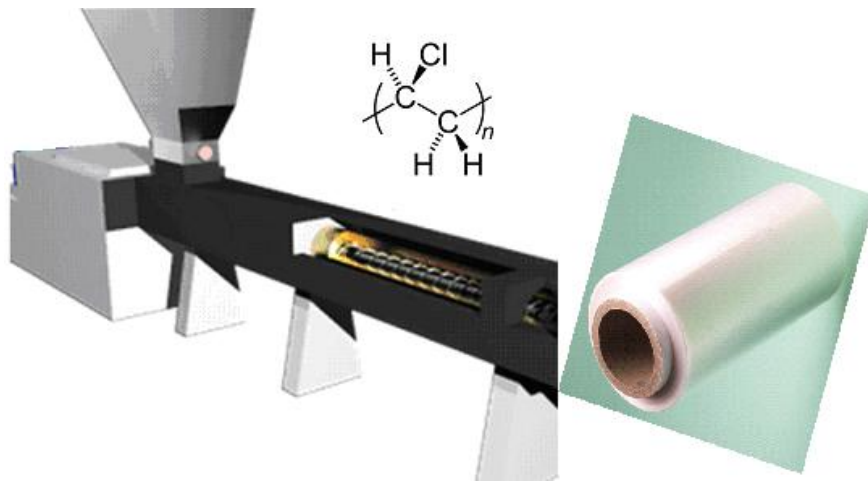


INSTITUT SUPERIEUR DE PLASTURGIE D'ALENCON

Année universitaire 2011 – 2012
Promotion 2012

L'EXTRUSION DU FILM EN PVC PLASTIFIÉ



MONOGRAPHIE
U.E Projets encadrés

Alexandre MARTIN

Vendredi 6 janvier 2012

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à mon maitre d'apprentissage Frédéric Monsonnec pour son aide, ses conseils et les nombreuses corrections qu'il a apporté à mon rapport.

Je remercie mon tuteur académique, Denis Jouannet pour son soutien durant la rédaction de la monographie.

Je remercie également Frédéric Hélard pour son aide lors de la définition de mon sujet.

Je remercie Eric Hamon pour les connaissances sur le film PVC qu'il m'a transmises.

Je remercie aussi Karine Burban pour m'avoir fait profiter de ses ouvrages sur l'extrusion.

Enfin je remercie chaleureusement tout le reste l'équipe du labo PVC de LINPAC Packaging Pontivy : Matthieu Rauscher, Véronique L'Hinguerat, et Laurence David, pour leur soutien durant mes périodes d'alternance en entreprise.

Table des matières

Table des figures.....	- 3 -
Introduction.....	- 4 -
1. Le film en PVC plastifié.....	- 5 -
1.1 Le PVC plastifié.....	- 5 -
1.1.1. Présentation matière.....	- 5 -
1.1.2. Propriétés de la résine PVC.....	- 5 -
1.1.3. Additifs du PVC.....	- 5 -
1.1.4. Propriété du PVC plastifié.....	- 6 -
1.2 Procédés de fabrication.....	- 6 -
1.2.1. Etapes de production.....	- 6 -
1.2.2. Etapes de transformation.....	- 6 -
1.3 Applications et législations.....	- 6 -
1.3.1. Emballage industriel.....	- 6 -
1.3.2. Emballage agricole.....	- 7 -
1.3.3. Emballage consommation courante.....	- 7 -
1.3.4. Emballage médical.....	- 7 -
1.3.5. Emballage alimentaire.....	- 7 -
1.4 Recyclage.....	- 7 -
2. Plastification du PVC.....	- 8 -
2.1 Dry Blending (mélangeage sec).....	- 8 -
2.1.1. Mélangeur rapide.....	- 8 -
2.1.2. Turbo mélangeur K.....	- 9 -
2.1.3. Transport du dry blend.....	- 9 -
2.2 Compoundage et granulation.....	- 9 -
2.2.1. Extrudeuses monovis.....	- 10 -
2.2.2. Extrudeuses bavis.....	- 13 -
2.2.3. Granulation.....	- 14 -
2.2.4. Transport du compound.....	- 14 -
3. Extrusion du PVC Plastifié.....	- 14 -
3.1 Extrusion de film à plat (cast).....	- 14 -
3.1.1. Système de filtration.....	- 15 -
3.1.2. Filière d'extrusion plate.....	- 16 -
3.1.3. Etirage et refroidissement du film.....	- 17 -
3.1.4. Guidage du film et équipements.....	- 17 -
3.1.5. Enroulement du film.....	- 17 -
3.1.6. Coextrusion cast.....	- 18 -
3.2 Extrusion Gonflage (gaine).....	- 18 -
3.2.1. La filière d'extrusion gonflage.....	- 19 -
3.2.2. Le gonflement de la gaine.....	- 20 -
3.2.3. Le refroidissement de la gaine.....	- 21 -
3.2.4. Tirage et bobinage de la gaine.....	- 21 -
3.2.5. Systèmes de contrôle en ligne.....	- 22 -
3.3 Modélisation.....	- 22 -
3.4 Comparaison des deux procédés.....	- 22 -
3.4.1. Avantages du procédé de soufflage de gaine.....	- 22 -
3.4.2. Avantages du procédé cast.....	- 23 -
Conclusion.....	- 24 -
Bibliographie.....	- 25 -

