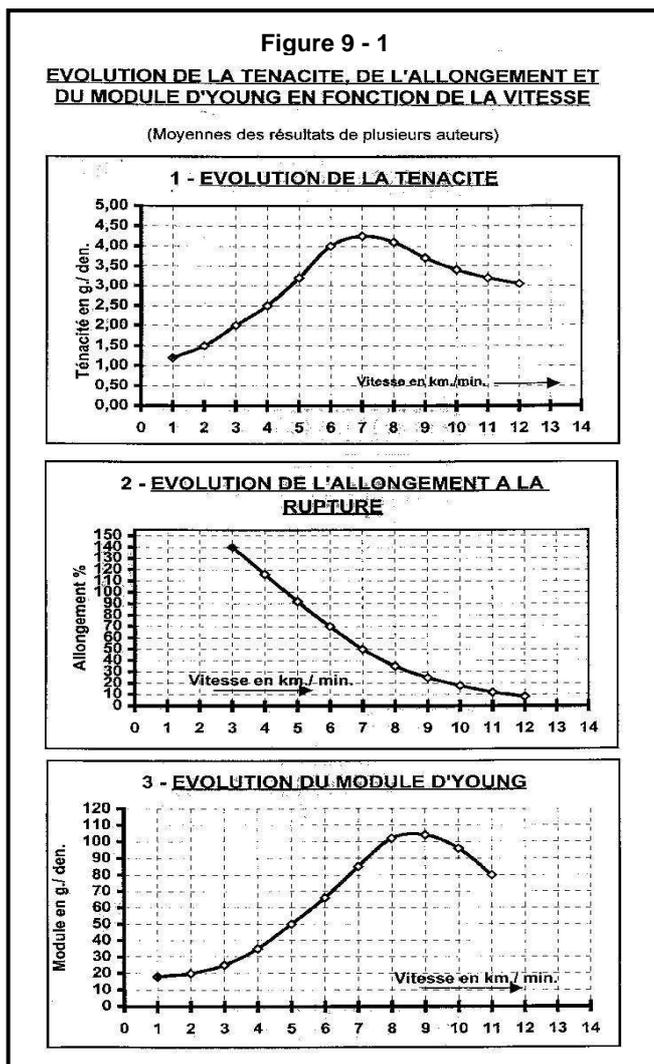
(D'après "Advanced fiber spinning technology" de T. NAKAJIMA)
(Edition anglaise - 1994 -)

