

CHAPITRE HUIT

CONFORMATION DES POLYMÈRES SYNTHÉTIQUES SOUS UNE FORME TEXTILE

1 - LIMITES DE L'ÉTUDE.

Par conformation des polymères synthétiques sous une forme textile, il faut comprendre les transformations réalisées par les grands producteurs de fibres synthétiques : Du PONT, TOYOBO, TEIJIN, AKZO, NYLSTAR,.....etc., c'est à dire la mise des polymères sous forme de filaments ayant des propriétés bien déterminées pour pouvoir subir les traitements en aval qui conduiront aux articles finis.

La figure 8-1 montre que ces traitements en aval sont nombreux et complexes avant de conduire à des produits commercialement vendables : tissus, tricots, indémaillables, tapis, etc.

2 - QUELQUES DÉFINITIONS.

Le monde du textile utilise des mots usuels mais dans un sens bien précis parfois différent de celui de l'usage courant, ce qui peut prêter à confusion si les définitions ne sont pas rappelées.

- Un **BRIN** est le résultat de l'extrusion d'un polymère au travers d'un orifice. On peut opérer soit avec un polymère fondu, qui est ensuite refroidi, soit avec un polymère en solution sous forme de collodion, le solvant étant éliminé après l'extrusion.

Le diamètre d'un brin est compris entre quelques μm . et quelques dizaines de μm . Un brin est donc en général trop fragile pour être manipulé isolément. La figure 8-2 indique les diamètres des brins pour différents polymères en fonction du titre (Voir plus loin la définition du titre)

Citons cependant le cas des **monobrins**, qui sont manipulés en tant que tels, dont le diamètre est beaucoup plus important et peut dépasser le millimètre. Ils servent essentiellement à des usages particuliers para-textiles : cordes, fils de pêche, cordage de raquettes de tennis,etc.

- Un **FIL CONTINU** est la réunion de plusieurs brins de très grande longueur de façon à former un ensemble continu. Un exemple peut être donné par le fil à coudre enroulé sur la bobine de la couturière. Classiquement un fil est constitué d'une dizaine à quelques centaines de brins, traités pour qu'ils gardent une certaine cohésion entre eux.
- Une **FIBRE** est un ensemble de brins coupés de quelques centimètres de longueur. La longueur de coupe rend possible le mélange avec des produits naturels, tels que le coton ou la laine, qui sont eux-mêmes constitués par des fibres courtes.

La longueur des fibres peut être unique : 4,5 ou 8,0 cm. par exemple, ou couvrir un certain spectre de longueurs. On aura alors une coupe dite "échelonnée".

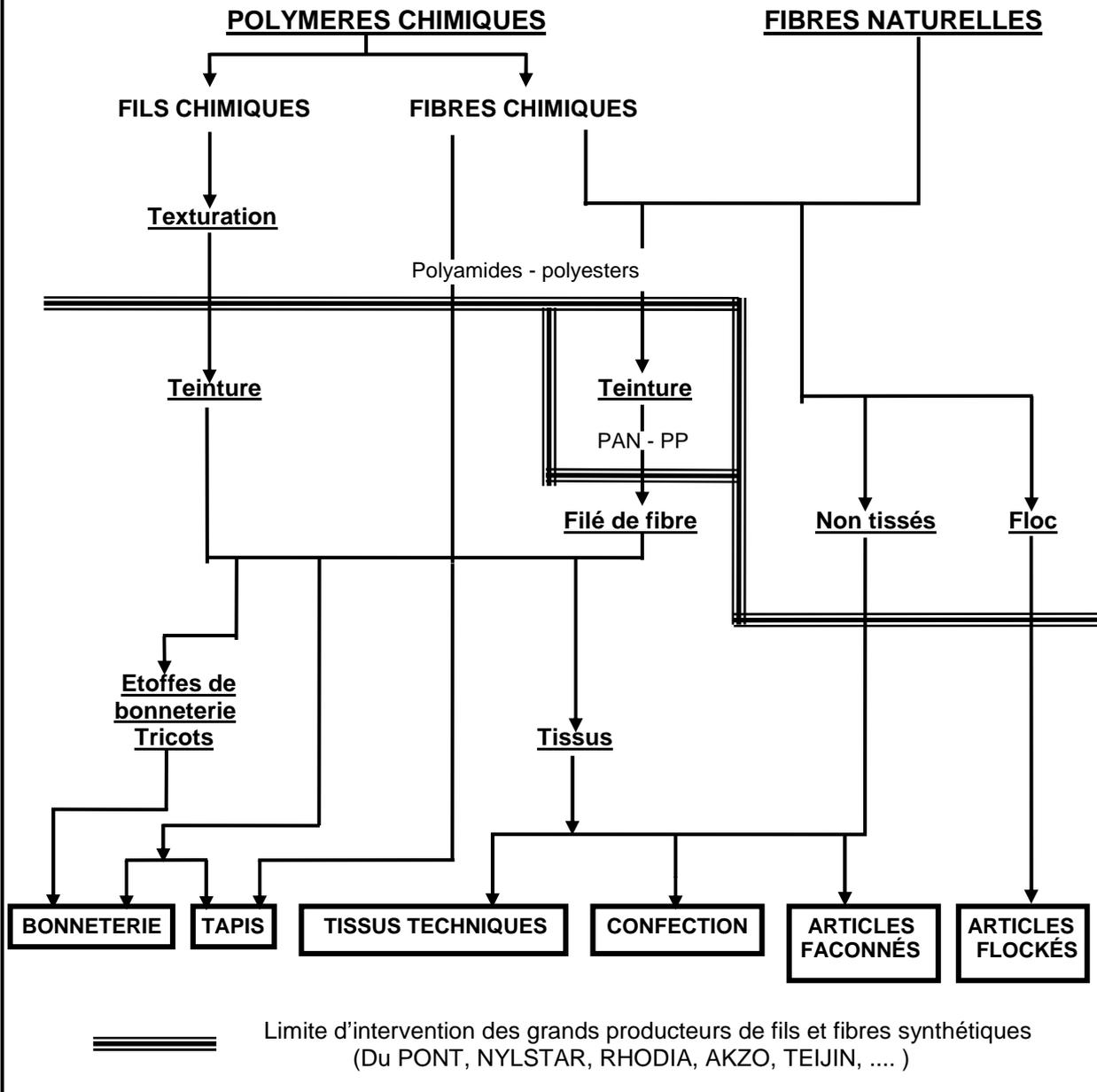
Un échantillon de fibre se présente comme une bourre qui peut être transformée en un "filé de fibre" par des techniques dérivant de celle des rouets des temps passés.

- **Unités de mesure du titre.** Le titre est la caractéristique qui concerne la grosseur d'un brin ou d'un fil. Le titre s'exprime par un poids pour une longueur donnée.

La première unité définie pour exprimer la grosseur d'un brin ou d'un fil a été le **DENIER**. Un denier correspond à une masse de un gramme pour une longueur de 9 000 mètres. Un brin de 3,3 deniers implique par exemple que la masse d'une longueur de 9 000 mètres est de 3,3 grammes. Connaissant la masse spécifique du matériau (qui dépend de sa nature et de son degré de cristallinité) on a donc un accès au diamètre.

Figure 8- 1

**CHEMINEMENT CONDUISANT DES POLYMÈRES
AUX PRODUITS TEXTILES COMMERCIAUX**



Remarque : Le nom de denier vient d'une monnaie romaine, le *denarius*, qui servait à peser les soies. Voir au chapitre DIX SEPT plus de précisions sur le denier.

Dans un souci d'harmonisation avec le système métrique on utilise désormais le **TEX** qui représente une longueur de 1 000 mètres pour une masse de un gramme. Cette unité représente une masse trop importante pour les fils et fibres classiques et c'est le **DECITEX** (dtex) qui est habituellement utilisé. Il est proche du denier car il représente une masse de un gramme pour une longueur de 10 000 mètres.

Lorsqu'on exprime le titre d'un fil continu il faut également indiquer le nombre de brins qui le constituent. On écrit d'abord la valeur du titre puis le nombre de brins avec / comme séparation. Par exemple un fil dénommé **167 / 30** signifie que ce fil est constitué par l'assemblage de 30 brins élémentaires et qu'il pèse 167 g. pour 10 000 m.

- **Unité de mesure de la résistance à la rupture.** Une autre unité importante qualifie la résistance à la rupture sous l'effet d'une traction. On a longtemps utilisé le gramme par denier. L'unité actuelle est le centi-Newton par tex : cN / tex.

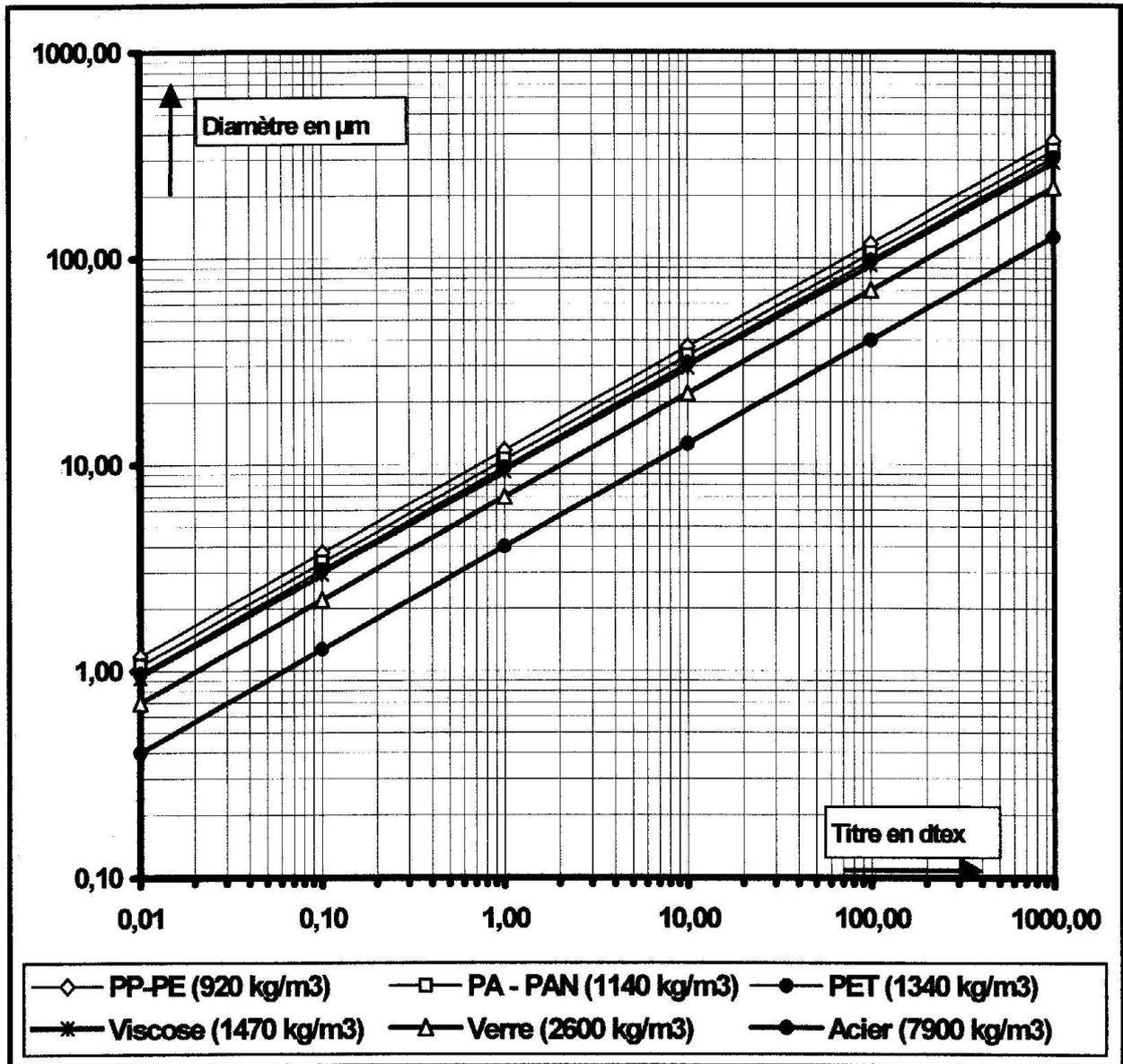
La figure 8-3 donne par ailleurs les correspondances entre les différentes unités utilisés en textile.

Figure 8 - 2

**RELATION ENTRE LE TITRE EN dtex ET LE DIAMÈTRE
DU BRIN POUR DIFFÉRENTS MATÉRIAUX**

Si le titre est en dtex le diamètre trouvé doit être multiplié par 1,054

La formule générale est : $D (\mu\text{m.}) = \sqrt{127\,323 / \rho (\text{kg./m}^3)} \cdot \sqrt{T (\text{dtex})}$



3 - PROPRIÉTÉS RECHERCHÉES POUR LES FILS ET FIBRES SYNTHÉTIQUES.

Ces propriétés, qui caractérisent l'aptitude des fils et des fibres à subir des traitements en aval, à résister aux conditions d'utilisation des articles finis ainsi qu'à procurer un confort et une impression tactile, sont importantes à connaître car elles permettent de définir les principes et les technologies de conformation des masses polymères.

Ces propriétés, qui font l'objet de cahiers des charges variables selon les utilisateurs, sont les suivantes :

- a) Une finesse donnée des brins élémentaires, caractérisé par un titre en décitex.

Figure 8 – 3

TABLEAU DES ÉQUIVALENCES ENTRE LES UNITÉS DE MESURE TEXTILES USUELLES

La densité **d** est exprimée en g/cm³

$$g = 9,81 \text{ m./s}^2 \quad 1,02 = 10/g \quad 1,13 = 100 / (9g) \quad 8,83 (9g) / 10$$

1 Gigapascal	$10^9 \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)} = 10^{10} \text{ dyne/cm}^2 = 10^2 \text{ Hectobar} = 11,3/d \text{ g/den} = 102/d \text{ g/tex}$ $= 10,2/d \text{ g/dtex} = 1/d \text{ N/tex} = 100/d \text{ cN/tex}$
1 N/m ²	$= 10^{-9} \text{ Gpa} = 10 \text{ dynes/cm}^2 = 10^{-7} \text{ Hectobar} = 1,13 \cdot 10^{-8}/d \text{ g/den}$ $= 1,02 \cdot 10^{-7}/d \text{ g/tex} = 1,02 \cdot 10^{-8}/d \text{ g/dtex} = 10^{-9}/d \text{ N/tex} = 100/d \text{ cN/tex}$
1 dyne/cm ²	$= 10^{-10} \text{ Gpa} = 0,1 \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)} = 10^{-8} \text{ Hectobar} = 1,13 \cdot 10^{-9}/d \text{ g/den}$ $= 1,02 \cdot 10^{-8}/d \text{ g/tex} = 1,02 \cdot 10^{-9}/d \text{ g/dtex} = 10^{-10}/d \text{ N/tex} = 10^{-8}/d \text{ cN/tex}$
1 Hectoba	$= 10^{-2} \text{ Gpa} = 10^{-7} \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)} = 10^8 \text{ dynes/cm}^2 = 0,113/d \text{ g/den} = 1,02/d \text{ g/tex}$ $= 0,102/d \text{ g/dtex} = 0,01/d \text{ N/tex} = 1/d \text{ cN/tex}$
1 g/den	$= 0,883 \cdot d \text{ Gpa} = 8,83 \cdot 10^7 \cdot d \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)} = 8,83 \cdot 10^8 \cdot d \text{ dynes/cm}^2 = 8,83 \cdot d \text{ Hectobar}$ $= 9 \text{ g/tex} = 0,9 \text{ g/dtex} = 0,883 \text{ N/tex} = 8,83 \text{ cN/tex}$
1 g/tex	$= 9,81 \cdot 10^{-3} \cdot d \text{ Gpa} = 9,81 \cdot 10^6 \cdot d \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)} = 9,81 \cdot 10^7 \cdot d \text{ dynes/cm}^2 = 0,981 \cdot d \text{ Hectobar}$ $= 0,111 \text{ g/den} = 0,1 \text{ g/dtex} = 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ N/tex} = 0,981 \text{ cN/tex}$
1 g/dtex	$= 0,981 \cdot d \text{ Gpa} = 9,81 \cdot 10^7 \cdot d \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)} = 9,81 \cdot 10^8 \cdot d \text{ dynes/cm}^2 = 9,81 \cdot d \text{ Hectobar}$ $= 1,11 \text{ g/den} = 10 \text{ g/tex} = 0,981 \text{ N/tex} = 9,81 \text{ cN/tex}$
1 N/tex	$= d \text{ Gpa} = 10^9 \cdot d \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)} = 10^{10} \cdot d \text{ dynes/cm}^2 = 100 \cdot d \text{ Hectobar} = 11,3 \text{ g/den}$ $102 \text{ g/tex} = 10,2 \text{ g/dtex} = 100 \text{ cN/tex}$
1 cN/tex	$= 0,01 \cdot d \text{ Gpa} = 10^7 \cdot d \text{ N/m}^2 \text{ (Pa)} = 10^8 \cdot d \text{ dynes/cm}^2 = d \text{ Hectobar} = 0,113 \text{ g/den}$ $1,02 \text{ g/tex} = 0,102 \text{ g/dtex} = 0,01 \text{ N/tex}$

Exemples :

$$\begin{aligned} \text{Valeur en cN/tex de } 6,5 \text{ g/den ?} & \Rightarrow 6,5 \cdot 8,83 = 57,4 \text{ cN/tex} \\ \text{Valeur en N/m}^2 \text{ (Pa) de } 3,2 \text{ g/dtex ? (d = 1,340)} & \Rightarrow 3,2 \cdot 9,81 \cdot 10^7 \cdot 1,340 = 4,206 \cdot 10^8 \text{ Pa} \end{aligned}$$

b) Un comportement donné aux déformations ultérieures.

Ces déformations sont en général longitudinales et le comportement en est quantifiés par :

- Une **ténacité** exprimée en **cN / tex**. On remarquera que le nombre de tex définissant une section pour une masse volumique donnée, la ténacité se calcule en rapportant la force de rupture à cette section initiale et non pas à la section au moment de la rupture.

Pour mieux qualifier les produits textiles on a tendance aujourd'hui à donner deux ténacités :

Ténacité dite "**A**" ramenée à la section initiale.

Ténacité dite "**B**" ramenée à la section de rupture.

- Un **module** exprimé également en **cN / tex**. C'est le module d'YOUNG de la mécanique classique. Cette caractéristique est importante dans le cas par exemple des fils à coudre ou des fils pour pneumatiques qui doivent rester dans leur limite élastique même sous une charge élevée.
- Eventuellement une **aptitude à absorber une énergie** C'est le cas des fils pour ceintures de sécurité ou pour parachutes.

- c) **Une stabilité thermique.** C'est l'aptitude à conserver les propriétés initiales malgré les traitements ultérieurs qui sont réalisés à chaud : teinture, lavage, La stabilité thermique est caractérisée par un **retrait** exprimé en % et déterminé dans des conditions définies : dans l'eau bouillante, dans la vapeur sèche à 130 °C, dans l'air chaud à 180 °C, etc.

Il faut remarquer que pour les polymères synthétiques, les propriétés de comportement et de stabilité thermique (b) et (c) dépendent fortement de l'orientation macromoléculaire et du taux de cristallinité.

- d) **Une aptitude à la teinture** et à conserver le coloris malgré les lavages sur les articles finis. Cette aptitude est mesurée par des tests spécifiques à l'aide de colorants étalons et dans des conditions bien définies. Dans certains cas, tels que les tissus pour sièges automobiles, on demande une résistance des coloris (et du polymère) à l'effet d'une exposition à la lumière. On évalue cette résistance dans des appareils équipés de lampes de forte puissance permettant en une centaine d'heures de reproduire un cycle d'exposition de plusieurs mois à la lumière naturelle du soleil.
- e) **Une masse volumique apparente.** C'est la notion de "voluminosité" conduisant à un toucher agréable et à un confort des articles textiles. Les fils et les fibres textiles doivent être "frisés" artificiellement. On notera que la notion de "confort" est très subjective et qu'elle dépend de nombreux autres paramètres.

Pour obtenir toutes ces propriétés on procédera schématiquement :

- A un **affinage** par extrusion et étirage des brins pour aboutir à un titre désiré.
- A une **orientation macromoléculaire** pour obtenir des propriétés mécaniques.
- A un **ajustement de la cristallinité** pour conférer une stabilité thermique.

Ainsi que nous l'avons déjà évoqué, l'affinage par extrusion peut être réalisé soit à partir de polymères fondus (cas des polyesters, polyamides et du polypropylène), soit à partir de collodions dans un solvant (cas du polyacrylonitrile). Les technologies étant très différentes, leur étude sera faite séparément.

4 - EXTRUSION / ÉTIRAGE DES POLYMÈRES FONDUS.