Table des figures

Figure 1 Représentation de Lewis de la formule du PVC	- 5 -
Figure 2 Diagramme de la fabrication du film en PVC plastifié (A. MARTIN)	- 8 -
Figure 3 Schéma d'un mélangeur rapide (Encyclopedia of PVC Vol 3 p106).....	- 8 -
Figure 4 Schéma d'un Turbo mélangeur K (Encyclopedia of PVC Vol 3 p107)	- 9 -
Figure 5 Schéma du profil de la vis (Techniques de l'ingénieur [15])	- 11 -
Figure 6 Photo d'un comalaxeur Buss (BUSS, Kneader Technology for PVC Pelletizing [17])	- 13 -
Figure 7 Mélangeur continu Farrell (Encyclopedia of PVC Vol 3 p 110)	- 14 -
Figure 8 Schéma ligne d'extrusion de film à plat (Techniques de l'ingénieur [24])	- 15 -
Figure 9 Schéma d'une filière plate de type "queue de carpe"(Technique de l'Ingénieur [24]).....	- 16 -
Figure 10 Schéma extrusion gonflage (Dossier Elf ATO Chem [27]).....	- 18 -
Figure 11 Schémas des filières d'extrusion gonflage (Techniques de l'ingénieur [26])	- 19 -
Figure 12 Schéma anneau d'air simple et double flux (Blown Film Extrusion an Introduction [28]).	- 21 -

Introduction

Aujourd'hui le marché du film en PVC plastifié représente peu de producteur. De plus le PVC plastifié est une matière qui a une mauvaise réputation en raison de certains additifs utilisés dans sa fabrication, notamment les phtalates.

Malgré cette mauvaise réputation le marché reste stable car le film en PVC plastifié a un très bon rapport performance/prix.

Le but de ce document est de faire un état de l'art de l'extrusion du film en PVC plastifié, des innovations techniques dans les méthodes de formulation et d'extrusion du film en PVC plastifié.

Le film fin est défini par une épaisseur allant de 5 à 50 μm et le film épais, de 50 à 300 μm .

La première partie de cette monographie est un état de l'art du film en PVC plastifié : la matière PVC plastifiée, les processus de fabrication, les applications, les législations et le recyclage.

La seconde partie traite des techniques de mélangeage et de compoundage, cette partie parle particulièrement des systèmes d'extrusion.

Enfin la dernière partie explique les deux méthodes d'extrusion du film en PVC plastifié : extrusion de film à plat et extrusion gonflage.

1. Le film en PVC plastifié

1.1 Le PVC plastifié

1.1.1. Présentation matière

Poly(chlorure de vinyle), ou poly(vinyle chloride) en anglais, abrégé PVC, polymère thermoplastique, obtenu par la polymérisation du chlorure de vinyle monomère ou vinyle chloride monomère en anglais abrégé en VCM.

Le VCM obtenu par thermocraquage du dichloroéthane, qui est obtenu par chloration de l'éthylène. Le chlore (40%) est originaire du sel et de l'éthylène (60%) qui provient du pétrole [1].

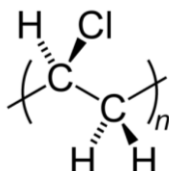


Figure 1 Représentation de Lewis de la formule du PVC

Le PVC plastifié, abrégé en PVC-P (selon la norme NF EN ISO 2898-1) est obtenu par plastification de la résine de PVC [2].