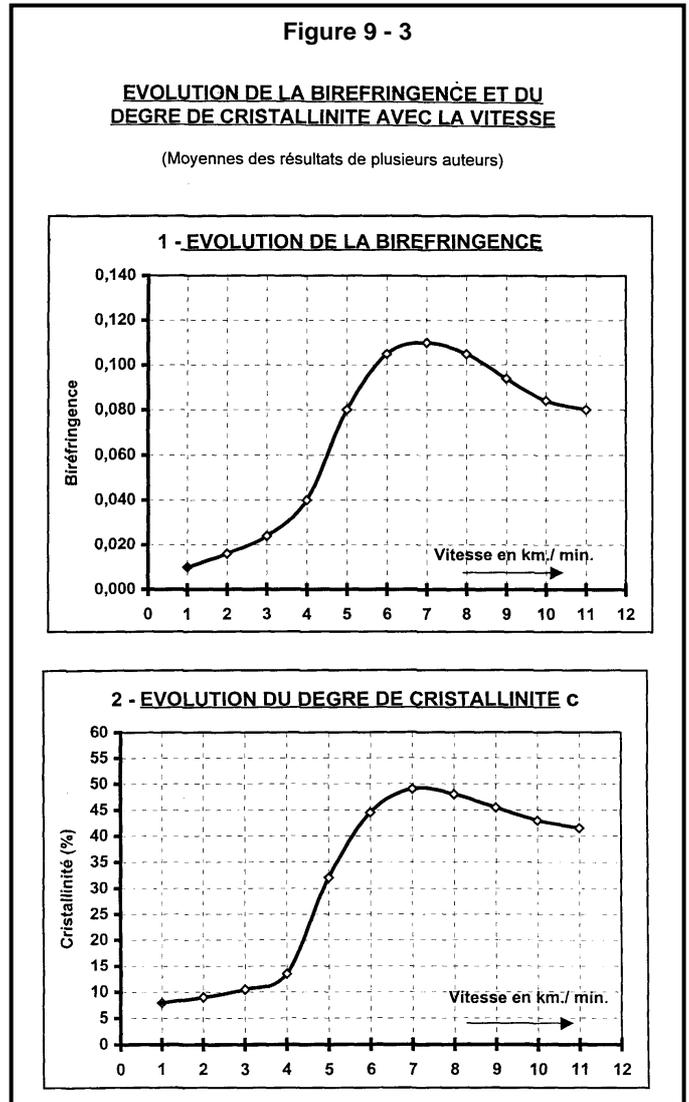
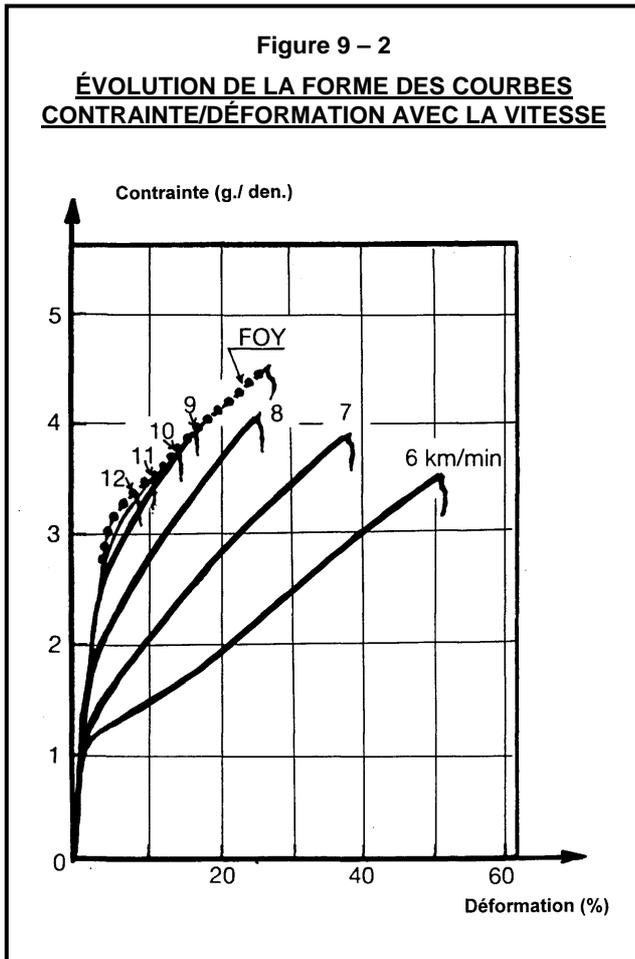
Ce chapitre décrit succinctement les aspects théoriques et technologiques du filage à très haute vitesse du polyester PET comme un exemple typique de l'évolution en vitesse du filage de polymères fondus. Au delà des performances des bobinoirs industriels haute vitesse classiques qui plafonnent en marche continue à environ 6 000 m./ min., l'effet de plus hautes vitesses de filage sur les différents propriétés sera également examiné. La technologie utilisée est du même type que celle représentée sur la figure 8 - 18D.

1 - STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES FILS OBTENUS A TRÈS HAUTES VITESSES.

La figure 9-1 montre l'évolution de la ténacité, de l'allongement et du module d'YOUNG en fonction de la vitesse de filage/renvidage :

- La **ténacité** présente un maximum vers 6 000 - 7 000 m./ min. Elle est de toute façon légèrement inférieure à celle obtenue sur un fil FOY complètement étiré de façon conventionnelle ce que l'on peut également voir sur la figure 9-2 qui donne des courbes contrainte / déformation de fils obtenus à différentes vitesses en comparaison avec celle d'un fil FOY conventionnel.
- De la même façon le **module d'YOUNG** connaît un maximum vers 7 000 - 8 000 m./ min.
- En ce qui concerne le **retrait dans l'eau bouillante**, il atteint son minimum vers 2 à 4% à partir de 5 000 m./ min.
- **L'aptitude à la teinture** est très bonne pour les fils haute vitesse notamment à cause de micro-fissures qui apparaissent à la surface des filaments et qui facilitent la pénétration des colorants.