(Par exemple polyesters, polyamides et polypropylène)

A l'origine de l'industrie des fibres synthétiques issues de polymère fondu, le processus fut mis au point en deux stades distincts : le **filage** puis l'**étirage**.

Les paramètres de ces opérations sont ajustés pour obtenir une partie des propriétés précédemment évoquées. Nous verrons plus loin comment les procédés modernes intègrent plusieurs étapes notamment le filage et l'étirage.

4 - 1 - LE FILAGE : ASPECTS SCIENTIFIQUES. (D'après J.F. AGASSANT)

Lorsque le polymère n'est pas obtenu à l'état fondu dans une installation de polymérisation continue accouplée à des métiers de filage, il est disponible sous forme de granulés solides. Ce polymère - thermoplastique - est fondu dans une boudineuse par conduction et par dissipation d'énergie visqueuse. La matière fluide très visqueuse obtenue est alors pompée puis forcée dans les orifices d'une filière de façon à obtenir des formes filamenteuses. Après refroidissement et étirage on obtient des filaments dont les propriétés dépendent de la nature de la macromolécule mais également de toute l'histoire thermo-mécanique qu'elle a subie durant le processus de mise en forme.

Au premier abord, transformer un polymère sous forme de fils apparaît comme un problème de **transfert thermique** (On chauffe puis on refroidit un matériau qui peut connaître des changements de phase) et de **mécanique des fluides** (On oblige un fluide à s'écouler dans des trous de filière de formes plus ou moins complexes)

En réalité cette "thermo-mécanique des fluides" se distingue de la mécanique des fluides classiques par un certain nombre de caractéristiques physiques propres aux polymères :

* Les polymères fondus ont une viscosité très élevée (typiquement de 100 000 à 1 000 000 de fois plus élevée que celle de l'eau). Les écoulements ne seront jamais turbulents. En revanche les pressions engendrées dans les installations seront importantes. Par ailleurs l'écoulement du polymère sera très dissipatif et il sera illusoire de vouloir contrôler sa température dans la masse en contrôlant simplement la température des appareillages.

* Les polymères fondus ont un comportement non-newtonien. Le comportement va dépendre significativement du taux des vitesses de déformation appliqué localement (pseudo-plasticité) mais également de toute l'histoire des contraintes et des déformations appliquées sur la trajectoire de l'élément de matière considéré (viscoélasticité). Ces comportements rhéologiques complexes posent toujours des problèmes de physique des polymères : relations entre le comportement local des chaînes et des grandeurs mécaniques mesurables, établissement de lois de comportement, modélisation non linéaires (champs de température, de pression et de contrainte),..... etc.

* Les polymères fondus ont un comportement rhéologique thermo-dépendant. Une variation de la température de 10°C peut s'accompagner d'une variation de viscosité de 40 à 100%. Ce phénomène concourt d'ailleurs, avec la pseudo-plasticité, à stabiliser les conditions de l'extrusion. Une augmentation locale de contrainte provoquera un échauffement supplémentaire d'où une diminution de la viscosité donc de la contrainte. Par contre une modélisation du processus impose un couplage de la résolution des équations mécaniques et thermiques de l'écoulement.

* Les polymères ont une faible diffusivité thermique - typiquement cinquante fois plus faible que celle de l'acier - Les temps de chauffage et de refroidissement seront donc importants.

L'étude mathématique du filage d'un polymère à l'état fondu conduit à résoudre un système d'équation qui comprend :

- Un bilan des masses qui s'écrit en supposant que le polymère est incompressible.
- Un bilan des forces qui s'écrit en négligeant les termes de masse et d'inertie.
- Un bilan d'énergie qui s'écrit en supposant que la conductivité thermique λ est une constante.
- Une loi de comportement rhéologique plus ou moins complexe : loi newtonienne, loi de CARREAU, loi intégrale, loi différentielle de type OLDROYD B, etc.

Les inconnues sont les champs de vitesse, de contrainte, de pression et de température.

Les difficultés de résolution dépendront essentiellement de la loi de comportement choisie et du choix des conditions aux limites. La modélisation d'écoulements dans des géométries complexes par la méthode des éléments finis peut impliquer la résolution de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines, de milliers d'équations ce qui exige des puissances de calcul considérables.

4 - 2 - LE FILAGE : ASPECTS TECHNOLOGIQUES.

Le polymère fondu est dosé très précisément (volumétriquement) par des pompes à engrenages qui permettent également une mise en pression - typiquement de 100 à 300 bar -

- La figure 8-4 montre le dessin d'une pompe à engrenages typique simple avec une entrée et une sortie. On peut également voir sur cette figure le schéma de pompes planétaires plus complexes qui, à partir d'un entraînement et d'une arrivée de polymère fondu uniques, produisent 3, 4 ou 8 flux identiques en sortie.

Pour assurer une grande précision du débit, gage de bonne régularité du titre des filaments, ces pompes présentent des jeux très faibles de l'ordre de 10 μm entre le corps et les engrenages. Elles doivent être dimensionnées pour garder une vitesse de rotation faible, de l'ordre de 10 à 20 tr./ min., sinon le gradient de cisaillement à la paroi peut dépasser 4 000 s^{-1} et provoquer une élévation de température qui peut atteindre 15°C (ce qui peut être défavorable pour des polymères thermo-dégradables)

Les pompes sont usinées dans des aciers résistant bien à la chaleur mais un fabricant (SLACK & PARR associé à DYNAMIC CERAMIC UK) a lancé en 2000 des pompes en céramique.

Après dosage volumétrique par la pompe, le polymère est alors très finement filtré sur des couches de sable, des poudres métalliques inoxydables ou des réseaux de grillages métalliques. Des exemples de ces composants sont représentés sur la figure 8-5.

Le choix du média de filtration est très important pour la réussite d'une bonne extrusion. Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des différents composants de filtration.

	Toile métallique	Toile métal. frittée	Bourre de fibres métalliques	Poudre métallique frittée	Poudre métallique	Sable
Aptitude à stopper les particules solides	Faible sauf design spécial	Faible sauf design spécial	Très bonne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Aptitude à retenir les gels	Acceptable	Bonne	Excellente	Excellente	Bonne	Acceptable
Pression initiale nécessaire	Basse	Basse	Basse	Très élevée	Elevée	Elevée
Stabilité des pores	Acceptable	Excellente	Excellente	Excellente	Acceptable	Acceptable
Coût	Faible	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé	Très faible

Le degré de filtration peut descendre à 10-15 μm pour des titres fins délicats à filer

Après filtration le polymère est alors envoyé sur une plaque filière, usinée dans des aciers pouvant travailler en température et qui comporte :

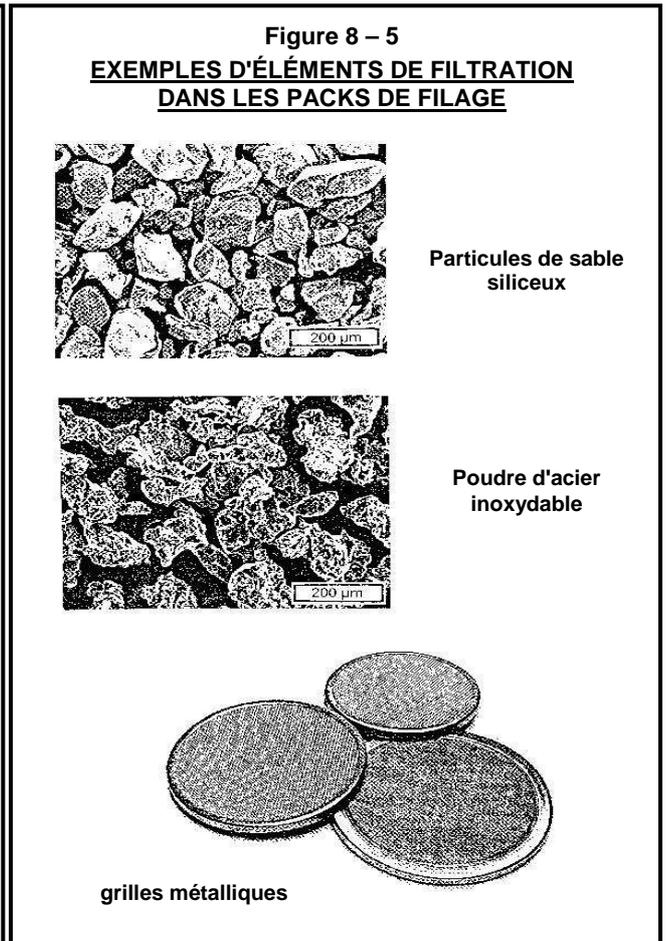
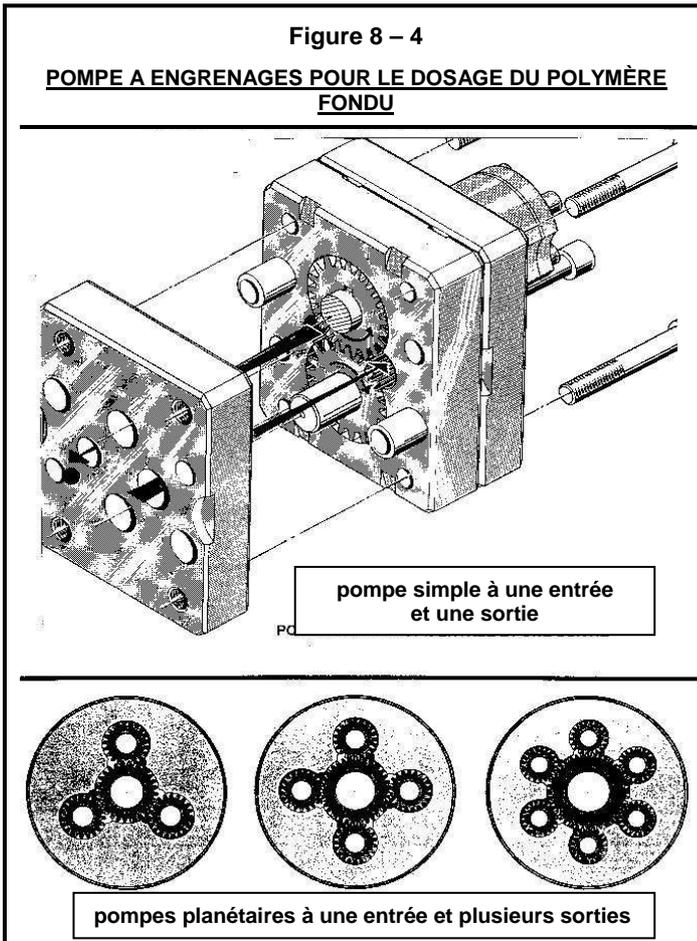
- * Pour la confection des fils continus : une à plusieurs plages de 3 à 200 orifices calibrés pour chacune de ces plages.
- * Pour la confection des fibres : une plage unique de 500 à plusieurs milliers d'orifices calibrés.

Chaque orifice est distant de ses voisins de quelques millimètres pour éviter les collages de brins à brins près de la sortie de la filière alors que le polymère n'est pas encore refroidi.

- La figure 8-6 montre quelques répartitions d'orifices d'extrusion sur des plaques filière pour fils et fibres.
- La figure 8-7 montre des coupes de plaques filières.
- Les figures 8-8 et 8-9 donnent des exemples du grand nombre de formes de sections que peuvent avoir les orifices d'extrusion. La section des orifices n'est, en effet, pas nécessairement ronde. Des sections complexes sont de plus en plus utilisées pour obtenir des effets visuels ou des effets de toucher sur les fils et les surfaces qui en dérivent.
- La figure 8-10 montre quelques réalisations industrielles de filières.

La vitesse moyenne de passage du polymère dans les orifices - dont le diamètre est typiquement compris entre 0,2 et 0,4 mm. lorsqu'ils sont de section ronde - est sensiblement comprise entre 5 et 30 m./ min. ce qui entraîne un gradient de cisaillement à la paroi de plusieurs milliers de s^{-1} et une viscosité apparente nettement plus faible que la viscosité

newtonienne à gradient faible (typiquement 40 à 50%). Une vitesse d'extrusion supérieure peut entraîner des instabilités et de la draw-resonance. (extrusion pulsée conduisant à des casses).



La confection des plaques filières est une opération de mécanique de très haute précision qui fait notamment appel au micro perçage et à l'électroérosion pour obtenir des caractéristiques dimensionnelles strictement identiques de trous à trous (et il y en a des milliers !) et des états de surface sans défauts. Les tolérances de fabrication sont très faibles. On a, par exemple, pour des trous ronds :

Diamètre : ± 1 à $5 \mu\text{m}$ selon les diamètres. - Hauteur du trou : ± 10 à $25 \mu\text{m}$ selon les hauteurs

Un petit nombre de fabricants dans le monde sont en mesure de satisfaire des cahiers des charges très sévères. On peut citer par exemple:

ENKA TECHNICA GmbH – CECCATO (Italie) – EXTRUSION SYSTEM (UK) – GÜNTHER FREY GmbH – HILLS (USA) – NIPPON NOZZLE (Japon) – WETZEL (Suisse) -

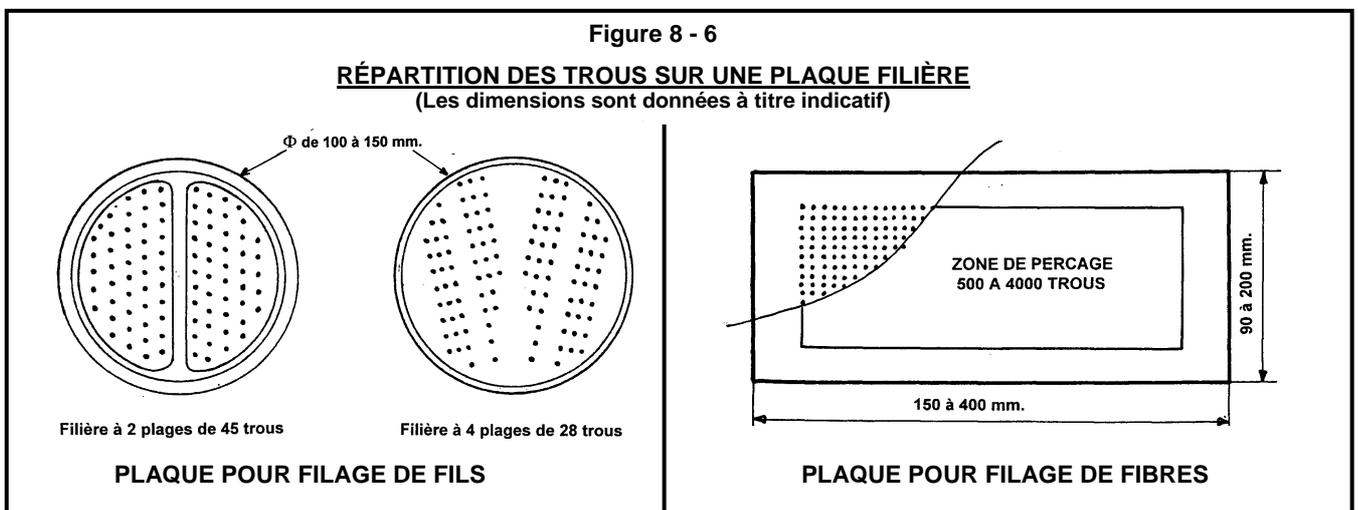
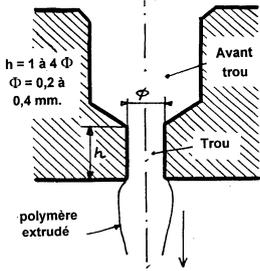


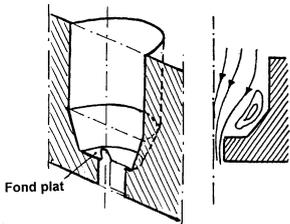
Figure 8 - 7

EXEMPLE DE PLAQUE FILIÈRE EN COUPE

VUE AGRANDIE ET DÉFORMÉE DE L'ENSEMBLE TROU / AVANT TROU
Le profil de raccordement entre l'avant-trou et le trou peut être différent de celui représenté



POSSIBILITE DE STAGNATION DE POLYMERE FONDU DANS UN TROU DE FILIERE NON AXI-SYMETRIQUE (Filière trilobée)



VUE A L'ECHELLE 10 environ

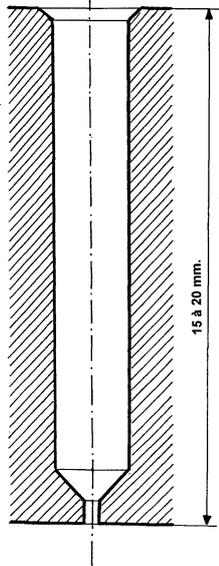


Figure 8 - 8

EXEMPLES DE FORMES DE TROUS DE FILIERES PROPOSEES PAR LA FIRME TORAY (Japon - 1992)

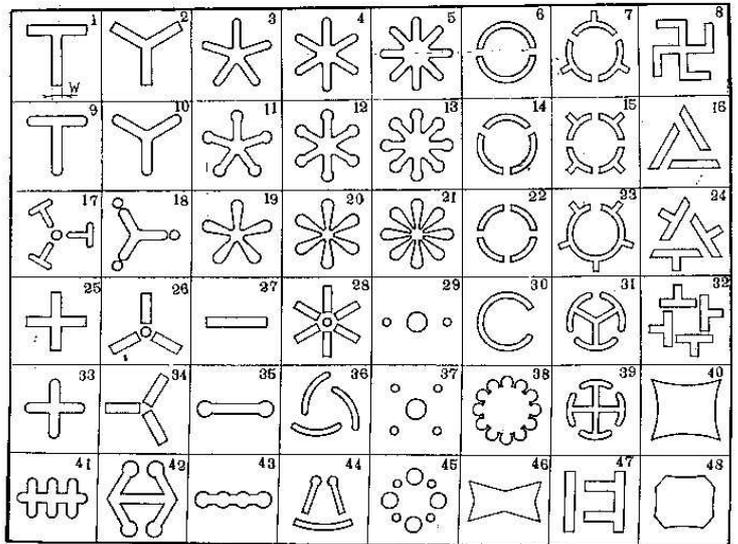


Figure 8 - 9 - **AUTRES EXEMPLES DE SECTIONS TRÈS COMPLEXES (WETZEL)**

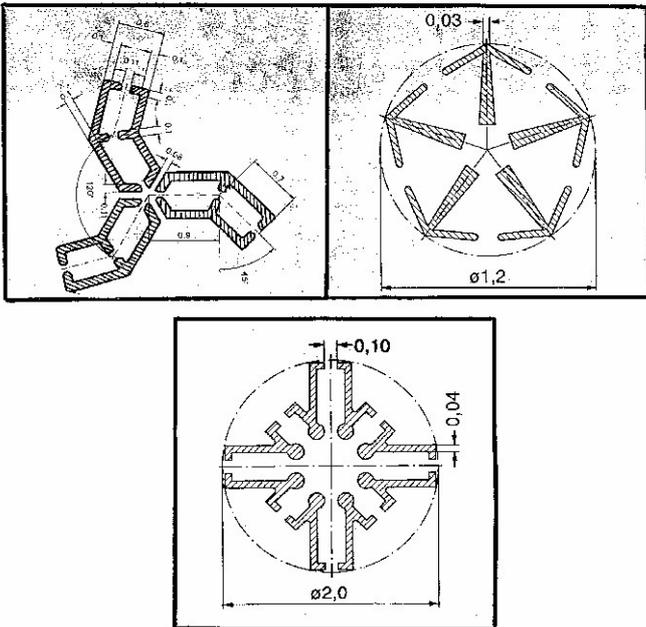


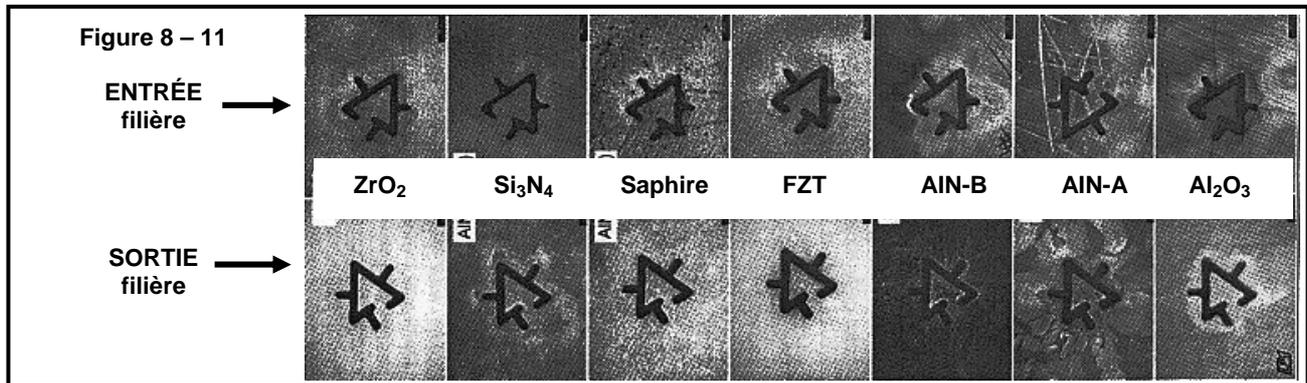
Figure 8 - 10

EXEMPLES DE FILIÈRES PRÉSENTÉES PAR UN FABRICANT (HEH - Allemagne)



Du fait des très faibles tolérances de fabrication, les plaques filières sont des éléments coûteux. Durant leur "vie" qui peut durer plusieurs années, elles sont démontées et "brûlées" dans des fours à plusieurs centaines de °C pour éliminer les déchets de polymère, avant d'être nettoyées par ultra-sons dans des bains spéciaux. Ces traitements thermiques répétés ne sont pas favorables au maintien des caractéristiques dimensionnelles et des états de surface internes. Des contrôles minutieux sont donc indispensables avant chaque remontage. Ces contrôles sont réalisés soit par des moyens optiques, soit par mesure de la perte de charge d'un fluide (air ou huile) dans chaque trou, ou les deux.