Il est important pour la suite de distinguer la résine de PVC (sans aditifs), du PVC-P (PVC formulé avec plastifiants et autres aditifs) et des produits en PVC plastifié (PVC-P mis en forme).

La résine de PVC utilisée pour la fabrication du film est généralement obtenue par polymérisation en suspension : le VCM, avec des initiateurs solubles, est dispersé par agitation dans un milieu contenant de l'eau et des agents colloïdes. Ce procédé permet d'obtenir des grains de PVC de forme sphérique, d'environ 250µm en suspension dans l'eau. Ils sont séparés de l'eau par centrifugeage, décantation et séchage. L'ensemble des grains se nomme résine de PVC et se présente sous forme de poudre blanche.

1.1.2. Propriétés de la résine PVC

Indice de viscosité : aptitude à l'écoulement de la résine, c'est une grandeur qui varie en fonction de la masse moléculaire (de 60 à 170 Pa.s pour les résines de PVC).

K-wert : valeur ou nombre K, dans certaines normes et références commerciales, on trouve la masse moléculaire moyenne des résines de PVC exprimé en K-wert. Un nombre K élevé correspond à un fort indice de viscosité, donc le polymère sera plus difficile à mettre en œuvre, mais on obtiendra des produits finis aux caractéristiques mécaniques plus élevées. La valeur K varie de 50 à 80 pour les résines de PVC, ce qui correspond à des masses moléculaires de 550 à 950 g/mol [4].

Granulométrie : structure des grains de PVC, cette propriété contrôle les facteurs suivants :

- Teneur en matière volatile : caractérisation du taux de liquide présent dans les grains de PVC
- Faculté d'absorption du plastifiant, lié aux paramètres suivants :
 - Porosité : caractérisation de l'ensemble des interstices du grain de PVC.
 - Etat de surface : caractérisation des défauts géométriques sur la surface du grain de PVC.

1.1.3. Additifs du PVC

Pour pouvoir transformer le PVC il faut obligatoirement mélanger des additifs à la résine de PVC : principalement des stabilisants thermiques et des lubrifiants. Pour transformer un PVC-P il faut aussi ajouter une quantité plus ou moins importante de plastifiant. Donc avant de pouvoir extruder du PVC, il faut préparer une formulation de PVC-P, c'est à dire plastifier la résine de PVC [5].

- Les plastifiants : solvant lourd, sous forme d'huile, qui incorporé à la résine de PVC détruit partiellement les interactions entre les chaînes responsables de la cohésion mécanique du polymère [6]. Quand la concentration en plastifiant augmente :

- La rigidité du PVC diminue
- La température de transition vitreuse diminue (elle passe en dessous de 0°C)
- L'allongement à la rupture augmente

Le type de plastifiant influence les propriétés thermomécaniques du polymère :

- Plastifiants aromatiques (phtalates, aditaptes, sebacates) : meilleure efficacité à court terme (résilience) et à basse température
- Plastifiant aliphatiques (acides gras, polymérique) : meilleure efficacité à long terme (fluage) et à température élevée
- Les stabilisants thermiques : composé qui retarde le dégagement d'acide chlorhydrique et la formation de structures conjuguées colorées. Utilisation de systèmes binaires de sels organométalliques (stéarates de calcium/zinc par exemple).
- Les lubrifiants : pour certains type de résine de PVC ayant une valeur K élevée, l'augmentation de température ne suffit pas à faire baisser suffisamment la viscosité, on utilise alors des lubrifiants. Ils ont en général deux actions. Action interne, les molécules ont une partie polaire qui leur permet de s'accrocher et une partie non polaire qui reste à l'extérieur et permet de réduire le frottement entre les chaînes de PVC, donc baisse la viscosité du polymère. Action externe, les molécules de lubrifiant réduisent les frottements de la matière sur le métal de l'outillage [7].
- Les antichocs : aussi appelés assouplisseurs solides, se sont en général des élastomères [8].
- Les antistatiques : facilitent l'écoulement des charges électrostatiques sur le film [8].
- Les Charges : permettent d'augmenter la masse du film sans en changer les caractéristiques.
- Les colorants et pigments : permettent de donner une coloration au film.

1.1.4. Propriété du PVC plastifié

Le PVC plastifié est très apprécié pour les propriétés suivantes : élasticité, transparence, rétractabilité, inertie, innocuité, imperméabilité aux gaz et aux liquides, soudabilité, brillance, imprimabilité, alimentarité, bon marché, organolepsie, collant, résistance au vieillissement à l'oxydation et aux UV [9].