2 - STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES FILS OBTENUS A TRÈS HAUTES VITESSES.

La **biréfringence** Δn (qui est la différence des indices de réfraction entre la direction de l'axe du filament et la direction perpendiculaire et qui est une image du degré d'orientation des chaînes macromoléculaires par rapport à l'axe) et **le degré de cristallinité** c (calculé d'après la densité) sont représentés sur la figure 9-3. Pour ces deux caractéristiques on note également un maximum vers 7 000 - 8 000 m./min. :

- En dessous de 4 000 m./min. l'orientation moléculaire augmente régulièrement avec la vitesse de filage.
- Entre 4 000 et 7 000 à 8 000 m./min. s'ajoute à l'orientation une cristallisation induite par les tensions régnant au sein du filament. Cette cristallisation induite sous tension est nettement plus intense que la cristallisation statique qui se développe à une température donnée. L'étude de la cristallisation d'un polymère par des méthodes statiques de laboratoire ne peut donc pas donner une bonne idée des phénomènes qui se produisent durant l'étréage sous contrainte du filage.
- Au delà de 7 000 - 8 000 m./min. le temps "procédé", c'est à dire le temps que passe le fil sur le chemin de filage, devient trop court pour mémoriser toute la cristallisation induite qui pourrait se produire et la biréfringence Δn ainsi que la cristallinité c décroissent à nouveau. Le temps procédé entre en concurrence avec le temps de relaxation.