Pour trouver une solution à ces problèmes, cruciaux pour la fabrication de micro-fibres, des travaux sont menés dans la réalisation de plaques filières en céramique (Al_2O_3 , Si_3N_4 , Al_2O_3/ZrO_2 , ...) percées avec un laser de puissance pulsé. Les premiers résultats ont été présentés au début de 2001 (Chemical Fibers International - Vol 51) La figure 8-11 ci-après montre le perçage à l'entrée et à la sortie trous de 1 mm de hauteur dans des plaques en différentes céramiques.



Chaque filière est alors montée dans un ensemble métallique appelé "pack", qui contient également le média filtrant, et dont une représentation schématique est donnée sur la figure 8–12 ci-contre. Les packs sont préparés dans un atelier spécialisé dans lequel l'air est généralement dépoussiéré. Le soin apporté dans la préparation des packs : régularité de tassage des couches de média filtrant, qualité et propreté des joints, pression de serrage, ...etc, est extrêmement important pour l'obtention d'un filage régulier.

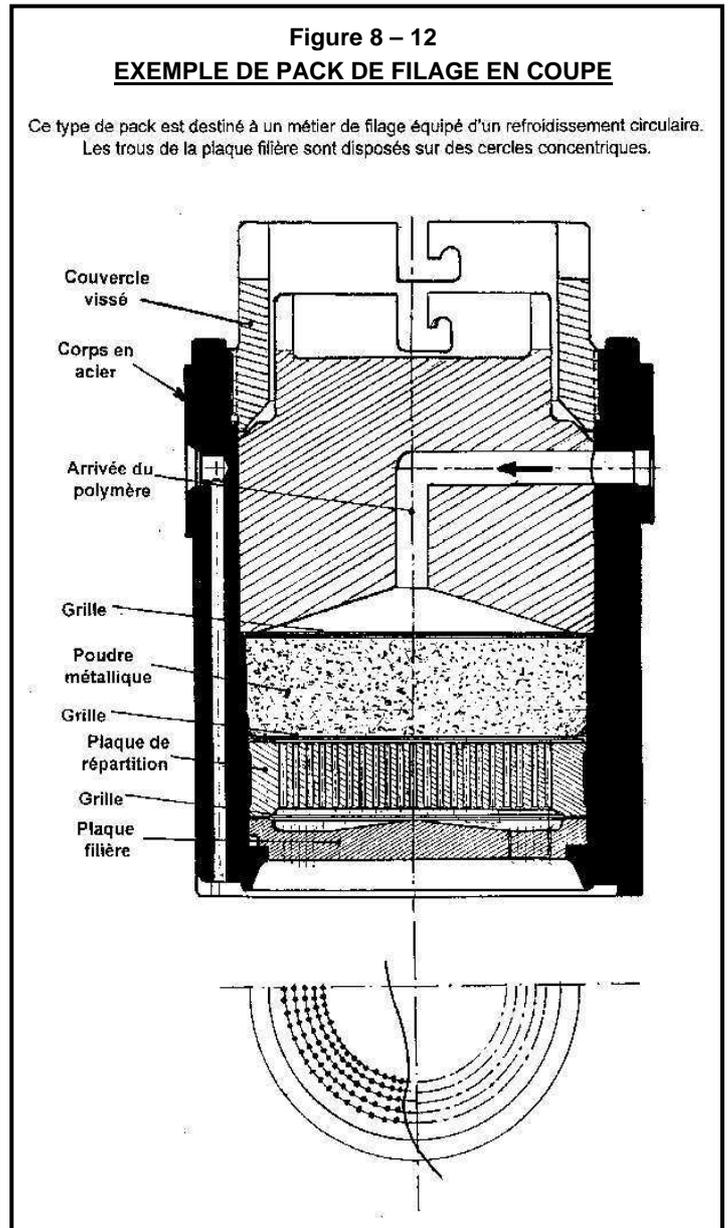
Les packs sont préchauffés dans un four, entre 250 et 300°C, avant d'être installés sur le métier de filage.

Pour chacune des plages d'extrusion, les filaments qui en sont issus sont refroidis par un courant d'air à une température proche de l'ambiance (rarement de l'air refroidi) et avec une humidité relative contrôlée dans une plage allant, selon les cas, de 65 à 85%. Le courant d'air est diffusé par une surface poreuse métallique verticale ou par un système circulaire (air de l'extérieur vers l'intérieur du faisceau ou air de l'intérieur du faisceau vers l'extérieur).

La géométrie du système de refroidissement et des conduites d'air est très sophistiqué car l'air de refroidissement doit être uniformément réparti sur le faisceau sans créer de turbulences qui altéreraient la qualité du filage (Irrégularité de titre de brin à brin, collage de brin, etc.).

Une tendance relativement récente (1997 - 1998) vise même à installer une régulation de débit pour chaque position de filage et non pour l'ensemble du métier.

Le phénomène de transfert thermique pour le refroidissement des filaments est complexe car il s'accompagne de la formation d'une gaine d'air, entraînée par frottement visqueux, autour du faisceau dont la vitesse croît fortement à partir de la sortie des trous de la filière.



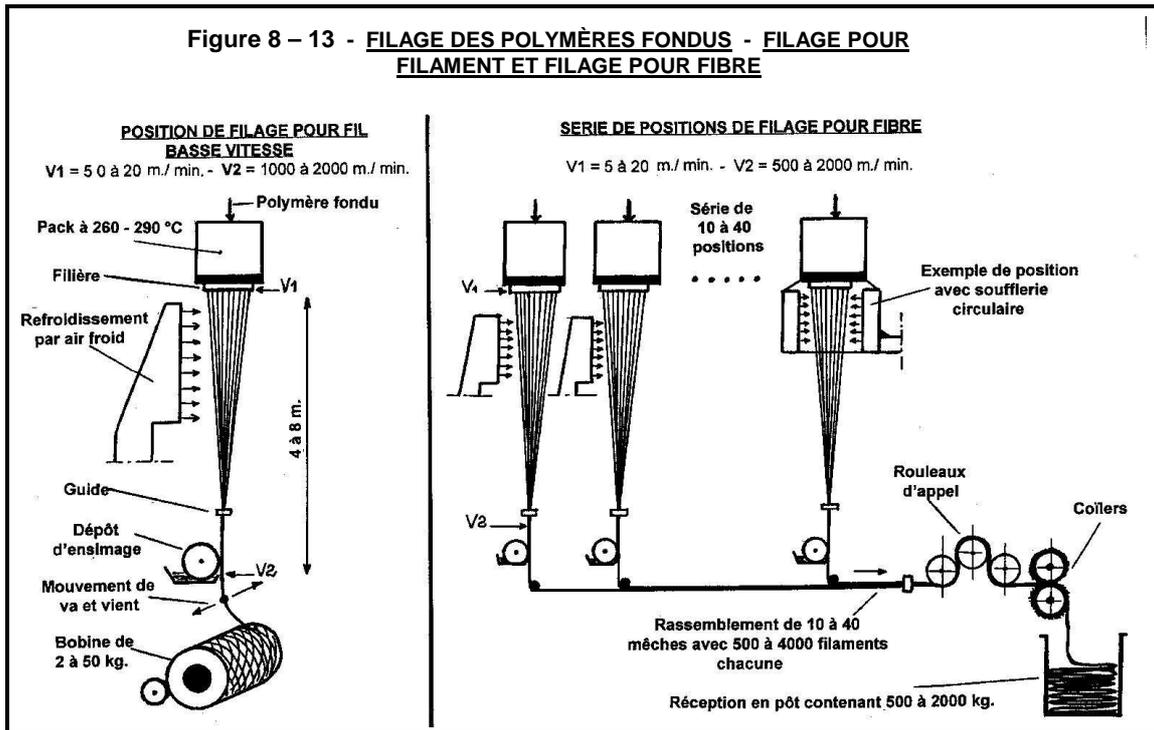
Les filaments provenant d'une plage de filage sont convergés (réunis) pour former un "fil" lorsque leur température devient inférieure au point de transition vitreuse T_g . Le fil obtenu reçoit alors un dépôt d'ensimage qui est destiné à assurer une certaine cohésion entre les brins, un glissant et un écoulement des charges statiques. (voir le chapitre ONZE concernant les ensimages)

Les différents fils sont ensuite :

- Soit placés sur des bobines, dont le poids peut varier de 3 à 50 kg., à l'aide de dispositifs appelés "bobinoirs" (winders en anglais) dans le cas des fils continus .

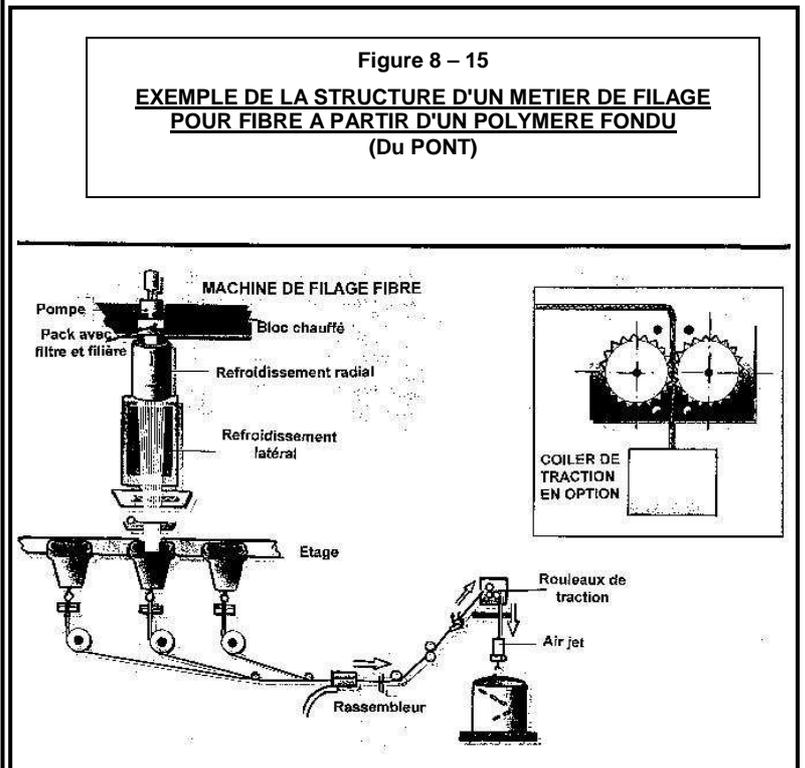
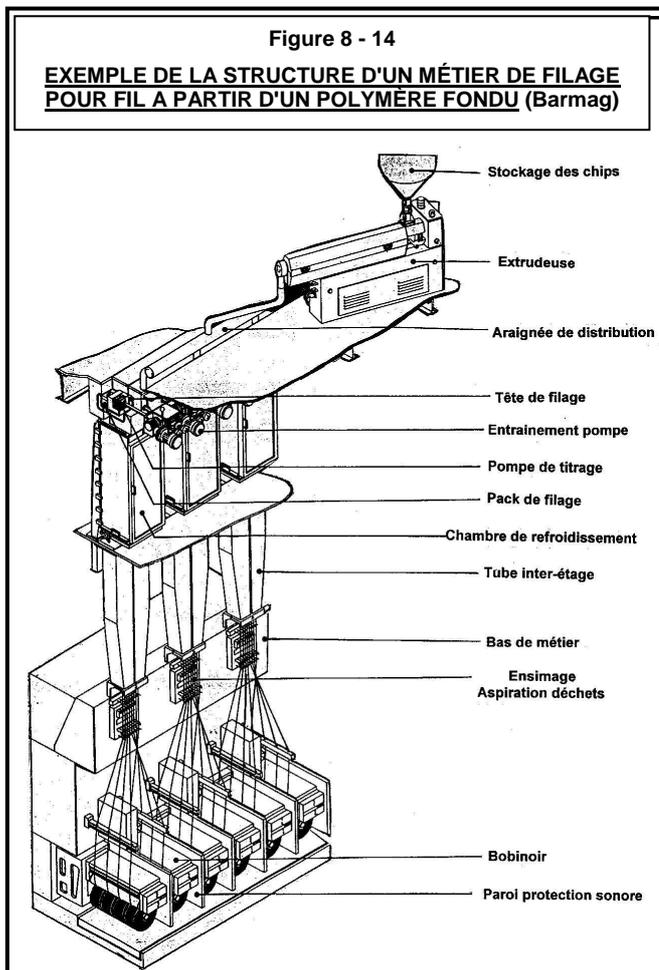
- Soit réunis avec les fils provenant d'autres plaques filières pour former une grosse mèche (De 100 000 à 300 000 dtex par exemple) qui est envoyée dans des pots, contenant entre 500 et 1000 kg., dans le cas de la fabrication de fibres.

Voir schématiquement les deux types de filage sur la figure 8-13 ci-dessous



Un exemple un peu plus détaillé d'un système de filage pour fils POY (fil partiellement orienté au filage) est donné à la figure 8 - 14

Un exemple également plus détaillé d'un système de filage pour fibre polyester est donné à la figure 8 - 15



Dans les procédés classiques de la première génération, la vitesse d'appel des fils sur les bobines ou dans les pots était comprise entre 1 000 et 2 000 m./ min. - et parfois moins de 1 000 m./ min. dans le cas de fils spéciaux - Cela entraîne une déformation très notable du produit fondu puis plastique en dessous de l'orifice d'extrusion d'où l'importance de la connaissance de la rhéologie élongationnelle du polymère pour une bonne maîtrise du processus d'extrusion. Cette connaissance est cependant en général encore faible aujourd'hui. Le taux d'étirement est couramment de 200 à 400 fois, essentiellement dans la zone plastique au dessus de T_g . Il se produit entre la filière et le dispositif d'appel une décroissance du diamètre qui peut être soit régulière et continue soit discontinue et brutale (phénomène de striction)

Le bulbe qui se forme à la sortie de l'orifice d'extrusion est d'autant moins notable, pour un polymère à comportement rhéologique donné, que la vitesse d'appel est grande. Par ailleurs l'étirage important se traduit par une faible orientation macromoléculaire mesurable par exemple par une biréfringence (Différence Δn de l'indice de réfraction entre la direction perpendiculaire et la direction parallèle à l'axe du filament) et qui induit un retrait thermique lorsque l'on réchauffe le filament au dessus de T_g . Du fait de la mobilité inter molécules il y a alors une tendance thermodynamique au repelotonnement des macromolécules.

Cette orientation de faible importance se produit essentiellement dans la zone de relativement basse température située au dessus du point de transition vitreuse T_g . (de l'ordre de 60 à 80°C pour des polymères tels que les polyesters et les polyamides). En effet l'orientation acquise par l'étirage peut se conserver car les temps de relaxation du polymère deviennent plus longs que le temps procédé : les macromolécules n'ont plus le temps de revenir à la forme de pelotes. En effet près du point de fusion les temps de relaxation sont typiquement dans le domaine du millième de seconde.

Les conditions industrielles d'un filage sont fixées très précisément :

- Si la température est trop élevée, il se produit une évolution du polymère par dégradation thermique le plus souvent mais aussi parfois par post-condensation. De plus la viscosité apparente peut devenir trop faible et perturber les écoulements du polymère fondu.
- Si la température est trop basse, l'extrusion devient difficile avec des irrégularités de débit, de la melt fracture et des casses de brins. De plus les pertes de charge en amont de l'extrusion s'élèvent par augmentation de la viscosité apparente. Cependant ce phénomène s'accompagne d'une génération de chaleur au sein du polymère par auto-échauffement visqueux ce qui atténue l'élévation de la perte de charge. (en effet la viscosité décroît avec la température).
- La géométrie des trous d'extrusion doit être extrêmement régulière avec des états de surface absolument identiques pour permettre une bonne régularité des débits de trous à trous.
- La pression en amont de la plaque filière et dans le milieu de filtration ne doit être ni trop haute, car on atteint les limites de résistance mécaniques du système, ni trop basse, car on a alors une mauvaise répartition de la masse fondue entre les différents trous.

Les exigences de régularité du processus de filage sont très sévères, surtout pour l'obtention de fils continus de faibles titres. Dans une exploitation industrielle, il est impératif de pouvoir réaliser sans casse ni incident le filage de plusieurs millions de kilomètres de brins unitaires. L'unité de mesure est le nombre de casses par tonne de polymère transformée en filaments de quelques dizaines de μm . de diamètre final. Les valeurs couramment observées sont voisines de UNE casse par tonne (plus ou moins selon le titre filé). De plus la valeur du diamètre obtenu doit être régulière à moins de 1% près.

4 - 3 - L'ÉTIRAGE.

Les fils issus du processus de filage tel que décrit plus haut ne présentent pas de caractéristiques d'orientation macromoléculaire et de cristallinité suffisantes pour obtenir toutes les propriétés recherchées. On procède alors à l'opération d'étirage qui consiste à réaliser une déformation longitudinale dans un domaine de température compris entre le point de transition vitreuse et une température maximale au dessus de laquelle l'orientation donnée aux macromolécules des fils n'est plus mémorisée. Par contre en dessous de T_g il n'est pas possible de réaliser des déformations rapides de façon homogène. En ce qui concerne les températures d'étirage, données aux fils par conduction à l'aide de plaques ou des rouleaux chauffants, on a par exemple les plages suivantes :

Polyester PET entre 90 et 110°C Polyamide 6-6 entre 50 et 100°C

Le polypropylène est un cas particulier car sa T_g est inférieure à la température ambiante.

Le taux d'étirage est en général compris entre 2 et 4. Il est réalisé en une ou plusieurs fois. Ce taux peut monter jusqu'à 6 dans des cas particuliers de fils à hautes performances en ténacité. Il est alors obtenu en deux ou trois stades.

L'étirage s'accompagne d'un phénomène d'auto-échauffement qui peut par exemple dans le cas du PA 66 provoquer une élévation de température au delà de la T_g ce qui ne nécessite plus un chauffage extérieur complémentaire du fil;

Il se produit souvent une striction brusque, elle est alors généralement "fixée" et localisée sur un organe métallique de la machine d'étirage.

La localisation du point de striction réalisée industriellement ne doit pas être confondue avec l'apparition du point de striction que l'on observe au cours de l'étirage à froid d'une éprouvette statique. Dans ce dernier cas, la striction découle, selon les théories, soit d'une évolution locale du module de déformation en fonction de la température soit de la déformation elle-même.

Dans un étirage industriel dynamique le point de striction est imposé par un dispositif mécanique qui constitue le point d'application de la force d'étirage à un moment où la température locale du fil atteint le point de transition vitreuse. Le module décroît alors fortement (de 3 à 4 fois) et la striction se produit.