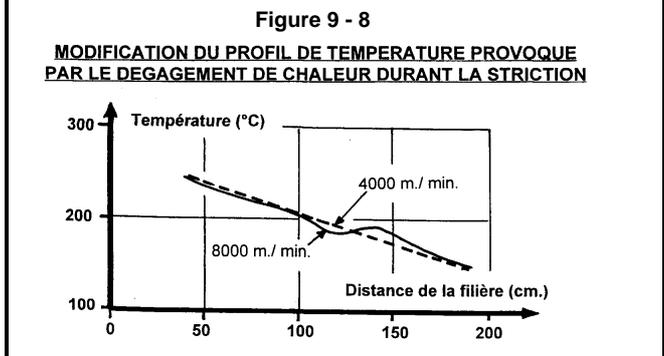
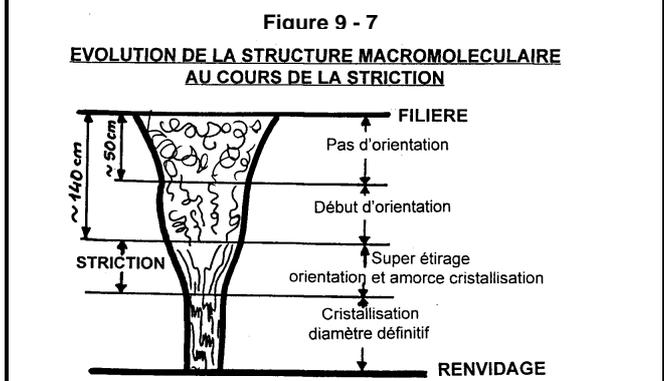
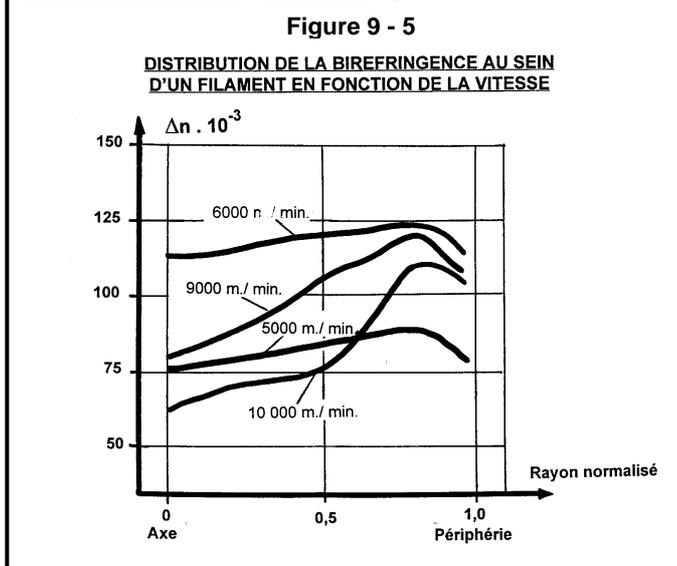
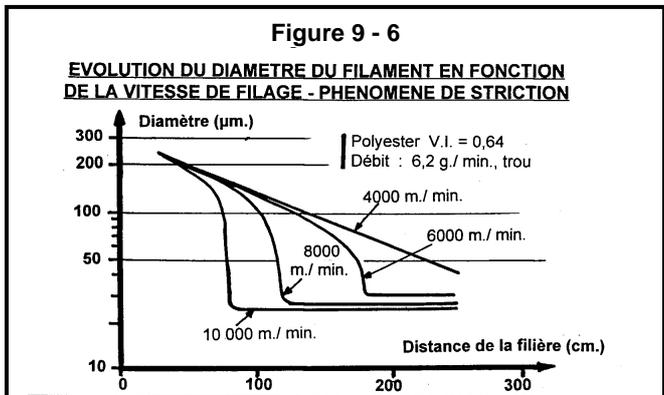
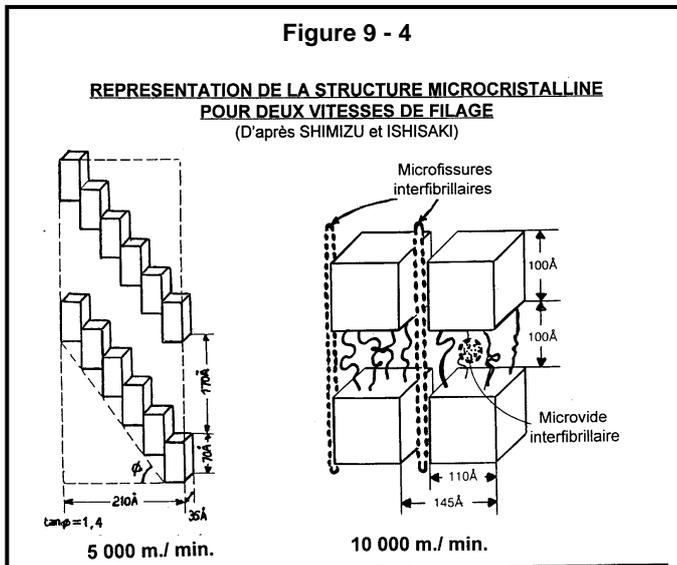
L'orientation des chaînes peut être évaluée séparément dans la phase cristalline et dans la phase amorphe, à partir de la biréfringence. La biréfringence totale est la somme de la biréfringence Δn_c de la phase cristalline et de la biréfringence Δn_a de la phase amorphe. Si x est la proportion de phase cristalline, on a :

$$\Delta n = \Delta n_c \cdot x + \Delta n_a \cdot (1 - x)$$

Diverses études, basées essentiellement sur les spectres de rayons X, conduisent à représenter la structure micro-cristalline de la façon suivante :

* Aux environs de 5 000 m./ min. les cristallites élémentaires s'assemblent par six en formant un "escalier" d'environ 300 Å de hauteur et de 210 Å de largeur, la distance entre deux escaliers étant d'environ 170 Å.

* Vers 10 000 m./ min. la partie extérieure du filament serait constituée par des cristallites sensiblement cubiques, d'environ 100 Å de côté, séparées par des zones amorphes orientées et par des micro-vides et des microfissures. Voir la figure 9 - 4



3 - EFFET COEUR / PEAU.