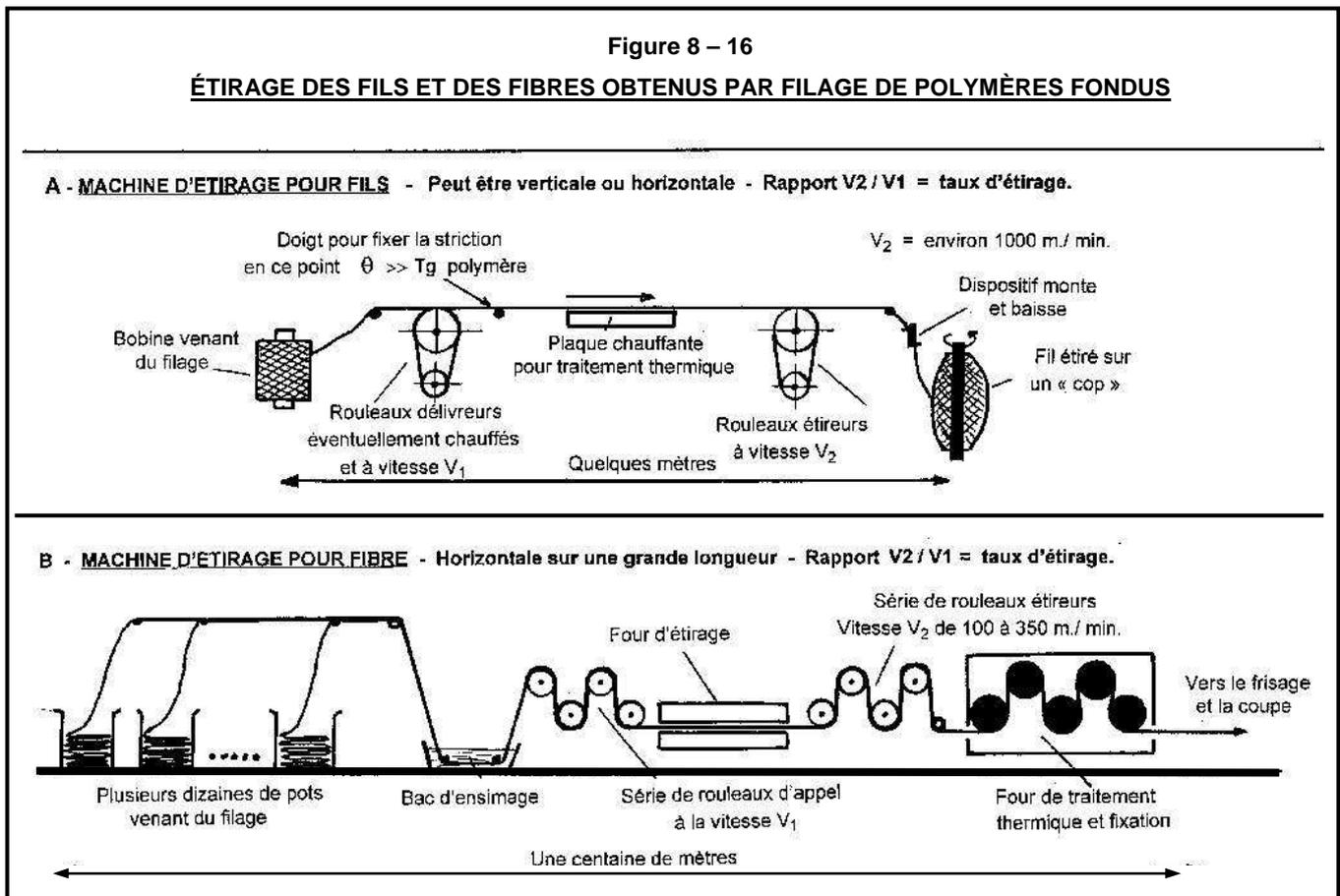
L'orientation macromoléculaire et la cristallisation qui se produisent pendant l'étirage sont encore insuffisantes pour abaisser le retrait thermique à une valeur suffisamment faible. Le supplément de cristallisation nécessaire est obtenu par un traitement thermique complémentaire, accompagné ou non d'une relaxation, et qui est réalisé sur la machine d'étirage elle-même. Il se produit alors une désorientation des phases amorphes, les macromolécules ayant tendance à revenir aux formes de pelotes désorientées thermodynamiquement stables.

Ce traitement thermique complémentaire est réalisé, par exemple, entre 130 et 180°C pour le polyester PET et entre 150 et 190°C pour le PA 6-6. La vitesse sur fil étiré est de l'ordre de 1 000 à 1 500 m./min.

La figure 8-16 donne la configuration d'une machine industrielle pour **fil**s et celle d'une machine pour **fibres**. Cette dernière est beaucoup plus volumineuse car on traite simultanément les mèches issues de plusieurs pots de stockage (typiquement 32 à 40 et parfois jusqu'à 100) c'est à dire souvent plus d'un million de brins élémentaires assemblés.

La figure 8-17 donne la configuration plus précise d'une ligne industrielle d'étirage / frisage / coupe / emballage de fibre polyester PET.

Remarque. Les procédés de conformation des **fil**s en deux stades distincts, comme décrits ci-dessus, ne sont pratiquement plus utilisés industriellement (Voir plus loin les évolutions dans les procédés de filage). Par contre le type de procédé décrit reste la règle pour la préparation des **fibres courtes**.



5 - TEXTURATION-FRISAGE DES FILAMENTS OBTENUS PAR FILAGE- ÉTIRAGE.

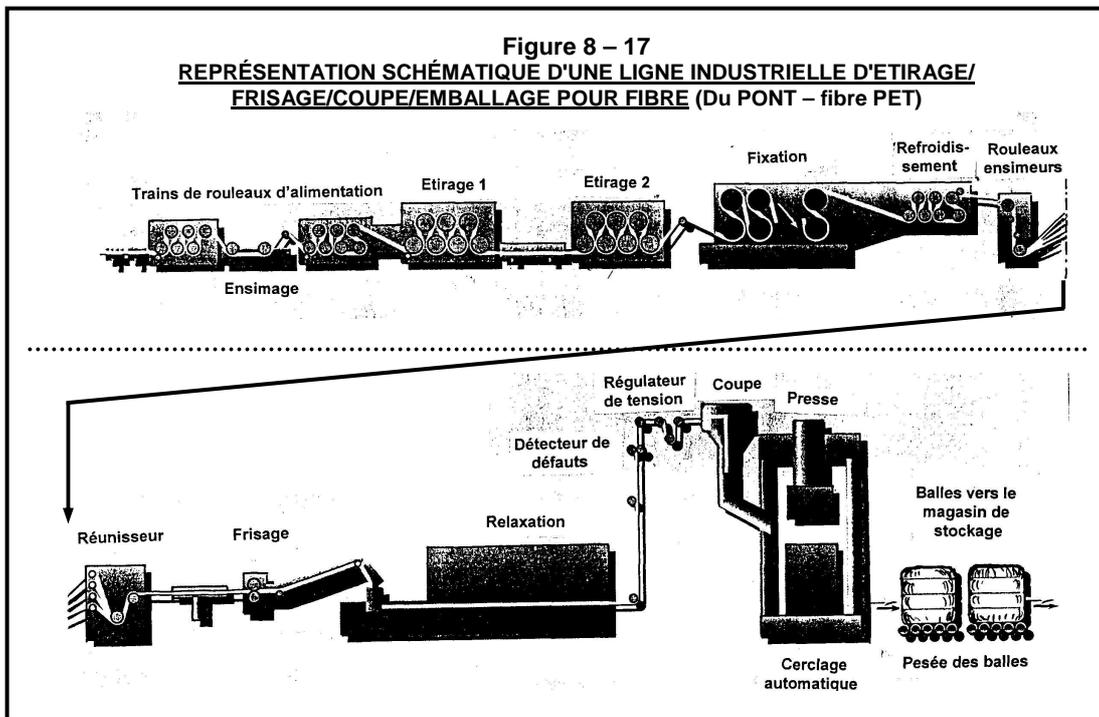
Certains fils peuvent être directement utilisés dès la sortie de l'étirage : ce sont des fils dits "plats". Cependant pour une grande partie des filaments pour fils et pour la totalité des filaments pour fibres, une augmentation de voluminosité est indispensable. L'opération prend le nom :

- De texturation pour les fils continus. La texturation des fils continus fait l'objet d'un chapitre spécial : le chapitre DIX
- De frisage pour les fibres.

5 - 1 - LE FRISAGE DES FIBRES.

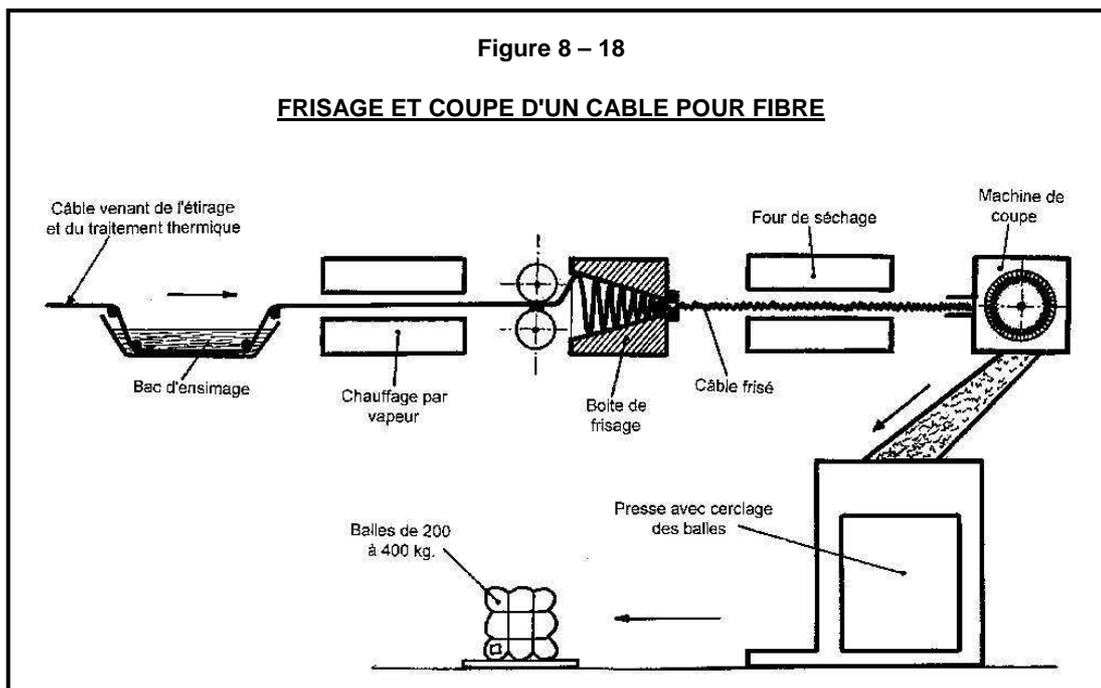
Le frisage, qui concerne les fibres, consiste à comprimer à chaud, dans une boîte dite "friseuse" le câble sortant du traitement thermique de fixation après étirage. Pour occuper tout le volume disponible dans la boîte, les brins se replient sur eux-mêmes et cette ondulation est fixée thermiquement.

Lorsque la pression dans la boîte devient trop importante, des lèvres s'ouvrent pour libérer une certaine longueur de câble. Le câble continu dit "frisé" est alors coupé pour produire la fibre constituée par des brins de quelques centimètres de longueur



. La longueur des brins est ajustée selon la destination finale de la fibre : par exemple 40 mm. si la fibre doit être mélangée avec du coton ou 60 à 80 mm. si elle doit être mélangée avec de la laine.

Voir la figure 8–18 ci-dessous



Il faut également signaler un procédé, principalement appliqué aujourd'hui au PP, qui est la **frisure permanente dès le filage**. C'est la société EXTRUSION SYSTEM qui développe depuis 1997 un nouveau procédé de filage basé sur l'obtention directe sous filière d'un fil intrinsèquement en hélice (helical 3D crimped fibre). Ce procédé, breveté, est basé sur le profil des orifices de la filière qui sont inclinés par rapport au plan de sortie. Il est possible de jouer sur la viscosité du polymère et sur les paramètres procédé pour obtenir différents taux de frisure. Deux installations industrielles seraient opérationnelles en CHINE et en ALLEMAGNE.

6 - ÉVOLUTIONS ACTUELLES DES PROCÉDÉS A PARTIR DE POLYMÈRES FONDUS.

6 - 1 – ÉTIRAGE PARTIELLEMENT RÉALISÉ AU FILAGE.

Le filage à basse vitesse suivi d'un étirage sur une autre machine n'est pratiquement plus utilisé dans le monde sauf pour des fabrications particulières. Depuis le début des années 1980 est apparu un procédé en un seul stade dit

"procédé P.O.Y.", d'après les initiales anglaises **P**artially **O**riented **Y**arn. Une très importante quantité de fils, tant polyester que polyamide ou autres, est actuellement obtenue dans le monde par ce procédé.

Si l'on "appelle" (tracte) sur une bobine, à une vitesse suffisante de l'ordre de 3 500 à 5 000 m./min., le fil sortant d'une filière, on obtient un produit qui s'est partiellement étiré avant sa solidification. Ce fil peut être utilisé directement dans certains emplois bien que l'allongement à la rupture reste encore très important (60% par exemple). Sa principale utilisation reste l'étirage / texturation pour l'obtention de fils à forte voluminosité.

Le procédé est particulièrement simple et s'adapte à toute la gamme des titres.

Voir la figure 8-19 B

Certaines variantes du procédé P.O.Y. impliquent des rouleaux de régulation de la tension, un traitement à la vapeur (polyamides) et un entrelacement à l'air pour donner une certaine cohésion inter-filamentaire.

6 - 2 - ÉTIRAGE DIRECT AU FILAGE.

Dans ce procédé le fil est appelé à basse vitesse ($V_1 = 1\ 000$ à $1\ 500$ m./min.) par un premier train de rouleaux situé en dessous de la zone de refroidissement. Après réchauffage dans un dispositif de traitement thermique, le fil est appelé par un second train de rouleaux à une vitesse supérieure V_2 de l'ordre de 3 000 à 4 500 m./min. Cet ensemble réalise directement l'étirage à la suite du filage et permet d'obtenir des fils "plats" à faible allongement résiduel.

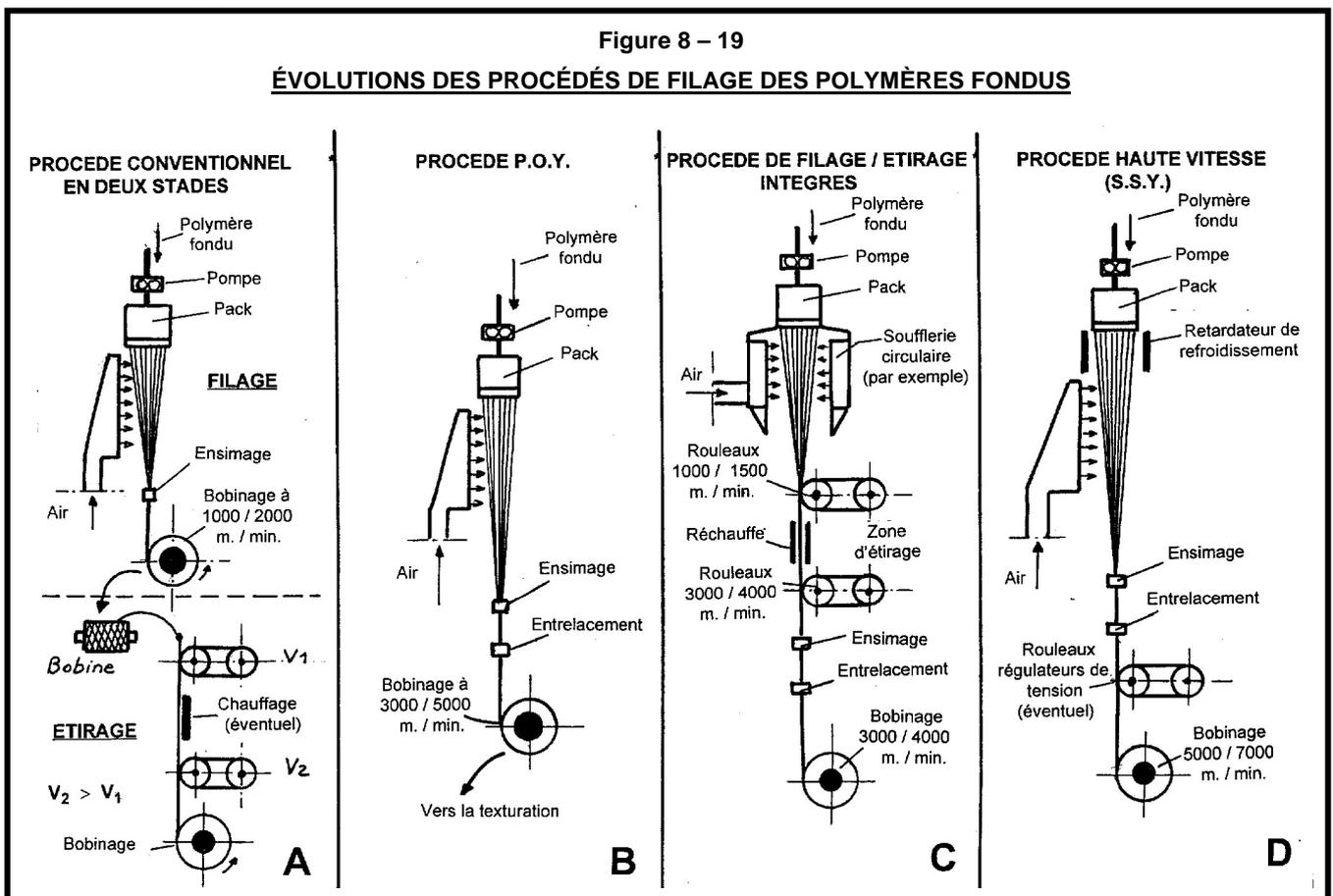
Voir la figure 8-19 C

6 - 3 - FILAGE A HAUTE VITESSE.

Le fil sortant d'une filière est appelé sur la bobine à une vitesse de l'ordre de 5 000 à 7 000 m./min. (300 à 420 km./h.) afin d'obtenir directement, et sans organes intermédiaires, sauf éventuellement un train de rouleaux de contrôle de la tension avant bobinage, des fils complètement étirés dont les propriétés se rapprochent de celles des fils plats.

Voir la figure 8-19 D

Ce procédé est séduisant mais il pose des problèmes technologiques sérieux ainsi que des problèmes de sécurité liés au bruit et aux énergies mises en jeu dans les bobinoirs. Ces problèmes sont en cours de résolution mais les bobinoirs modernes deviennent des machines de plus en plus sophistiquées, et de plus en plus coûteuses, du fait également de l'électronique de commande associée qui permet par exemple de faire varier continûment l'angle de croisure du fil sur la bobine en formation.



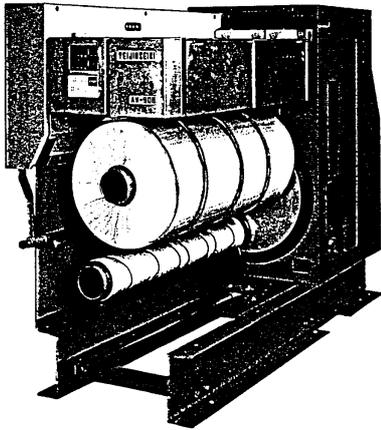
Un autre problème important des bobinoirs à haute vitesse réside dans le système de dépôt du fil sur la bobine. Le système initial de va-et-vient par un guide dit "papillon" devient trop brutal et des systèmes plus complexes doivent être mis en jeu (système BIROTOR de BARMAG par exemple). Dans ces systèmes le fil n'est pas brutalement projeté d'un bout à l'autre de la bobine mais repris plusieurs fois pour passer d'une extrémité à l'autre?

Voir des exemples de bobinoirs sur la figure 8-20

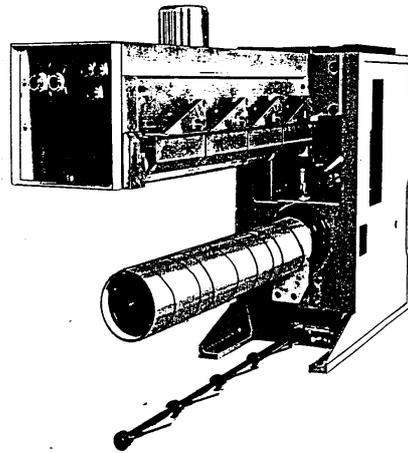
Figure 8 – 20

EXEMPLES DE BOBINOIRS MODERNES POUR FILAGE HAUTE VITESSE

BOBINOIR REVOLVER TEIJIN AW 908 - peut marcher à 6 000 m./ min.



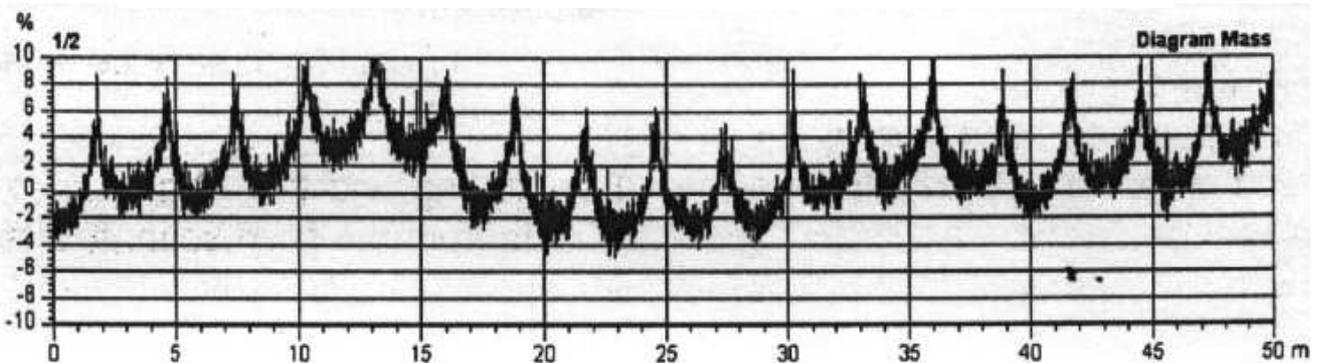
BOBINOIR MONOBROCHE TORAY TW 603 - peut marcher à 6 000 m./ min.