Lorsque la vitesse augmente, les conditions de refroidissement et de structuration ne sont plus identiques entre la zone centrale du filament et sa surface périphérique. On observe alors une évolution de la biréfringence entre le centre et la périphérie du filament. On appelle cette différence "biréfringence différentielle" $\Delta(\Delta n)$.

Voir la figure 9 - 5

- A 6 000 - 7 000 m./ min. l'effet n'est pas très marqué mais la biréfringence présente une valeur élevée du fait d'une forte cristallisation induite.

- Au delà de 8 000 m./ min. l'effet d'évolution du centre vers la périphérie est de plus en plus marqué mais avec des valeurs de biréfringence de plus en plus faibles du fait d'une cristallisation induite qui a de moins en moins de temps pour se produire. (Relation "temps de relaxation/temps procédé")

On obtient l'effet dit "cœur / peau".

Voir la figure 9 - 9

La surface de la peau est couverte de microfissures ce qui donne, comme effet induit, une meilleure affinité tinctoriale aux fils obtenus à très grande vitesse

Figure 9 - 9

EXEMPLE D'EFFET CŒUR/PEAU SUR UNE FIBRE DE POLYESTER PET
(D'après K. FUJIMOTO)

FILAGE A 6 000 m./ min.

FILAGE A 10 000 m./ min.

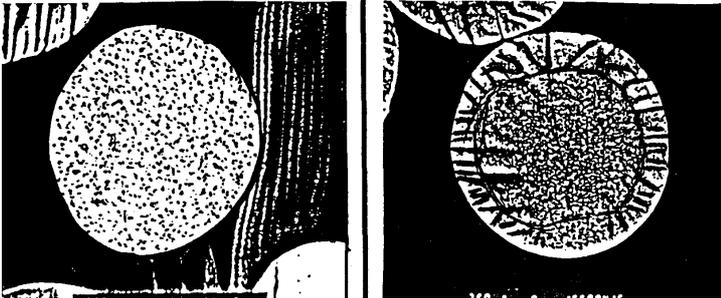
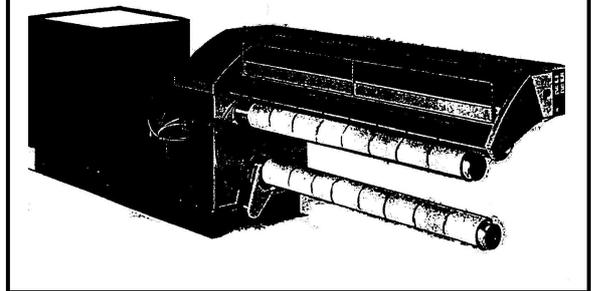


Figure 9 - 10

EXEMPLE DE BOBINOIR POUVANT FONCTIONNER JUSQU'A 8 000 m./min
(Neumag - 1997)



Quelques propriétés de fils PET filés à hautes vitesses

Vitesse (m./ min.)	6000	7000	9000	FOY conv.	
Δn	0,116	0,108	0,083	0,173	
$\Delta(\Delta n)$	0,009	0,026	0,031	0,002	Indique l'effet cœur / peau - Très faible pour le FOY
Cristallinité (%)	66	75	77	58	Déterminée par rayons X
Degré d'orientation (%)	91	94	94	90	% par rapport à 90° de l'angle d'orientation à l'axe du filament.
Ténacité (g./ den.)	4,1	4,3	3,5	5,0	
(cN./ tex)	36,2	38,0	30,9	44,15	
Allongement (%)	62	46	25	22	
Retrait eau bouillante (%)	3,9	3,2	2,9	7,8	

4 - EFFET DE STRICTION AU COURS DU FILAGE HAUTE VITESSE DE PET.

Le diamètre du filament extrudé décroît régulièrement depuis la filière jusqu'au dispositif de renvidage lorsque la vitesse de ce renvidage reste inférieure à 4 000 m./ min. Au delà de cette vitesse on observe, entre 100 à 150 cm. environ en dessous de la filière, un phénomène de **striction**, c'est à dire une diminution brutale du diamètre, illustré sur la figure 9 - 6.

Le taux de déformation passe d'environ 100 s^{-1} pour une vitesse de 4 000 m./ min. à plus de $1 500 \text{ s}^{-1}$ dans la zone d'environ 5 cm. où se produit la striction. Au point même de striction on évalue le taux de déformation aux environs de $20 000 \text{ s}^{-1}$.

On pense que le phénomène serait provoqué par une baisse de la viscosité élongationnelle suivie d'une brusque remontée sous l'effet de la génération d'une orientation et d'une intense cristallisation induite.

La figure 9- 7 montre l'évolution de la structure telle qu'on l'admet actuellement

La forte cristallisation, localisée au point de striction, provoque un dégagement de chaleur suffisant pour stopper la descente régulière et monotone de la température observée le long du chemin de filage en dessous de 4 000 m./ min.

Voir la figure 9 - 8

5 - ASPECTS TECHNOLOGIQUES

Les positions de filage très hautes vitesses sont le plus souvent équipée d'un retardateur de refroidissement placé directement sous la filière ("shroud" en anglais = linceul) Il s'agit d'une chambre à parois généralement chauffantes, de 10 à 15 cm. de hauteur environ, qui évite le gel brutal de la surface du filament et permet de garder un état plastique plus homogène dans le filament, ce qui réduit les tensions.

Nous avons déjà évoqué les problèmes technologiques que posent les bobinoirs fonctionnant en permanence avec des vitesses de rotation cycliques se renouvelant pour chaque bobine produite : par exemple, pour un renvidage à 6 000 m./ min., entre le début et la fin de la bobine, la vitesse de rotation doit varier continûment entre environ 20 000 et 4 000 tr./ min.

Un autre type de problème posé par les filages à hautes vitesses est celui de la sécurité des opérateurs. En effet le bruit généré par les bobinoirs croît avec la vitesse et l'énergie cinétique emmagasinée par la bobine peut la transformer en bombe en cas d'incident. Des aménagements particuliers doivent donc être conçus.

6 - PRODUCTEURS JAPONAIS CONNUS UTILISANT DES PROCÉDÉS DE FILAGE TRÈS HAUTES VITESSES (A titre d'exemple)

	Début de la production	Vitesse (m./ min.)	Tonnage connu 1993
ASAHI	Avril 1988	7 000	300
TEIJIN	Juin 1988	6 000	1 100
MITSUBISHI	Avril 1989	6 000	500
TORAY	Mars 1990	6 000	2 060
TOYOBO	?	6 000	110

A signaler comme producteur non japonais, l'industrialisation par AKZO de son procédé de refroidissement sous filière (paragraphe 6 - 4 du chapitre HUIT) pour la production de FDY à 7 000 m./ min. au MEXIQUE à partir de 1994-1995 ?

Voir figure 9 - 10 un exemple de bobinoir pouvant atteindre 8 000 m./ min

7 - ÉVOLUTIONS RÉCENTES DANS LE DOMAINE DE L'AUGMENTATION DES VITESSES DE FILAGE.

Une amélioration des conditions de filage à haute vitesse a été présentée en 1997 principalement par Du PONT, AMOCO et ZIMMER. Cette amélioration consiste à préparer non plus l'homopolymère PET mais un copolymère avec typiquement environ 5% d'acide isophtalique (IPA). Il en résulterait également une possibilité d'augmenter la vitesse de production du POY de 3 200 vers 5 000 m./ min.

L'effet copolymère, modificateur de l'aptitude à la cristallisation par modification de la régularité des chaînes macromoléculaires, se fait surtout sentir au dessus de 4 000 m./ min. Néanmoins on obtiendrait approximativement le même taux de cristallinité sur un fil d'homopolymère PET filé à 3 000 m./ min. et sur un fil de copolymère à 5% d'IPA (acide isophtalique) filé à 4 000 m./ min. On constaterait, par ailleurs une suppression de la striction et une décroissance régulière du diamètre du fil de la filière au bobinoir.