Selon le système de va-et-vient et de dépose du fil adoptés par le constructeur du bobinoir, les retours de fil à chaque bout de bobine peuvent provoquer des irrégularités de titre (et de structure) plus ou moins marquées. Le diagramme représenté sur la figure 8-21 met bien en évidence la variation de masse, avec une périodicité de 3 mètres, d'un fil polyester 86/18 filé à 5 000 m./ min. (type de bobinoir non précisé)

Les difficultés de résolution de ces problèmes ne permettent pas d'envisager aujourd'hui des procédés économiquement viables qui dépasseraient 7 500 m./ min.

Figure 8 – 21 - **IRRÉGULARITE DE TITRE LE LONG D'UN FIL BOBINÉ**



6 - 4 – SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT SIMPLIFIÉ POUR HAUTES VITESSES DE FILAGE.

AKZO NOBEL Faser a breveté en 1995 un système particulièrement simple de refroidissement dit "self suction cooling device" consistant en un tube perforé situé directement sous la filière d'extrusion. C'est le déplacement du faisceau de filaments lui-même à l'intérieur du tube qui "aspire" de l'extérieur du tube l'air nécessaire à son refroidissement. Le système serait auto-stabilisateur : le nombre de casses au filage serait considérablement diminué et la régularité de titre serait améliorée. Le procédé a été industrialisé pour filer du polyester à 7 000 m./ min. (SHSS yarn = Super High Speed Spinning dérivant du projet européen BRITE 1987-1990 entre AKZO - ICI - RHONE POULENC et BARMAG)

Voir la figure 8-22

6 - 5 – ÉTIRAGE A CHAUD SANS ROULEAUX CHAUFFANTS.

EMS INVENTA a breveté en 1996 un système de réchauffage d'un faisceau de filaments avant convergence dans une chambre tubulaire dans laquelle passe le faisceau et dans laquelle on injecte de l'air chaud à contre-courant.

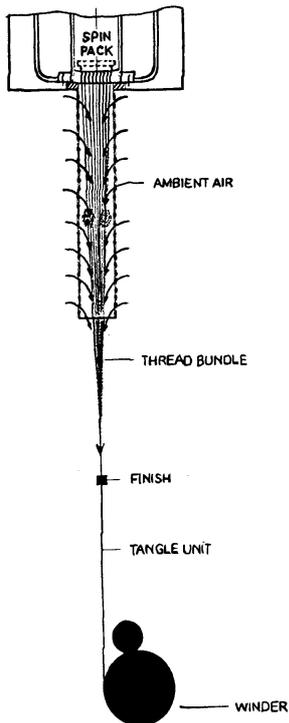
Le système est dénommé **HCS = Hot Stretching Process (ECOFLEX[®])**. L'étirage est beaucoup plus régulier car chaque filament est chauffé de la même façon par rapport au passage d'un fil rassemblé sur un rouleau chauffant où seuls les filaments au contact du rouleau reçoivent un chauffage primaire.

Le niveau des propriétés obtenues est meilleur. De plus le procédé accepterait une large plage de réglages.

Voir la figure 8-23

Figure 8 - 22

PROCÉDÉ AKZO NOBEL FASER DE REFROIDISSEMENT SOUS FILIERE POUR FILAGE HAUTE VITESSE
(Self-suction device)

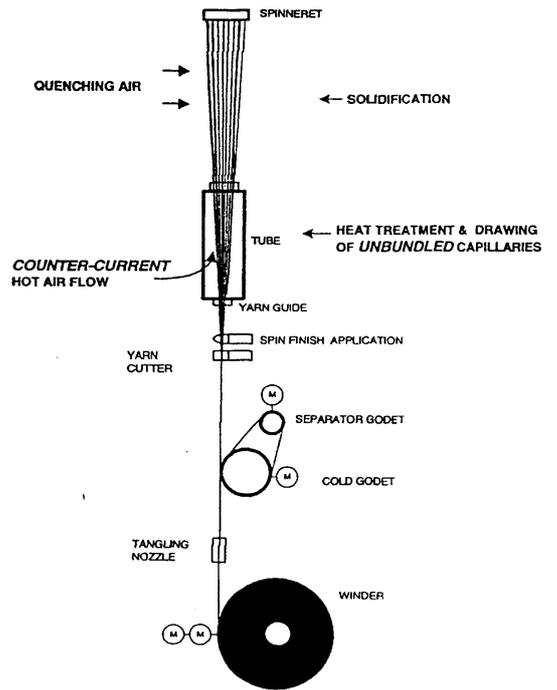


Comparaison des propriétés des fils obtenus par un procédé conventionnel à rouleaux et par le procédé SHSS

Paramètre	Convent.	SHSS
Vitesse de filage (m./min.)	4500	7000
Titre du fil	76 / 34	76 / 34
Ténacité (cN / tex)	44	37
CV sur ténacité (%)	2 - 3	1 - 2
Allongement rupture (%)	30	35
CV sur allongement (%)	5 - 8	2 - 5
Régularité USTER (%)	0,90	0,55
Retrait eau bouillante (%)	5 - 8	2,0 - 2,5
Intensité teinture	bon	excellent

Figure 8 - 23

PROCÉDE DE RECHAUFFAGE EMS INVENTA "HOT CHANNEL STRETCHING" (HCS)
(Pour polyester tous titres)



6 - 6 - MÉTIER DE FILAGE/ÉTIRAGE DÉPLOYÉ EN LONGUEUR.

Ce type de machine, de conception relativement récente (1998), est proposé dans le but d'améliorer l'ergonomie de procédés de filage/étirage avec de multiples composants. Tous les organes tournants sont accessibles sur un même niveau car étalés en longueur. Les métiers de ce type sont essentiellement destinés à la fabrication de fils industriels qui nécessitent un étirage en plusieurs stades.

La figure 8-24 ci-contre montre un tel dispositif.

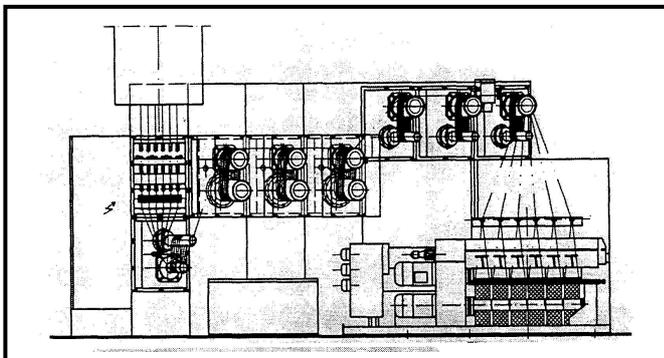
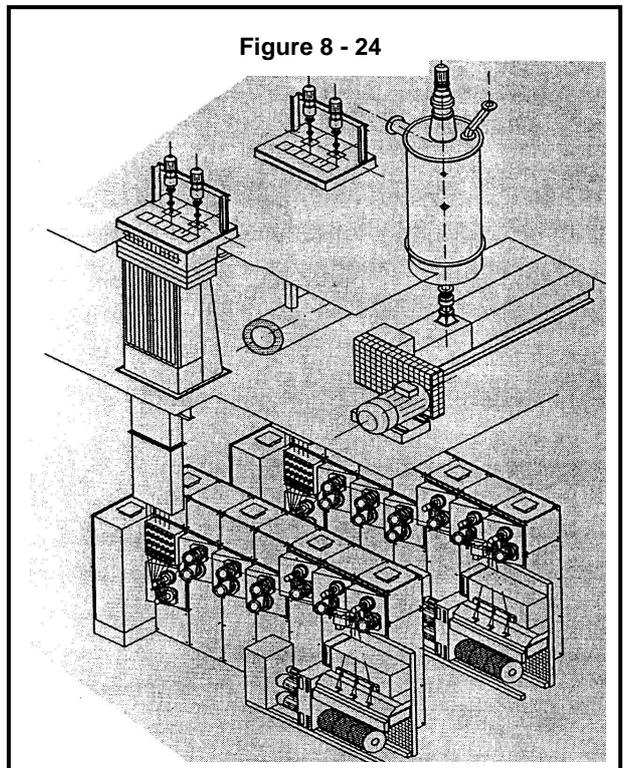


Figure 8 - 24



6 - 7 - ÉTIRAGE-TEXTURATION INTÉGRÉS.

Depuis l'apparition des fils POY, on a cherché à raccourcir le chemin de fabrication aboutissant aux fils texturés en réalisant sur une seule machine l'étirage final et la texturation des fils pré-orientés. Il existe actuellement deux techniques d'étirage-texturation :

- Étirage-texturation séquentiel : le fil est étiré entre deux rouleaux étireurs avant de passer dans les organes classiques de texturation : broche, four,etc.
- Étirage- texturation simultanés : les deux opérations ne sont pas dissociées l'une de l'autre. Elles se font en même temps sur une machine de texturation simple. L'étirage se produit pendant la phase de torsion sous traitement thermique.

6 -8 – ÉTIRAGE RÉALISÉ AU MOMENT DE L'ENCOLLAGE.

Le tissage implique, pour les fils de chaînes, l'utilisation "d'ensouples" qui sont de grosses bobines de fils parallélisés, d'environ un mètre de diamètre et dont la longueur correspond à la largeur du métier à tisser auquel elles sont destinées : 2 à 3 mètres par exemple.

Avant d'être placés sur l'ensouple les fils sont "encollés", c'est à dire qu'ils sont recouverts d'une résine soluble destinée à les protéger des frottements qu'ils subiront pendant l'opération de tissage.

Certains constructeurs de machines d'encollage (KARL MEYER, VAL LESINA) ont eu l'idée de faire précéder leurs machines d'un système de trains d'étirage de façon à pouvoir utiliser directement des fils pré-orientés POY moins chers que les fils plats ou les fils haute vitesse habituellement mis en œuvre.

6 - 9 – FILS POUR TISSAGE SANS ENCOLLAGE.

A l'opposé de la démarche précédente, certains producteurs de fils synthétiques mettent au point et proposent des fils qui ne nécessitent pas d'être encollés avant d'être mis sur ensouples. L'opération d'encollage est en effet lente par nature et coûteuse.

Les fils pour tissage sans encollage sont en général fortement entrelacés et sont recouverts d'un ensimage complexe, protecteur et cohésif, déposé en plusieurs stades au cours du filage-étirage.

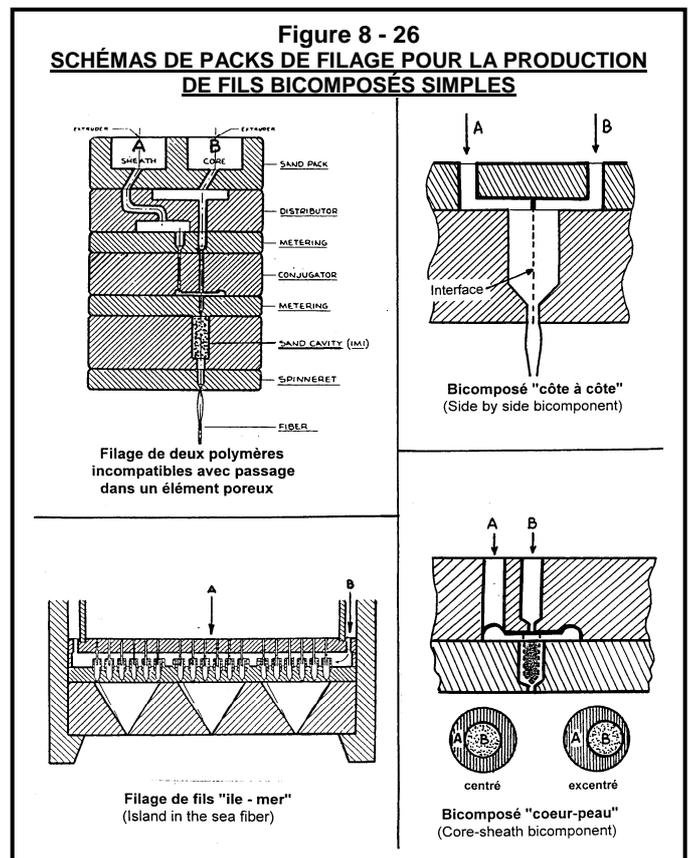
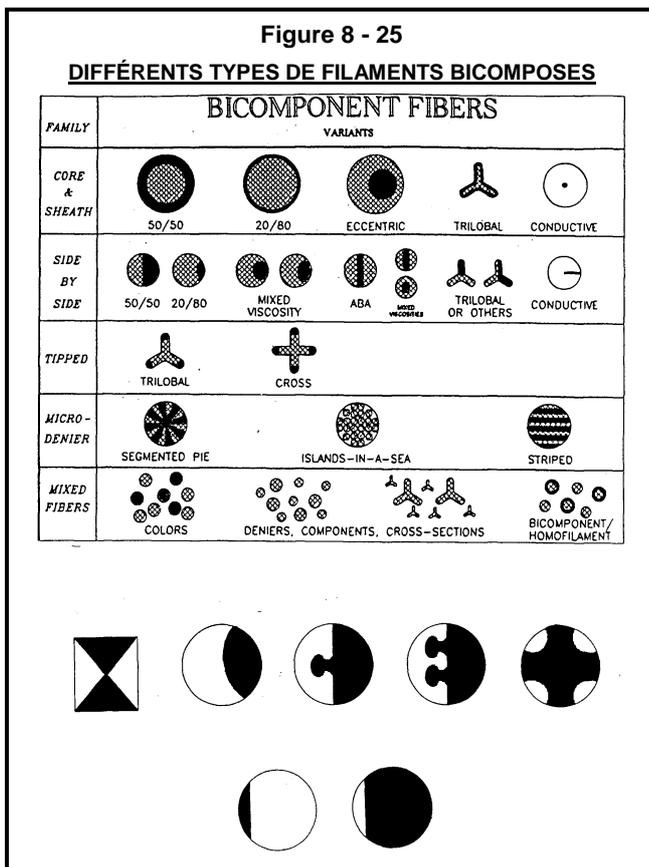
6 - 10 – FRISURE OBTENUE PAR FILS BICOMPOSANTS.

On envoie dans un même trou de filière deux jets de polymères compatibles entre eux mais de propriétés différentes. On obtient des brins dont la section montre la juxtaposition des deux polymères. Par traitement thermique, le fil ondule et frise fortement par effet bilame, du fait des retraités différents des polymères. On peut citer comme exemple d'un des premiers produits de ce type la fibre X 403 lancée par RHONE POULENC FIBRES.au début des années 80.

L'obtention de fils bicomposants exige des technologies de filage et d'extrusion très sophistiquées et bien maîtrisées.

La figure 8 - 25 donne par ailleurs différents types de fils bicomposés qu'il est possible de fabriquer.

La figure 8 - 26 montre quelques géométries de packs de filage permettant d'obtenir des fils bicomposés simples.



Les fabricants mondiaux de produits bicomposés étaient les suivants en 1998 :

Société - Produit	Pays	Société - Produit	Pays	Société - Produit	Pays
Akzo Nobel (NT)	USA	Daiwabo (S)	Japon	Zhouking microfib. (F)	Chine
BASF (C)	USA	Kuraray (S)	Japon	Chengdu microfib. (F)	Chine
Du Pont (S - F)	USA	Teijin (S)	Japon	Jaingsu Textile R.I. (F)	Chine
Fiber Inovation (S)	USA	Toray (S)	Japon	Acelon (F)	Taiwan
Hoechst Celanese (S)	USA	Toyobo (S)	Japon	Far Eastern Text (S- F)	Taiwan
Intercontinent. Pol. (S)	USA	Unitika (S)	Japon	Lea Lea (F)	Taiwan
Solutia (C - S)	USA	Kolon (S - F)	Corée	Nan Ya (S - F)	Taiwan
Wellman Intl (S)	Irlande	Sam Yang (S)	Corée	Shingkong (S - F)	Taiwan
Danaklon (S)	Danem.	Sanylon (S - F)	Corée	Tuntex (S - F)	Taiwan
Chisso (S)	Japon	Sunkyong (F)			

S = Fibre

F = Filaments

NT = Non tissés

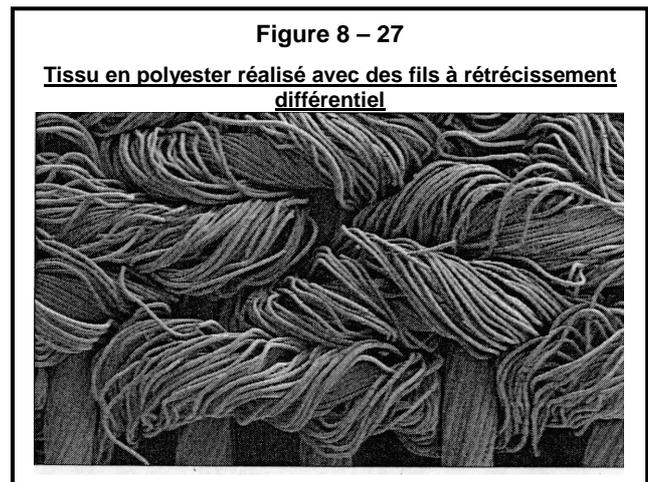
C = Fil conducteur

6 – 11 – FILAGE SIMULTANÉ DE DEUX TYPES DE POLYMÈRES.

On envoie sur la même plaque filière deux types de polymères **A** et **B**. Certains trous sont réservés au polymère **A**, les autres au polymère **B**. En fait le plus souvent il s'agit d'un polymère standard (polyester par exemple) et d'un même polymère modifié de façon à obtenir des propriétés physiques différentes (par copolycondensation par exemple)

La figure 8-27 ci-contre montre un tissu polyester présenté en 2001 à partir de fils à rétrécissement différencié après traitement thermique. On peut même avoir un fil présentant un retrait et l'autre présentant un allongement. On obtient un effet de boucles qui confère au tissu un aspect de fibre naturelle et lui donne du volume.

Plus l'écart de rétrécissement est important, plus le tissu est volumineux. En modifiant en plus d'autres paramètres (titre, section,...) des deux types de fils, on peut obtenir toute une gamme d'effets.

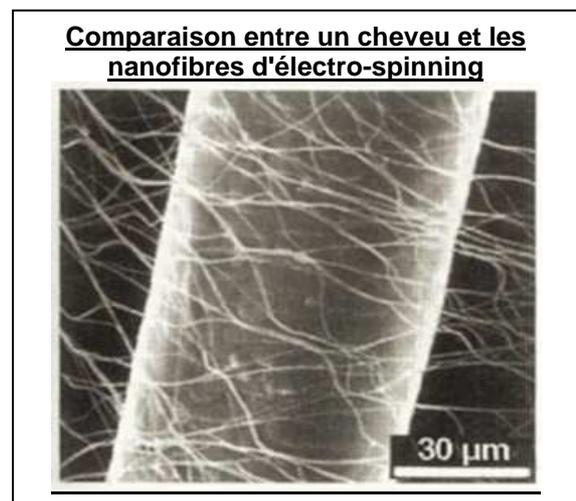
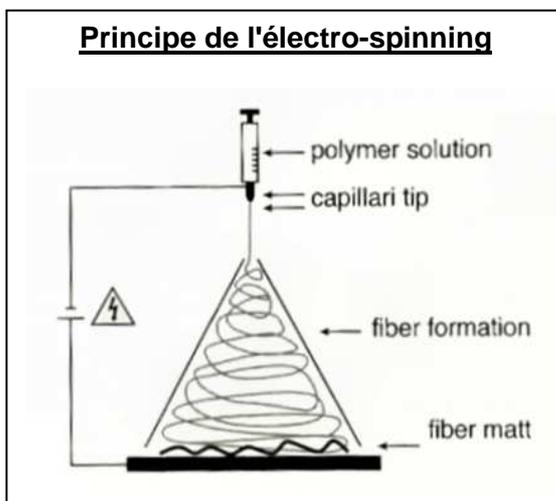


7 – L'ÉLECTRO-SPINNING.

Dans la recherche de techniques permettant de produire facilement des micro-fibres, on a ressorti un vieux brevet de 1934 concernant le filage dans un champ électrique connu sous le nom d'"**electro-spinning**". Cette technique, qui a particulièrement été travaillée par l'Université d'AKRON, permet d'obtenir des fibres de l'ordre de 0,1 à 0,5 µm de diamètre. Basiquement l'electro-spinning consiste à introduire une charge électrostatique dans un flux de polymère fondu en présence d'un champ électrique intense. Il se forme un jet de polymère qui s'éjecte de la buse chargée et qui vient se décharger, sous forme de fibrilles, sur une plaque collectrice située à une certaine distance.

Mécaniquement, l'electro-spinning est assez semblable à la peinture électrostatique, sinon que le fluide ne forme pas de gouttelettes mais des fibrilles du fait de la viscosité et de la cohésion intermacromoléculaire.

En fait, on ne peut pas dire qu'actuellement l'électro-spinning soit une technologie applicable à la fabrication de micro-fibres textiles classiques. Il s'agit plutôt de nanotechnologie pour des usages spéciaux. On signale que la firme US DONALDSON a breveté un nanofibre baptisée EON d'environ 0,25 µm de diamètre et qu'elle produirait, depuis le début de 2002, plus de 10 000 m² de matériau pour la filtration des poussières.



8 - RAPPEL DES TERMINOLOGIES ACTUELLES POUR DÉSIGNER LES FILS.

8-1 – TERMINOLOGIE ANGLO-AMÉRICAINE.

- **L.O.Y.** Low Oriented Yarn - fil très peu orienté obtenu à basse vitesse de filage de l'ordre de 1 000 à 1 500 m./min.
- **M.O.Y.** Mean Oriented Yarn - fil présentant un début d'orientation et obtenu à des vitesses de filage de 2 000 à 3 000 m./ min.
- **P.O.Y.** Partially Oriented Yarn - fil partiellement orienté et cristallisé obtenu entre 3 000 et 5 000 m./ min.
- **F.O.Y.** Fully Oriented Yarn fil complètement orienté et cristallisé, dit aussi fil plat. (Flat Yarn
- **S.S.Y.** Super Speed Yarn fil obtenu à haute vitesse supérieure à 5 000 m./ min.
- **H.S.Y.** High Speed Yarn peuvent parfois présenter les propriétés de FOY.
- **D.T.Y.** Draw Textured Yarn fil texturé fausse torsion
- **A.T.Y.** Air Jet Textured Yarn fil texturé par air (type TASLAN)
- **B.C.F.** Bulked Continuous Filament fil voluminé pour tapis.

8-2 – TERMINOLOGIE FRANÇAISE (procédés)

- **F.E.I.** Filage Etirage Intégré - procédé dans lequel l'étirage suit le filage après réchauffe du fil.
- **E.S.F.** Etirage Sous Filière - procédé d'étirage intégré avec des rouleaux sur des fils incomplètement refroidis.
- **F.E.T.I.** Filage Etirage Texturation Intégrés - pas de mise au point industrielle.
- **F.S.B.** Fil Simili Brochette - fil texturé par friction mais qui présente les mêmes propriétés qu'un fil texturé par le procédé brochette.
- **F.A.F.** Fil à Aspect Fibre - Fil mixte texturé de telle façon qu'on obtient plus économiquement un aspect fibreux après tissage.

9 - CONFORMATION DES POLYMÈRES NON FUSIBLES. (Exemple du polyacrylonitrile)

On notera que la plus grande partie du tonnage produit en polyacrylonitrile (PAN) est conformé en fibre. En effet le mode de filage se prête mal à l'obtention économique de fils continus fins. Seule la technologie fibre sera donc examinée.

9-1 - PRÉPARATION D'UN COLLODION.

Cette préparation n'est évidemment pas nécessaire pour des procédés de polymérisation qui opèrent directement en milieu solvant. Par contre à partir d'un polymère en poudre on réalise un collodion d'une concentration comprise entre 15 et 30 % en poids :

- Soit dans un solvant organique : DMF, DMSO, DMAC,
- Soit dans une solution aqueuse de sel : ZnCl₂, NaSCN,
- Soit dans une solution aqueuse d'acide nitrique.

Dans tous les cas on filtre pour éliminer les gels et les impuretés en suspension. On obtient un collodion entre 50 et 100°C et à comportement non newtonien, qui se gélifie de façon réversible par refroidissement.

9-2 - FILAGE.

Le filage peut être réalisé de deux façons très différentes :

- Filage à sec. Cette méthode convient pour les collodions en solvant organique. Le collodion est envoyé dans une filière comportant un très grand nombre de trous de l'ordre du millier et d'un diamètre de l'ordre du dixième de millimètre. La température de l'ambiance à la sortie des trous de filière est maintenue à une valeur telle que le solvant s'évapore. L'air chargé de vapeurs de solvant est refroidi de façon à condenser ce solvant qui est ensuite récupéré. La phase gazeuse restante est réchauffée pour être réinjectée à la base de la filière. La condensation des vapeurs de solvant doit être très poussée pour éviter les problèmes d'environnement.

Les fils de PAN secs sont rassemblés en une mèche à la base de la filière .

Voir la figure **8-28**

- Filage à l'humide. C'est le procédé le plus utilisé. Le collodion est envoyé dans une filière très différente de celles qui sont mises en œuvre pour le filage des polymères fondus :

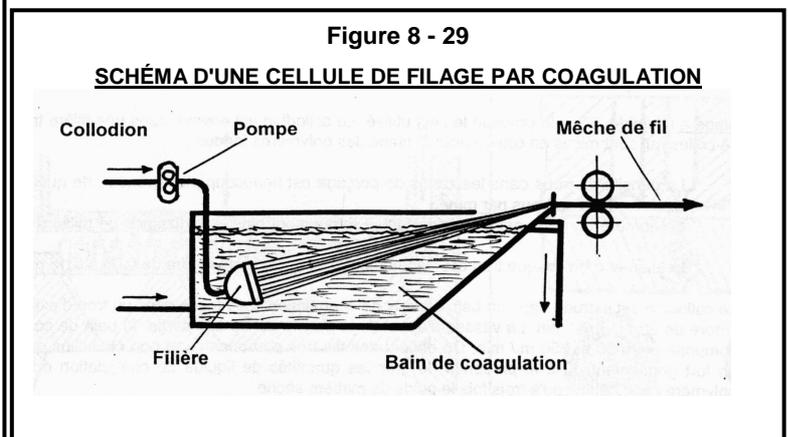
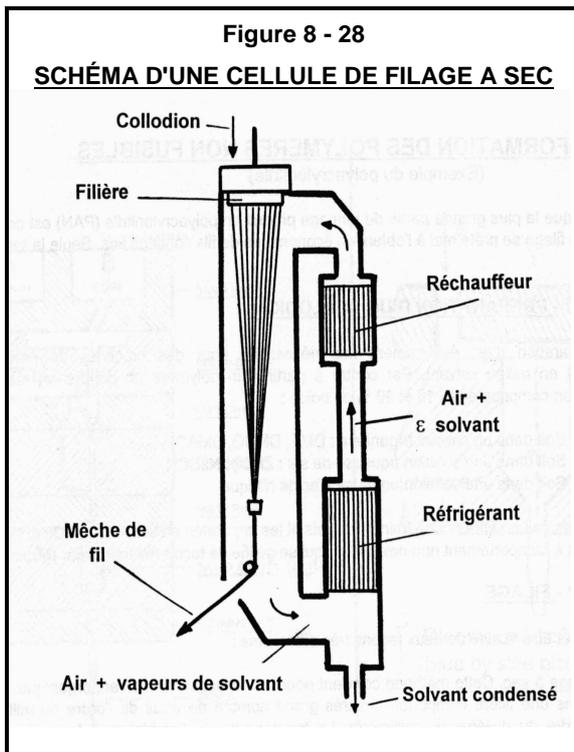
- * La densité de trous dans les zones de perçage est beaucoup plus grande : de quelques trous à une vingtaine de trous par mm^2 .
- * Le nombre de trous est plus important. Typiquement plusieurs dizaines de milliers de trous par filière.
- * Le diamètre de chaque trou est évidemment plus faible et de l'ordre de 0,05 à 0,15 mm.

Le collodion est extrudé dans un bain aqueux de coagulation. La vitesse dans un trou d'extrusion est de l'ordre de 20 à 40 m./ min. La vitesse d'appel de la mèche de fils à la sortie du bain de coagulation est comprise entre 50 et 250 m./ min. On obtient des fils très peu orientés et non cristallins qui présentent un fort gonflement dû à la présence de grandes quantités de liquide de coagulation occlus dans le polymère coagulé : jusqu'à trois fois le poids de matière sèche

Un schéma de cellule de coagulation est donné à la figure 8 - 29.

9 - 3 - ESSORAGE - LAVAGE - ETIRAGE - RELAXATION - ENSIMAGE - SÉCHAGE.

Il existe un certain nombre de variantes de procédés dans lesquels ces opérations peuvent être réalisées dans des ordres différents. De façon très générale on peut dire :



- L'étirage peut être réalisé en plusieurs étapes : d'abord à froid, dans l'air, sur les fils gonflés contenant du liquide de coagulation, puis à chaud au dessus de la T_g , soit entre 80 et 100°C, sur le fil sec. Le taux total d'étirage est très variable et peut être compris entre 4 et 15. Il ne se produit pas de striction.

- Avec l'opération d'étirage c'est surtout le séchage qui participe à la formation de la structure finale du fil : orientation et développement de la "cristallinité". La notion de cristallinité est d'ailleurs moins bien définie sur les polymères coagulés que sur les produits conformés par voie fondue.

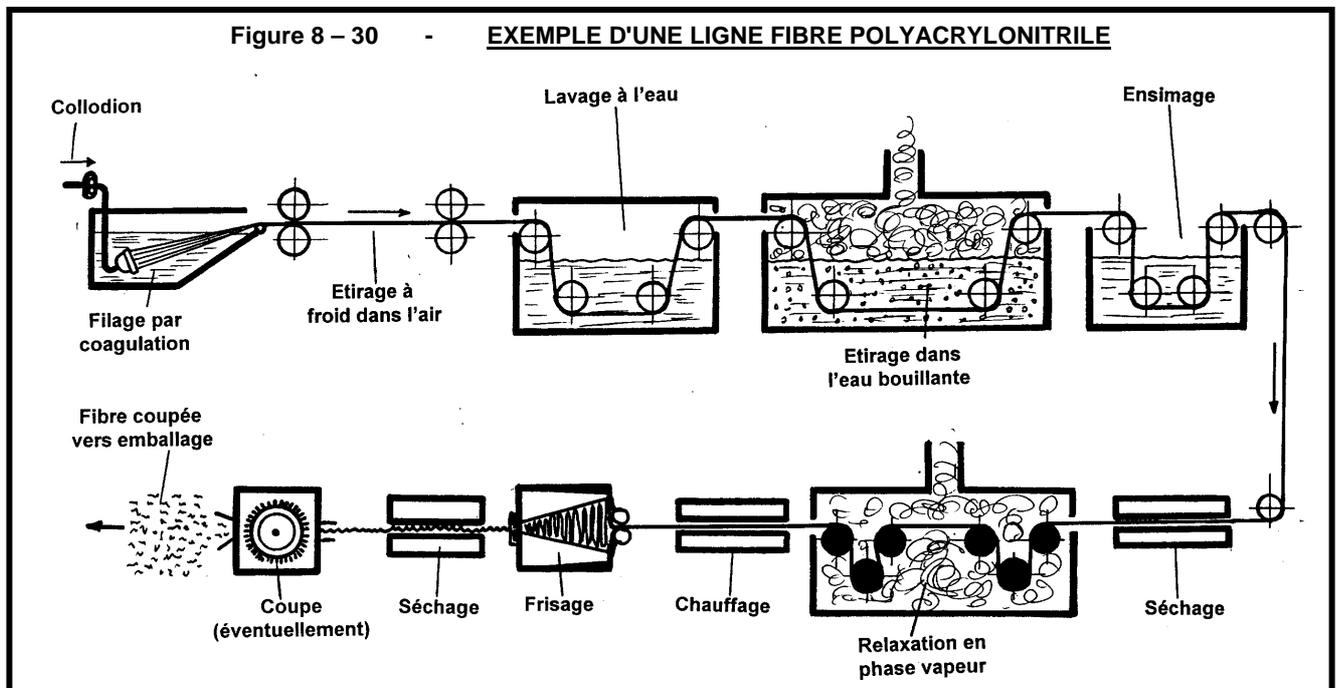
- De la même façon que pour les produits conformés à partir de polymères fondus, un traitement thermique avec relaxation contribue à la désorientation des phases amorphes.

9 - 4 - FRISAGE ET COUPE.

Les techniques utilisées sont identiques à celles déjà vues pour les polyesters et polyamides par exemple. On notera cependant que l'obtention des fibres est le plus souvent réalisée par l'opération de "craquage" qui consiste à étirer une mèche de fil de longueur donnée jusqu'à la rupture totale. On obtient ainsi des fibres dont les longueurs unitaires sont distribuées autour d'une valeur moyenne.

La figure 8-30 donne un exemple de procédé fibre. On remarquera l'intégration complète depuis le filage jusqu'à la coupe.

Figure 8 - 30 - EXEMPLE D'UNE LIGNE FIBRE POLYACRYLONITRILE



On notera enfin pour terminer que la fabrication de fils bicomposés, avec deux types de polymères côte à côte dans un filament, peut, là aussi, permettre d'éviter l'opération du frisage. La frisure se révèle en effet spontanément au moment du craquage.

9 - 5 - REMARQUE : MISE AU POINT D'UN PROCÉDÉ DE FILAGE A L'ÉTAT FONDU DU P.A.N.

Il a été récemment annoncé (IFJ - Avril 1998) la mise au point par BP Chemicals d'un polyacrylonitrile semi-cristallin spécial, préparé selon des techniques de polymérisation contrôlée, avec une stabilité thermique très améliorée qui permettrait une conformation à l'état fondu.

Cette famille de polymères à structure très régulière, nommée **Amlon**, comprend également les copolymères avec l'**acrylate de méthyle** et l'**acétate de vinyle**.

Avec la mise au point d'un filage à l'état fondu (vitesse de 3 500 m./ min citée) le domaine des fils continus pourrait s'ouvrir aux polyacrylonitriles ainsi que des applications en non-tissés et en bicomposés.

9 - 6 - FILAGE DE L'ALCOOL POLYVINYLIQUE (PVA)

Le collodion de PVA, obtenu par dissolution dans l'eau chaude, est filtré puis extrudé dans un bain coagulant aqueux contenant du sulfate de sodium. Ce bain déshydrate la solution filée et la transforme en fibre par coagulation. La fibre fabriquée par ce procédé reste soluble dans l'eau et un traitement complémentaire est nécessaire. Il consiste à chauffer et à acétyler les fibres pour leur donner une certaine résistance à l'humidité. Pour les fils continus un simple traitement thermique peut suffire.

Le PVA peut également se filer en voie sèche par un nouveau procédé mis au point par KURARAY. Il s'agit de filage par gel refroidi en milieu solvant (solvant wet cooled gel spinning). La solution de PVA dans un solvant organique est immédiatement refroidie après extrusion dans un solvant de solidification. La solution se transforme en un gel à structure stable qui, après élimination du solvant, donne une fibre cristalline et très orientée. La ténacité peut atteindre 140 cN./tex (**Kuralon K-II**)

10 - EXEMPLES DES MODIFICATIONS POSSIBLES D'UN HOMOPOLYMÈRE POUR L'OBTENTION D'UN PRODUIT TEXTILE

La figure 8-31 donne des exemples, basés sur le polyester PET, des multiples possibilités de modifications qui peuvent conduire à des produits textiles de propriétés différentes.

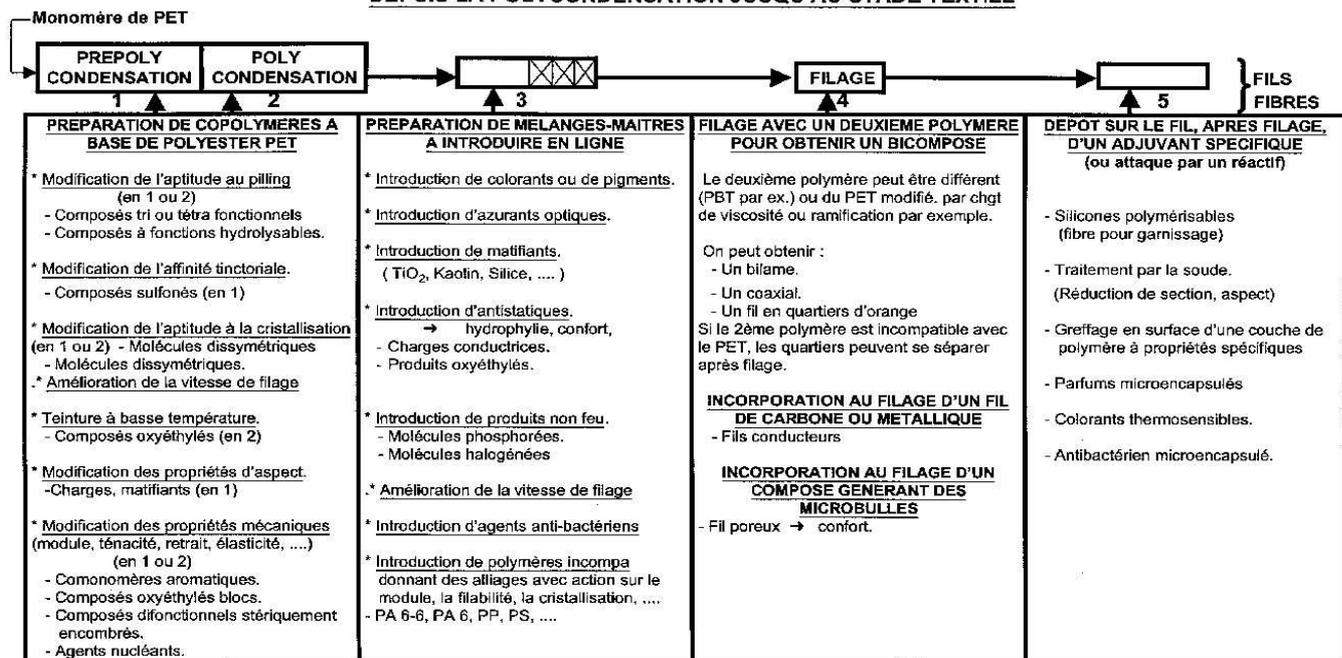
Les modifications peuvent se faire à cinq niveaux :

- Au début des réactions d'élaboration du polymère.
- Au moment de la polycondensation qui conduit au polymère.
- Par incorporation d'adjuvants dans le polymère final.
- Au moment du filage.
- Après le filage.

Tous ces types de modifications, avec en plus les modifications des sections de filage, constituent un champ de développement pour l'obtention de nouvelles propriétés dans l'avenir.

Figure 8 - 31

EXEMPLES DE POSSIBILITES DE MODIFICATION D'UN HOMOPOLYMERE POLYESTER DEPUIS LA POLYCONDENSATION JUSQU'AU STADE TEXTILE



11 - LE POLYPROPYLENE FACE AUX AUTRES FIBRES SYNTHÉTIQUES.

Avec les polyesters le **polypropylène** est toujours en croissance dans le domaine des fibres synthétiques. En 1996 il a été produit dans le monde 4 845 000 tonnes de polyoléfinés dites "textiles", constituées à 90 % par du PP soit :

- 1 320 000 t en fibre.
- 1 725 000 t. en fil textile, fil tapis et non tissés.
- 1800 000 t. en laminette, rubans et film splitté.

Les principales utilisations sont dans le textile automobile, le tapis et la confection de sacs pour transport de marchandises.