La technologie actuelle des bobinoirs ne permettant guère de dépasser 7 000 m./ min. dans des conditions d'exploitation économiquement viables, les avantages revendiqués pour les produits qui sont déjà filés entre 6 000 et 7 000 m./ min., sont les suivants :

- Réduction des casses au filage.
- Augmentation de la productivité pour les fils texturés obtenus à partir de POY.
- Nette amélioration de la vitesse de montée des colorants. (provoquée par les micro-fissures en surface des filaments)

Par contre on observerait un abaissement de la ténacité et du point de fusion ainsi qu'une augmentation du retrait eau bouillante. AMOCO présente les résultats suivants pour un fil (de titre non précisé) obtenu à 6 500 m./ min. sur une position pilote.

	PET pur	+ 5% IPA
Brins cassé pour 1 000 km.	> 1,0	0,2
Ténacité (g./ den.)	4,6	4,3
(cN./ tex)	40,6	38,0
Allongement rupture (%)	43	44
Point de fusion (°C)	263	247
Retrait eau bouillante (%)	2,4	3,7
Vitesse teinture par rapport au PET pur	100	170

Plus récemment, et dans un domaine de vitesse plus bas, Du PONT, en association avec le constructeur de machines textiles BARMAG, annonçait en 1999 la mise au point d'une technologie de filage de nouvelle génération qui permettrait d'augmenter la vitesse de filage du POY polyester, à partir de polymère standard, de 3 000 - 3 200 m./ min à 4 500 - 4 600 m./ min sans modification des propriétés du fil. De plus cette technologie de filage serait très versatile en ce qui concerne les vitesses et les titres des fils produits. "La machine de filage universelle est la voie du futur" affirme un représentant de BARMAG.

Enfin, et toujours en 1999, il faut citer l'annonce par l'ingénierie LURGI ZIMMER du développement d'un additif, dénommé MOD 5, à base de "méthacrylate" fourni par CLOSE RHÖM, sur lequel on n'a pas d'autres détails, qui permettrait de monter la vitesse de filage du POY polyester jusqu'à 5 500 m./ min. Cet additif est introduit dans le flux de polymère fondu avant filage. Un grand texturateur américain (UNIFI USA) utiliserait déjà avec de bons résultats un POY obtenu avec ce procédé à 5 000 m./ min. Un article publié en septembre 2000 (L'Industrie Textile - No 1323) indique que l'additif peut également convenir pour la production de fils techniques (pneumatiques)

ANNEXE UNE

CONTRAINTES SUBIES PAR UN POLYMÈRE FONDU AU COURS D'UN PROCÉDÉ MODERNE DE FILAGE - ÉTIRAGE INTÉGRÉ

(Cas d'un filage polyester)

1 - INTRODUCTION.

Cette annexe n'a pas d'autre objectif que de faire prendre conscience de la très grande sévérité des exigences en ce qui concerne la qualité du polymère fondu mis en œuvre lorsqu'on désire réaliser un fil textile avec un procédé moderne. Nous prendrons à titre d'exemple l'obtention d'un fil plat - non texturé - en polyéthylène téréphtalate et par un procédé de filage / étirage intégré à une vitesse considérée actuellement comme moyenne.

Le fil obtenu, de titres variés, est livré aux utilisateurs sous forme de bobines cylindriques représentant un poids et une longueur bien définis de fil. Les utilisateurs (tisseurs, tricoteurs, bonnetiers,) programment en effet leurs machines pour traiter des longueurs connues de fil avant de procéder à des changements de bobines.

Si au cours du processus de filage / étirage, l'obtention d'une bobine ne peut pas être menée à son terme normal pour une raison quelconque, casse du fil par exemple, on récupère une bobine dite "incomplète". Son prix de vente est évidemment notablement inférieur à celui d'une bobine complète et il ne permet en aucun cas de rentabiliser l'installation de filage / étirage.

2 - CONSÉQUENCES D'UNE CASSE DU FIL SUR LE RENDEMENT EN BOBINES COMPLÈTES.