Par ailleurs la figure 8-32 donne l'évolution de la consommation en fils et en fibre pour l'Europe Occidentale depuis 1970. En ce qui concerne le monde, trois zones ou pays sont prépondérants dans la production de PP textile. Ce sont l'Europe de l'Ouest, les USA et la Chine En l'an 2000 on a les capacités de production suivantes (source : Fiber Organon – June 1999)

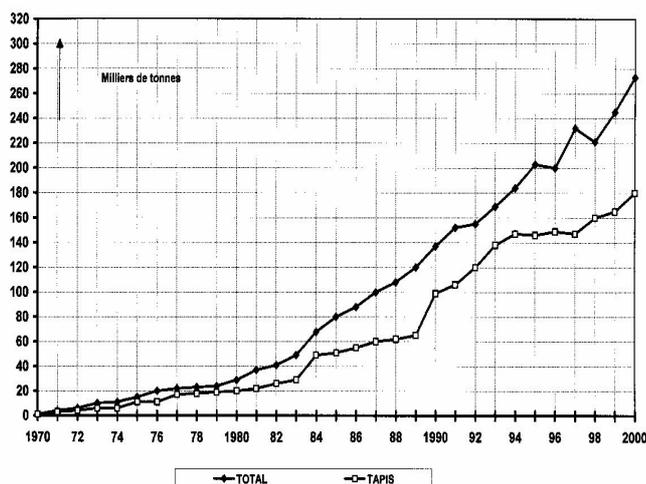
Milliers de tonnes	FILS	FIBRES	Films/Rubans
Europe de l'Ouest	580	575	412
USA	835	378	420
Chine	460	150	420
Total monde	2 661	1 431	2 190

Figure 8 - 32

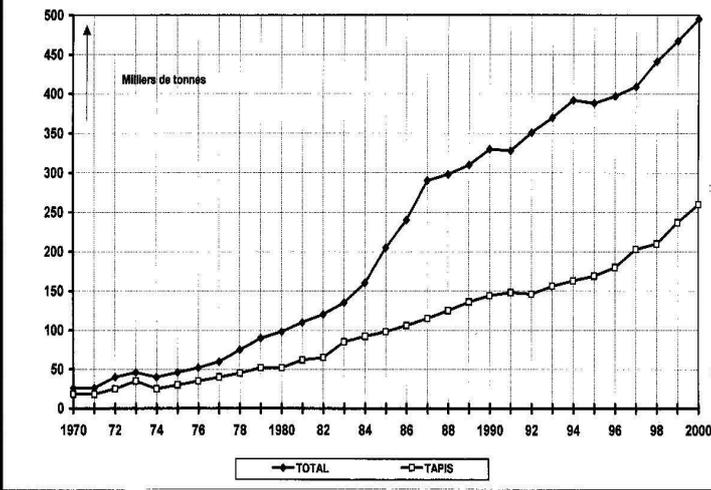
CONSOMMATION DE POLYPROPYLENE TEXTILE EN EUROPE OCCIDENTALE DEPUIS 1970

Source : PCI et Fiber Organon pour les prévisions 1999 - 2000

A - FIL PP



B - FIBRE ET FILE DE FIBRE PP

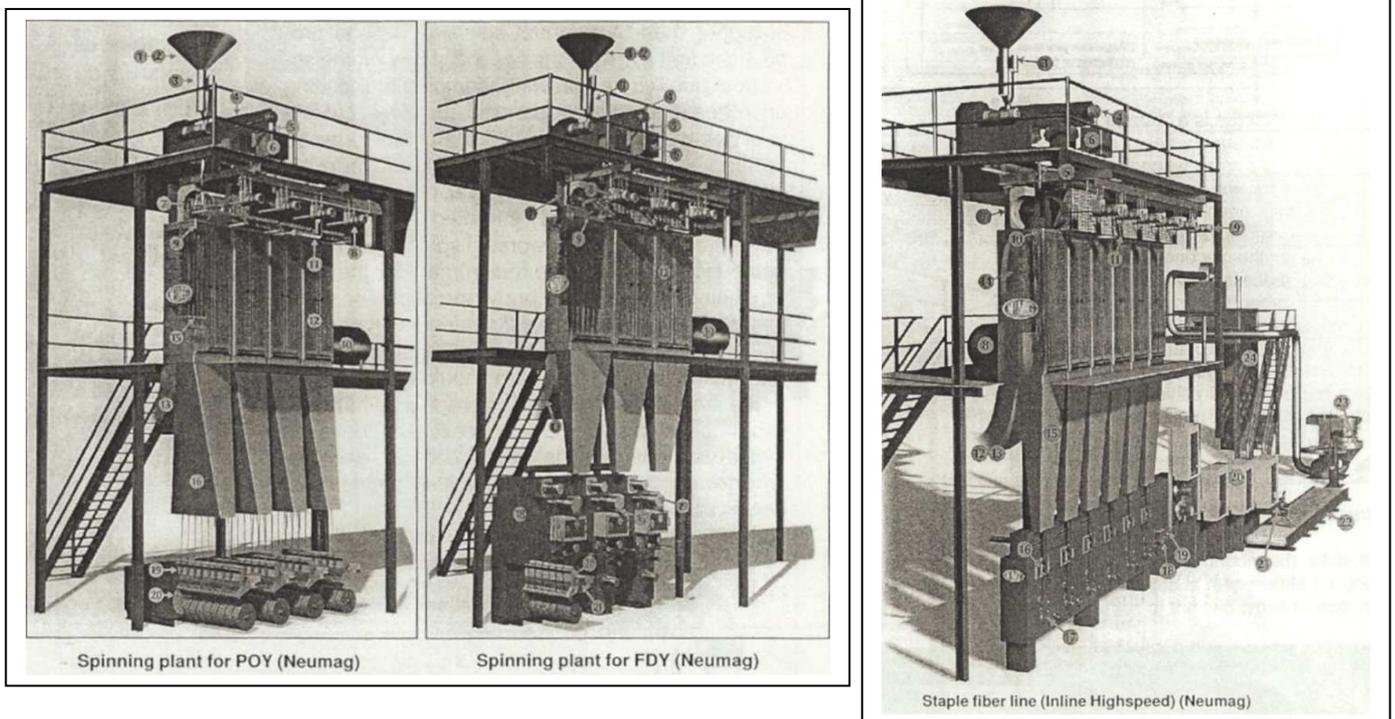


On aurait en fait la progression suivante des capacités mondiales :

1990 : 2,6 millions de tonnes - 2000 : 3,9 millions de t. - 2007 : 6,4 millions de t. - 2010 : 8,7 millions de t.

On constate une progression continue depuis une vingtaine d'années

MÉTIERS INDUSTRIELS DE FILAGE DU POLYPROPYLÈNE



Le polypropylène présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients face aux autres fibres synthétiques.

- Avantages.

- * Prix plus bas que celui des autres fibres synthétiques.
- * Faible densité par rapport aux autres fibres synthétiques. Un kg. de fibre polypropylène présente le même pouvoir couvrant que 1,65 kg. de coton, 1,50 kg. de polyester et 1,30 kg. d'acrylique.
- * Toucher très doux en titres fins (Ce qui donne par exemple un bon confort pour les sous-vêtements)
- * Bonne ténacité.
- * Bonne résistance aux agents chimiques.
- * Bonne retenue de la chaleur.
- * Faiblement électrostatique.
- * Assez facilement recyclable.
- * Possibilité de réaliser un procédé fibre en un seul stade depuis le filage jusqu'à la mise en balle (intégration filage/étrirage/relaxation/frisage/coupe/séchage/emballage)

- Inconvénients.

- * Polymère très visco-élastique à l'état fondu et sensible à la draw résonance au filage. Ces problèmes sont maintenant industriellement résolus sur les installations modernes.
- * Bas point de fusion.
- * Faible élasticité en texturé.
- * Sensible au boulochage.
- * Faible stabilité aux U.V.
- * Ne contient pas de groupements accepteurs de colorants.
- * Insensible à l'eau ce qui est parfois présenté comme un avantage par les promoteurs du PP.
- * Retient les huiles et les graisses.
- * S'allie mal avec les fibres naturelles telles que le coton ou la laine.

Cette série de désavantages a donné lieu à des travaux intensifs depuis de nombreuses années pour y apporter des solutions.

11 - 1 - FILAGE.

L'aptitude à la draw résonance est fortement atténuée par une révision complète des conditions du filage à l'état fondu :

- Réduction de la largeur de la distribution moléculaire.
- Filage au dessus de 250 °C pour un polymère dont le point de fusion est d'environ 165 °C. On utilise des stabilisants pour réduire les dégradations thermiques.
- Position de filage de grande hauteur avec système de refroidissement amélioré.
- Filage à des vitesses plus faibles que pour les polyamides et les polyesters. On a par exemple :

- PP_POY : renvidage entre 1 500 et 3 000 m./ min pour des filaments de 2 à 5 dtex ou des microfilaments de 0,35 à 1,0 dtex. La ténacité se situe entre 15 et 30 cN/tex.
- PP_FOY : renvidage entre 3 800 et 4 500 m./ min pour des brins de 2 à 11 dtex. La ténacité se situe entre 30 et 50 cN/tex.
- On peut obtenir des fils haute ténacité entre 50 et 73 cN/tex sans étirage complémentaire.

11 - 2 - COLORATION / TEINTURE.

La seule méthode pratiquement utilisée pour obtenir du polypropylène coloré est l'introduction de pigments organiques ou minéraux dispersés dans la masse du polymère :

- Soit par refusion de lots de polymère et mélange, ce qui ne permet pas d'obtenir une large gamme de coloris si on ne veut pas avoir des stocks trop importants à gérer. De plus les coloris obtenus par pigmentation sont moins brillants et moins chatoyants que ceux résultant de l'utilisation de colorants de teinture organiques.
- Soit par introduction en ligne des pigment sous forme de master-batch juste avant le filage, ce qui présente l'inconvénient de générer des déchets au moment du changement de couleur, les écoulements n'étant pas "piston".

Des technologies élaborées permettent aujourd'hui de réduire au minimum ces temps d'intercampagne.

Une autre solution, maintenant très utilisée pour les fils tapis "space-dyed" consiste à introduire dans le polymère un organo-complexe de Ni, mais des problèmes apparaissent au filage et le nombre de colorants possibles reste restreint. Des travaux sont également menés sur la teinture des PP chlorés et sur la teinture de mélanges avec le PET par des colorants dispersés.

Une autre approche a été récemment proposée (1997 - en cours de dépôt de brevet) basée sur l'introduction de 5 à 10 % d'un additif polymère hydrophobe et contenant des sites teignables. Nous n'avons aucun détail pour le moment sur la nature des additifs polymères.

11 - 3 - BOULOCHAGE.

Une amélioration est obtenue avec un copolymère incluant un peu de polyéthylène. Une autre solution consiste à utiliser uniquement des fils continus et non des filés de fibre.

11 - 4 - TENUE AUX U.V.

La recherche de stabilisants a permis d'obtenir aujourd'hui des résistances acceptables.

11 - 5 - HYDROPHOBIE.

L'hydrophobie des fibres a longtemps posé le problème de dépôt d'ensimages en émulsion. Cette question est maintenant à peu près résolue.

Le caractère hydrophobe est présenté comme un avantage car il permet de "tenir le corps au sec" dans le cas des sous-vêtements et des vêtements de sport, car un effet de mèche important permet le transfert de la sueur de l'intérieur vers l'extérieur. On s'oriente d'ailleurs dans certains cas vers des tissus composites dont la couche externe est réalisée avec une fibre telle que le coton qui facilite le départ de l'humidité. Cette solution est aussi valable pour les tricots.

Le polypropylène, que l'on trouve dans pratiquement toute la gamme des titres, connaît un emploi majoritaire dans les tapis et revêtements de sols en général de bas de gamme mais meilleur marché que les produits en polyamides ou en laine. Par ailleurs il est utilisé pour la confection des sous-vêtements chauds, de vêtements pour climat froid, de vêtements de sport, de jeans et de tissus anti-microbiens

A ce jour les tentatives de pénétration du marché des bas et collants ne connaissent pas un grand succès. Il faut également signaler le très gros débouché constitué par les sacs et emballages réalisés par tissage de rubans de laminettes (petits rubans, généralement colorés, servant également par exemple à la fermeture des emballages plastiques tels que les paquets de cigarettes).

12 – PRODUCTEURS EUROPÉENS DE FILS ET FIBRES SYNTHÉTIQUES.

La figure 8-33 ci-dessous indique l'ensemble des producteurs de fils et fibres synthétiques de toute nature pour l'Europe de l'Ouest en 1998.

Figure 8 – 33 - **PRODUCTEURS 1998 EN EUROPE DE L'OUEST**

Source : L'industrie Textile – No 1301 – septembre 1998

QUI PRODUIT QUOI ?	Polyamide	Polyester	Acrylique	Chlorofibre	Vitrose	Lyocell	Aérotate	Elasthanne	Observations	Groupe
ALLIED SIGNALS (Allemagne)	F									
AQUAFIL (Italie)		F								
BAYER FASER (Allemagne)			D					F		BAYER
BEMBERG (Italie)	F									
BRILEN (Espagne)		F								SAMCA
CATALANA DE POLIMERS (Espagne)		D								SEDA
CELANESE (Belgique)							D	F	+ Triacétate	HOECHST
CELLATEX (France)					F					GLANZSTOFF AUSTRIA
COURTAULDS plc (Gde-Bretagne)			D			D				AKZO NOBEL
DUPONT DE NEMOURS (Suisse)	D	F	D	F				F		
EMS-CHEMIE (Suisse)	D									
ENKA (Allemagne)					F	F			Lyocell (usine pilote)	AKZO NOBEL
FABELTA NINOVE (Belgique)					F					BERRY
FILANDA (Italie)		F								SINTERAMA - TESPIANA
FILLATICE (Italie)								F		
FISIPE (Portugal)			D		D					
GLANZSTOFF AUSTRIA (Autriche)					F					
INACSA (Espagne)							F			
INQUITEX (Espagne)	D	F	D							
KELHEIM (Allemagne)			D							
KORTEKS (Turquie)			F							ZORLU
KREOPOLYTEX (Italie)		D								
KUAGTEXTIL (Allemagne)		F								DEGGENDORF - AKZO
LENZING (Autriche)					D	D			+ Modal	
MARKISCHE FASER (Allemagne)		D								
MIOGLIO (Italie)		F								
MONTEFIBRE (Italie)		D	F	D						
NOVACETA GROUP (Italie)							F			SNIA - AKZO
NUOVA RAYON ITALIA (Italie)					F					SNIA
NUREL (Espagne)	F	D	F							
NYLSTAR (Italie)	F									RHODIA - SNIA
POLISEDA (Espagne)	F	F								SEDA
RHODIA PERFORMANCE FIBRES (France)	D	F								RHONE POULENC
RHOVYL (France)				D	F					
SASA (Turquie)		D	F							
SATERI (Finlande)					D					
SIFAS (Turquie)	F									
SETILA (France)		F								SWORDDWORD (Gde-Bretagne)
SNIA RAYON (Italie)					F					SNIA
SNIACE (Espagne)	F				D					
SVENSKA RAYON (Suède)					D					
TERGAL FIBRES (France)		D								RHODIA / RHONE POULENC
TEXPROTRE (Italie)	F									RADICI
TEXTILE PRODUKT (Italie)	D	F								RADICI
TREVIRA (Allemagne)		D	F							HOESCHT / MULTIKARSA
UNIFI EUR (Gde-Bretagne)			F							
VALESINA (Italie)			F							RADICI
VISCOEDA BARCELONA (Espagne)					F					SEDA
WELLMAN (Irlande)	D	D								
YALOVA (Turquie)			D							

◊ Membres du CIRFS

F = Fils continus multifilaments · D = Fibres discontinues

ANNEXE UN

COMPLÉMENTS SUR LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT DES FILAMENTS SOUS FILIÈRE

(Filage à partir de polymère fondu)

Les fibres à partir de produits fondus sont apparues vers la fin des années 30' avec l'introduction des fibres de verre et du nylon 6-6. Afin de refroidir le matériau extrudé au sortir de la filière, un système fut conçu pour distribuer continûment un courant d'air au travers du faisceau de filaments jusqu'à la solidification de ceux-ci. C'est encore aujourd'hui le principe de base qui est utilisé pour la production des fibres synthétiques.

1 - LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT A L'AIR.

(en anglais "quench cabinet" ou "quenching box")

Les systèmes les plus simples et les plus utilisés consistent en une longue boîte verticale, traversée par le faisceau de filaments, et dans laquelle on envoie l'air de refroidissement. L'air arrive par un côté ou par le bas de la boîte. A chaque boîte correspond en général de une à deux filières. L'air est filtré et amené par une centrale de conditionnement à une température et à un degré d'humidité précis : par exemple 21°C et HR 70%. Il existe classiquement quatre façons d'envoyer l'air sur le faisceau de filaments à refroidir

- Soufflage transversal. (Crossflow)
- Soufflage vers l'extérieur. (Outflow)
- Soufflage vers l'intérieur ou soufflage circulaire (Inflow)
- Soufflage statique.

1 – 1 – Le soufflage transversal.

C'est le premier type de système qui a été industrialisé. Un grand nombre de ces systèmes sont apparus à partir de 1950 présentés par Du PONT sous le nom de type 9b pour le filage du PA 6-6. L'air, conditionné, arrive à chaque boîte par une tuyauterie unique pour un métier de filage dans laquelle l'air circule à basse vitesse. Son débit est contrôlé par des sondes à diaphragme. La quantité d'air, la vitesse et le profil de vitesse sont contrôlés par un ensemble de grilles situées sur une face de la boîte. Ces grilles créent une perte de charge qui permet d'égaliser les flux. Si au lieu d'un profil de vitesse plat sur toute la hauteur de la surface grillagée, on désire un profil bombé ou parabolique par exemple, on ajuste les dimensions des pores des grillages dans les zones désirées

Un schéma d'une boîte de soufflage transversal est donné à la figure **8-34 A**

Un des inconvénients majeurs de ce type de soufflage est la non homogénéité du refroidissement. En effet les premiers filaments que rencontre l'air sont mieux refroidis que ceux qui se trouvent en arrière du faisceau que traverse l'air. On peut ainsi obtenir des différences de structure entre les filaments d'un faisceau. On atténue cet effet en distribuant les trous d'une filière de telle façon que la traversée soit plus facile.

1 - 2 – Le soufflage vers l'extérieur.

Ce système a été conçu suite à l'évolution du filage impliquant un nombre de plus en plus grand de filaments, particulièrement dans l'industrie des fibres courtes. On utilise alors une filière de grand diamètre avec des trous disposés en couronnes. L'air est soufflé au travers d'un media poreux inséré dans la partie axiale. Ce media a typiquement une longueur de 25 à 50 cm. et il est constitué le plus souvent de métal fritté. La quantité d'air envoyé sur chaque position de filage est contrôlée par un débitmètre.

Un tel système est représenté à la figure **8-34 B**

La société d'ingénierie INVENTA-FISHER commercialise un ensemble dans lequel on trouve en dessous de la cartouche de soufflage, un cône dirigé vers le bas. L'émulsion d'ensimage est amenée sur le plus grand diamètre de ce cône sur lequel glisse la nappe circulaire des filaments refroidis. La nappe est ensuite séparée en deux ou plusieurs fils pour être bobinée.

Le soufflage vers l'extérieur est moins cher que le soufflage transversal mais l'ergonomie au lancement et à l'arrêt des positions de filage est plus délicate.

1 - 3 – Le soufflage vers l'intérieur.

Ce système fonctionne de façon inverse du précédent. Il est utilisable dans un grand nombre de situations (titre et nombre de filaments). Le problème à résoudre est d'assurer une bonne homogénéité des vitesses de soufflage sur toute la circonférence interne de la boîte. Comme la boîte dispose de une ou deux arrivées d'air, elle doit comporter des dispositifs d'égalisation internes (grilles et/ou carton perforé)

Un schéma de dispositif de soufflage vers l'extérieur est donné à la figure **8-34 C**

1 - 4 – Système statique.

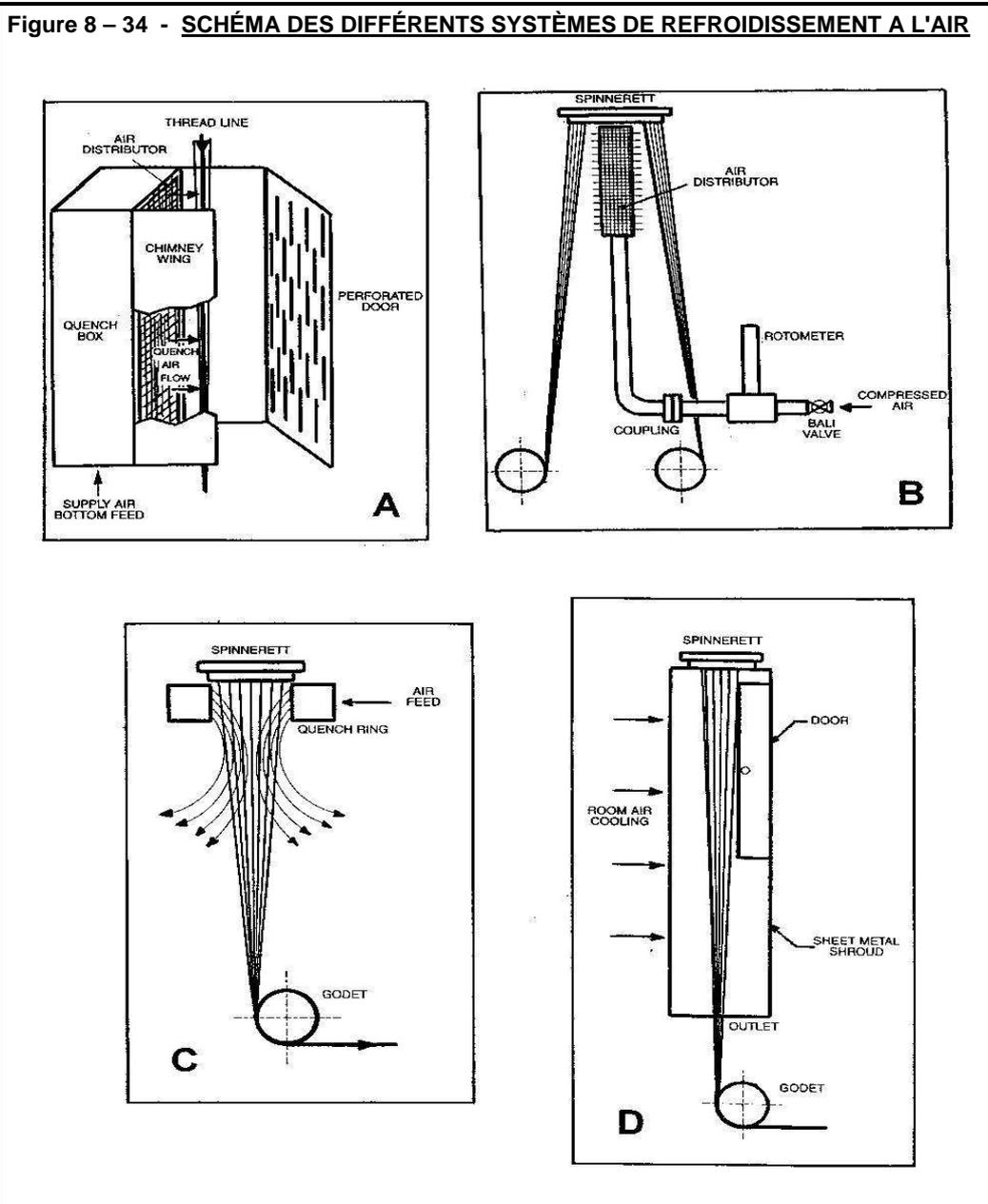
Ce système est le plus simple et il est utilisé pour la préparation des fibres de carbone et de céramique. Son emploi est beaucoup plus récent pour le filage des fibres synthétiques, particulièrement à haute vitesse comme vu au cours de ce chapitre pour le procédé AKZO. L'air de refroidissement provient de l'extérieur du métier et est "aspiré" par le faisceau qui prend de la vitesse. Un gros inconvénient réside dans les variations climatiques qui modifient les caractéristiques de l'air de l'atelier, à moins de conditionner l'atelier tout entier.