Pour un type de métier industriel donné de filage / étirage et dans des conditions d'exploitation données on aura, par exemple :

- Pour obtenir un fil de 50 dtex sur des bobine de 7,2 kg. (ce qui représente une durée de réalisation de bobine de 8 heures environ)
 - * 1 casse par position de filage et par jour conduit à 30 % de bobines incomplètes.
 - * 2 casses par position de filage et par jour conduisent à 57 % de bobines incomplètes.
- Pour obtenir un fil de 72 dtex sur des bobines de 13,0 kg. (ce qui représente une durée de réalisation de bobine de 10 heures environ)
 - * 1 casse / position / jour conduit à 35 % de bobines incomplètes.
 - * 2 casses / position / jour conduisent à 63 % de bobines incomplètes.
 - * 3 casses / position / jour conduisent à 83 % de bobines incomplètes.

Un atelier de filage / étirage ne produira plus une seule bobine complète vendable s'il se produit plus de 4 casses au cours du filage de 1 tonne de polymère fondu.

Il convient donc, pour rester dans des normes d'exploitation acceptables, de savoir réaliser, par exemple pour un fil de 72 dtex et 33 brins (72/33), **plus de 4 500 000 km. de brin unitaire** d'environ 15 µm. de diamètre sans aucune casse - soit plus de 12 fois la distance Terre - Lune -

Si l'on admet, ce qui est heureusement faux, qu'une casse peut être produite par une hétérogénéité sphérique de 15 µm. de diamètre, la teneur en cette impureté ne devrait pas dépasser une teneur de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-10} ppm.

3 - ACCÉLÉRATIONS SUBIES PAR LE POLYMÈRE LE LONG D'UN CHEMIN DE FILAGE - ETIRAGE.

Considérons un chemin de filage-étirage intégré complet tel que représenté par la figure 9 - 11A :

3-1 - Le polymère à l'état fondu arrive sur la plaque filière dans des avant-trous de quelques millimètres de diamètre avant de passer dans l'orifice d'extrusion dont le diamètre est de quelques dixièmes de millimètre et dans lequel la vitesse moyenne est de l'ordre de 15 à 20 m./ min.

Entre le point A dans l'avant-trou et le point B dans l'orifice d'extrusion, le polymère subit une accélération d'environ 3 g. (g = accélération de la pesanteur)

3-2 - Le polymère sort à l'état fondu de l'orifice d'extrusion à une vitesse d'environ 15 à 20 m./ min. Le brin formé est "appelé" à une vitesse de l'ordre de 1 000 m./ min. par les rouleaux d'appel de filage. Cependant cette vitesse de 1 000 m./ min. est déjà fixée à environ 20 centimètres en dessous de l'orifice d'extrusion alors que la surface du polymère est déjà figée.

Entre le point **C**, sortie de l'orifice, et le point **D** où la vitesse est stabilisée le polymère subit une accélération de **60 à 70 g**.

3-3 - Le fil qui quitte le rouleau d'appel de filage à 1 000 m./ min est "appelé" par le rouleau d'appel d'étirage à une vitesse environ trois fois plus élevée. On constate en fait que cette augmentation de vitesse se réalise à la sortie du deuxième rouleau d'appel de filage grâce à une striction du fil. Voir la figure **9 - 11B**

L'agrandissement de la zone de striction représenté sur la figure **9 - 11C** montre que le diamètre d'un brin de diamètre initial de 26 µm. par exemple passe à environ 15 µm. en considérant que la vitesse est multipliée par 3 (loi de conservation de la masse). Cette réduction de diamètre se réalise sur une très petite longueur de l'ordre de un à deux diamètres initiaux.

Entre le point **E**, avant la striction, et le point **F**, après la striction, l'accélération subie par le polymère est de l'ordre de **$2 \cdot 10^6$ g**.

On imagine les contraintes au niveau local qui peuvent résulter de la présence d'hétérogénéité de masse volumique différente de celle du polymère. De fait on constate que la plupart des casses se produisent au cours de la phase de striction à l'étirage pour les polymères qui, comme le polyester PET, s'étirent avec striction. D'autres polymères subissent par contre l'étirage avec une variation continue du diamètre et une évolution plus régulière des contraintes.