Un schéma de dispositif de soufflage statique est donné à la figure 8-34 D

2 – AUTRES SYSTÈMES

A titre indicatif on peut signaler les systèmes de refroidissement par pulvérisation d'eau ou d'eau contenant un additif en solution, particulièrement utilisé pour le filage de fibres de verre ou de fibres métalliques. On signale aussi récemment un procédé de préparation de non tissé synthétique par melt blown avec un refroidissement par pulvérisation d'air très humide.

En conclusion on peut dire que la conception d'un système de refroidissement performant qui assure une bonne régularité du transfert de chaleur de brins à brins sur une position de filage et de fil à fil entre les positions de filage d'un même métier, est un problème très délicat à résoudre. Il implique des connaissances très pointues en mécanique des fluides. De mauvaises conditions de soufflage réduisent à néant tous les efforts pour produire des polymères de qualité. Les systèmes performant sont également coûteux car ils impliquent des conditionnements de haut niveau si l'on veut éviter des variations saisonnière de la qualité des productions.



ANNEXE DEUX

COMPLÉMENTS SUR LA MODÉLISATION THERMO-MÉCANIQUE DU FILAGE A PARTIR DE L'ÉTAT FONDU ET INFLUENCE DE L'AIR DE REFROIDISSEMENT SUR LE PROCESSUS

(D'après I.F.J. - April 1999 - p. 104-107)

1 – ÉQUATIONS FONDAMENTALES DE LA FORMATION D'UN FILAMENT.

Les équations de base qui suivent sont purement thermo-mécaniques et ne concerne pas les aspects rhéologiques et de modifications de structure. Elles sont des applications des lois fondamentales de la physique de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Un modèle plus complet impliquerait une équation rhéologique :

- Conservation de la masse $\rho_p \cdot v(x) \cdot S(x) = W$ (1)

- Conservation de l'énergie $dT/dx = - (T - T_{air}) \cdot 1/\Lambda$ (2)

- Conservation de la quantité de mouvement $dF/dx = W \cdot dv/dx + 2\pi R \cdot \tau_s - \rho_p \cdot g \cdot S$ (3)

Avec :

- S, R** = Surface et rayon du filament.
- v** = Vitesse du filament.
- W** = Masse du filament.
- T-T_{air}** = Température du filament et température de l'air environnant.
- Λ** = "longueur de refroidissement" – son inverse est une mesure de l'intensité du refroidissement
- τ_s** = Contrainte de cisaillement provoquée par le frottement du filament sur l'air.
- ρ_p, Cp** = Masse volumique et chaleur spécifique du polymère.
- F** = Tension sur le filament.
- g** = Accélération de la pesanteur.
- x** = Distance à la filière.

Les effets de la cristallisation sont négligés. Les déformations prennent fin lorsque la température **T** atteint la température de solidification **T_s** du polymère, point où la vitesse **v** atteint la vitesse de renvidage nominale. On peut écrire :

$$T(x_s) = T_s \quad (4)$$

La modélisation est complétée par une équation qui relie la tension et la déformation du flux de polymère en utilisant un modèle rhéologique viscoélastique de MAXWELL :

$$d\varepsilon/dx = (\sigma / \eta \cdot v) + (1/E_M \cdot d\sigma/dx) \quad (5)$$

Avec :

- ε** = Mesure de l'élongation.
- σ** = Contrainte sur le filament ($\sigma = F/S$)
- η** = Viscosité élongationnelle.
- E_M** = Module élastique du matériau polymérique.

Le premier terme de droite de l'équation (5) concerne le flux plastique visqueux et le second terme peut être relié à l'orientation résultante du filament (et en définitive à son allongement à la rupture **ε_R**)

2 – TRANSFERT DE CHALEUR ET TRANSFERT DE MOUVEMENT.

L'intensité du refroidissement du filament dépend du transfert de chaleur entre la surface du filament et l'air environnant. Elle est exprimée à l'aide du nombre de NUSSELT adimensionnel de la façon suivante :

$$1/\Lambda = Nu \cdot (\pi \cdot \lambda_{air} / W \cdot Cp) \quad (6)$$

Avec

- Nu** = $k.L / \lambda$
k = Coefficient de transfert thermique.
L = Dimension caractéristique (longueur ou diamètre).
 $\lambda - \lambda_{air}$ = Conductibilité thermique du polymère et conductibilité thermique de l'air.

Les travaux de KASE et MATSUO (1965) on conduit à la formule suivante :

(Re = nombre adimensionnel de REYNOLDS = $v.\rho.L / \eta$)

$$\mathbf{Nu = 0,42 Re^{0,334} . [1 + (8v_{air}/v)^2]^{0,167}} \quad (7)$$

Cette formule peut être réarrangée de la façon suivante :

$$\mathbf{Nu = 0,42 (Re^2 + 64 Re_{air}^2)^{0,167}} \quad (8)$$

Avec : $Re = \rho_{air}.v.2R / \eta_{air}$ et $Re_{air} = \rho_{air}.v_{air}.2R / \eta_{air}$

- v_{air} = Vitesse de l'air de refroidissement perpendiculaire au filament.
 ρ_{air}, η_{air} = Masse volumique et viscosité dynamique de l'air de refroidissement.

La contrainte de cisaillement τ_s de l'équation (3) traduit le transfert de quantité de mouvement entre la surface du filament et l'air environnant. Elle s'exprime par un coefficient de friction adimensionnel C_f :

$$\tau_s = C_f . (v_{air}.v^2 / 2) \quad (9)$$

Les travaux expérimentaux ont conduit à la formule suivante : (I. HAMANA - 1968)

$$C_f = 0.37 . Re^{0,61} \quad (1)$$

Les travaux plus récents de H. BRÜNIG, R. BEYREUTER et H. HOFMAN (1999) conduisent aux relations suivantes :

$$\mathbf{Nu = 0,28 (Re^2 + 1024 Re_{air}^2)^{0,17}} \quad (8)$$

$$\mathbf{C_f = (0,33/Re) . (Re^2 + 4096 Re_{air}^2)^{0,20}} \quad (10a)$$

Les figures 8-35 et 8-36 à la page suivante montrent quelques résultats expérimentaux de ces auteurs appliqués au filage de polyester PET 60/24 à 4 000 m/min. sans air de refroidissement et avec deux vitesses d'air (air distribué par une grille de répartition de 1 m. de hauteur et avec un profil bombé)

Figure 8 - 35

FILAGE DE POLYESTER PET 60/24 à 4 000 m/min
Influence de la vitesse de l'air de refroidissement sur le profil de vitesse
(D'après H. BRUNIG, R. BEYREUTHER et H. HOFMAN - 1999)

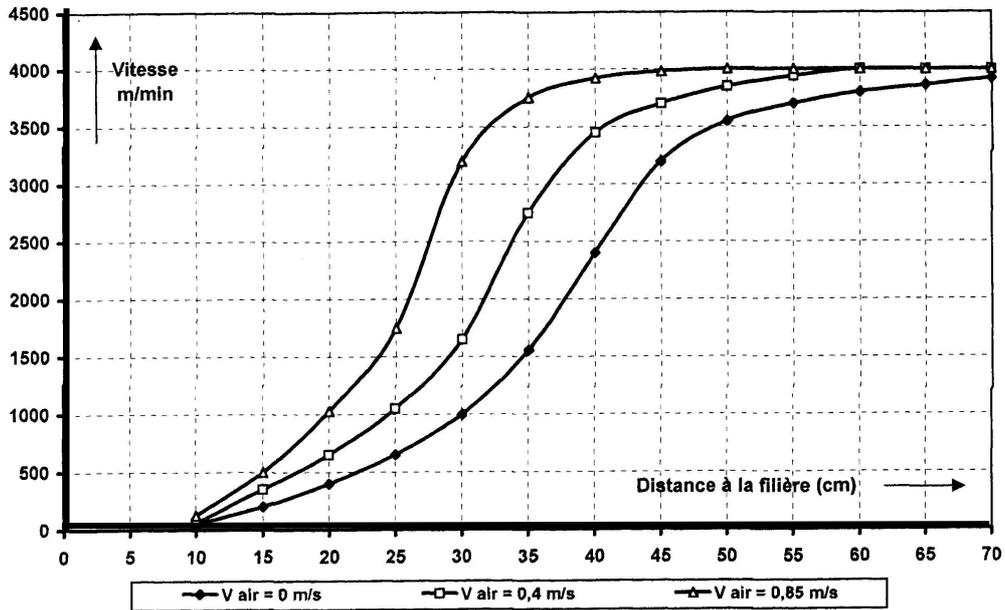
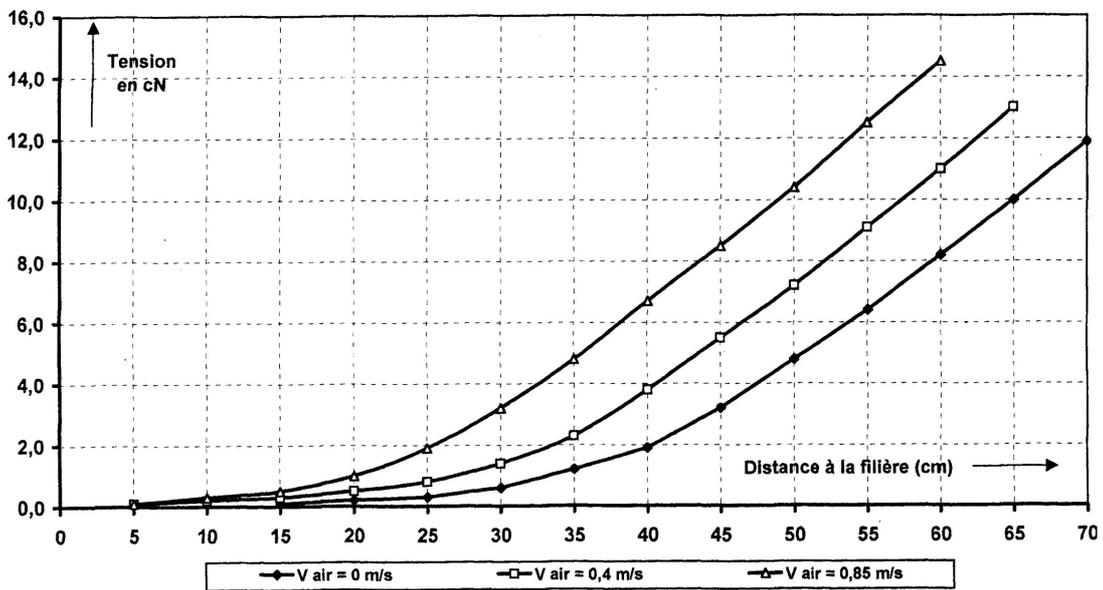


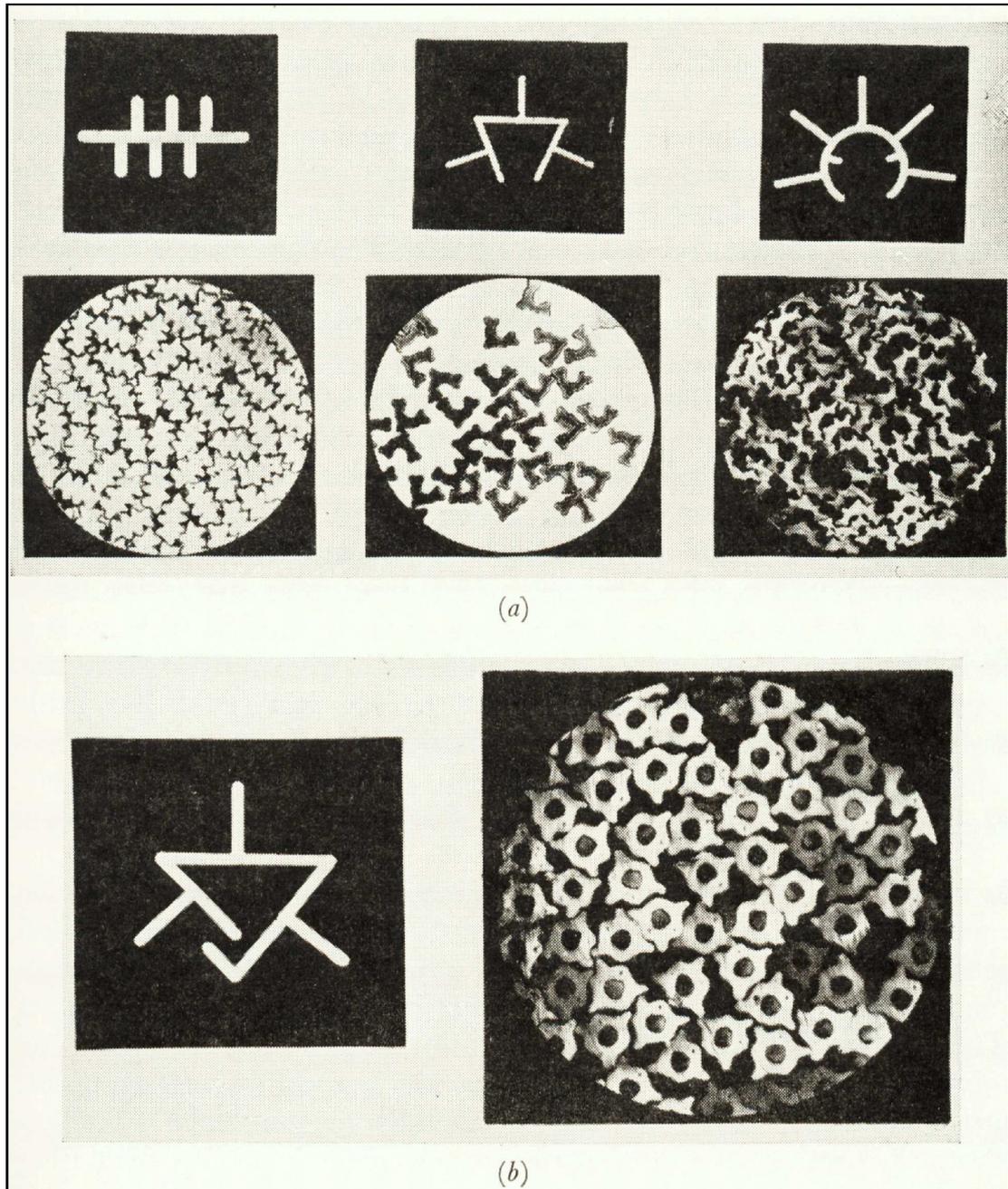
Figure 8 - 36

FILAGE DE POLYESTER PET 60/24 à 4 000 m/min
Influence de la vitesse de l'air de refroidissement sur la tension générée sur le faisceau par le frottement sur l'air (H. BRUNIG, R. BEYREUTHER et H. HOFMAN - 1999)

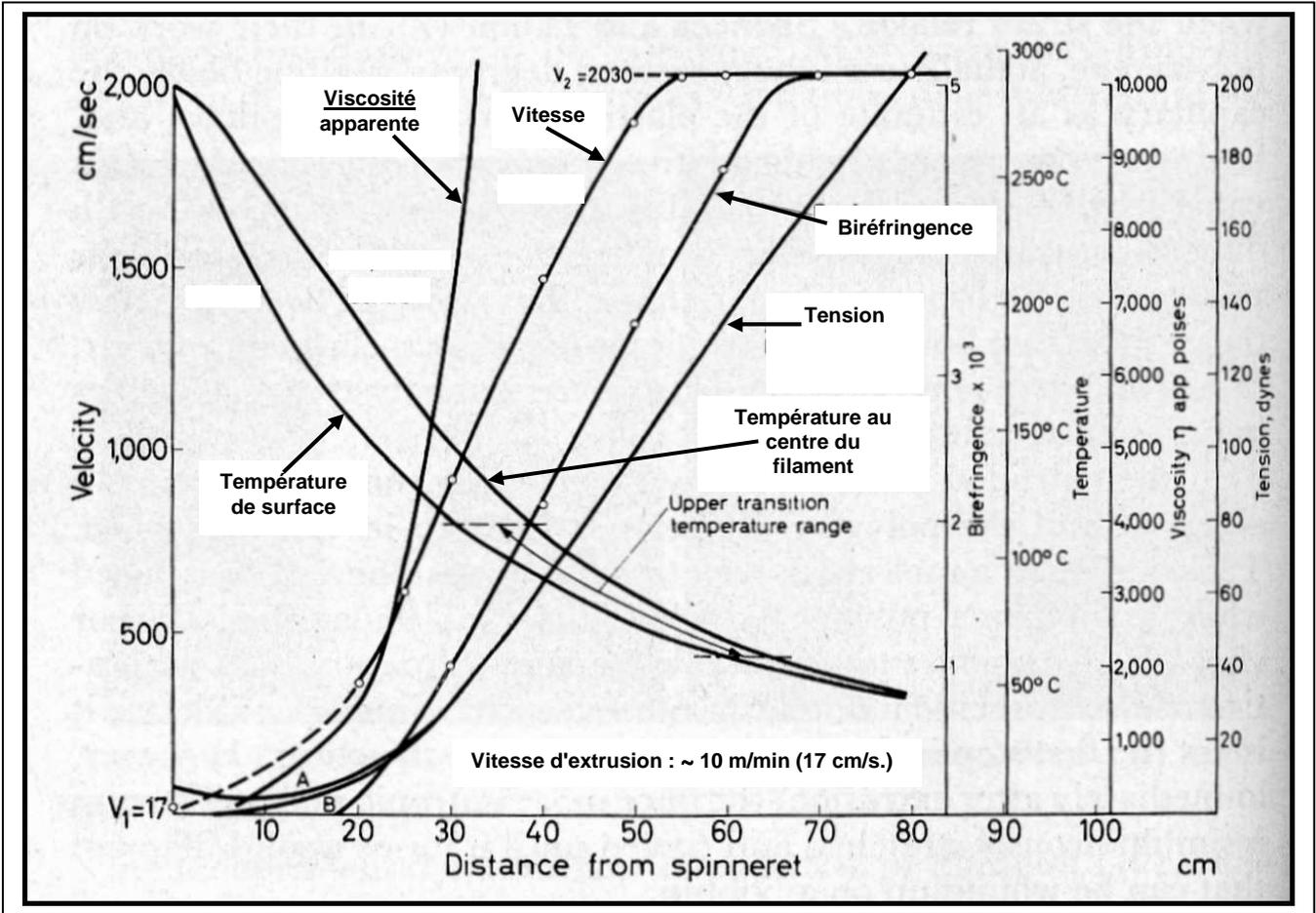


EXEMPLES DE TROUS DE FILIÈRE NON CIRCULAIRES
AVEC LES SECTIONS RÉSULTANTES SUR LES FILAMENTS

(D'après H. BOHRINGER et F. BOLLAND)



FILAGE DE POLYESTER PET A BASSE VITESSE (2 030 cm/s = 1 218 m/min)
Evolution des différentes variables le long du chemin de filage
 (d'après E.H. ANDREWS - 1959)



GONFLEMENT EN SORTIE DE TROU DE FILIÈRE
 (Effet BARUS - Polyester PET)