En contrepartie, le PVC est décrié en raison des additifs utilisés pour sa transformation, ils peuvent migrer hors du PVC, ce qui entraîne une perte des caractéristiques mécaniques et des problèmes d'alimentarité voir de toxicité des éléments mis en contact avec le PVC plastifié [10].

1.2 Procédés de fabrication

1.2.1. Etapes de production

- Réception et stockage des matières premières
- Mélangeage et compoundage de la résine avec le plastifiant et autres aditifs
- Transport du mélange vers l'extrudeuse
- Gélification et transport de la matière dans l'extrudeuse
- Mise en forme du PVC-P à travers une filière cast ou circulaire
- Etirage et refroidissement du film
- Bobinage du film sur des mandrins, le plus souvent en carton.

1.2.2. Etapes de transformation

- Transport des bobines mères et opérations annexes : rebobinage, thermo-soudage, impression, emballage des produits
- Utilisation différentes selon les clients : emballeur, transformateur, ou bobineur
- Distributions et utilisation chez les clients

1.3 Applications et législations

Le PVC est aujourd'hui le 3ème polymère le plus utilisé dans le monde, derrière le PP et le PE. En 2004, la part de PVC plastifié représentait 40% du PVC consommé dans le monde. Les films en PVC plastifié représentaient environ 3% de la production de PVC plastifié. C'est un secteur de niche, il existe peu de producteurs dans le monde [2].

Le marché du film en PVC plastifié stagne depuis quelques années, en raison de son remplacement progressif par d'autres polymères ayant des propriétés similaires, sans utiliser de plastifiant. Il est très utilisé dans les secteurs de l'emballage, où il y a une tendance à la baisse des épaisseurs depuis quelques années. Ceci pour gagner en productivité et pour diminuer le prix de vente et surtout conserver un prix attractif.

1.3.1. Emballage industriel

- Applications : film étirable pour la pelletisation, film d'emballage rétractable, blister.

- Législation : la pollution au chlore lors de la fabrication du monomère (cancérogène) est réglementée par la directive 78/142/CE qui fixe les valeurs autorisées en teneur en chlore et en migration de VCM. De plus l'utilisation comme stabilisant de sel de plomb et de cadmium est interdite.
- Fabricants : CLG Pack

1.3.2. Emballage agricole

- Applications : film pour la couverture des serres, film de paillage des sols.
- Législation : Idem. i.
- Fabricants : LINPAC Packaging

1.3.3. Emballage consommation courante

- Applications : film de protection rétractable pour l'emballage de jouets, housse de couette.
- Législation : Idem. ii. et depuis la directive 2002/72/CE les plastifiants contenant des phtalates, notamment les DEHP, DBP, sont classés cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction. Ils sont interdits dans les jouets et les emballages alimentaires. Depuis, les plastifiants sans phtalates se développent (DINCH, DEHA, HSE), mais ils sont plus chers. En 2008 l'implémentation de REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals), organisation qui recense les substances et donnent les autorisations de mise sur le marché européen. En France, le 4 mai 2011 une proposition de loi interdisant la fabrication, l'importation, la vente et l'offre de produit contenant des phtalates a été votée par l'assemblée nationale.
- Fabricants : MALIP, FLEXICO, SPO, AEP Industrie

1.3.4. Emballage médical

- Applications : poche de conservation de sang et de soluté.
- Législation : Idem. iii.
- Fabricant : TECHNOFLEX

1.3.5. Emballage alimentaire

- Applications : Film étirable de protection, film multicouche de conservation ou d'opercule
- Législation : Idem. iii. et la directive 82/711/CEE et la législation PIM (Plastic and Implementation Measure) qui définissent des contrôles de migration très stricts de tous les additifs des films PVC alimentaires pour l'Europe. Pour le marché américain c'est la FDA (Food and drug Administration) qui fixe une liste de substances interdites.
- Fabricants : CERCLEUROP (France), PERMAPACK (Suisse), Alimantis (Suisse), FABBRI (Italie), CROCCO (Italie), MITSUBISHI Shoji Packaging (Japon), BERRY Plastics (USA), LINPAC Packaging (France), Kalan (France), Ongropack (Hongrie), DARNEL, Extrusa pack (Espagne), Ajover (Amérique du sud)

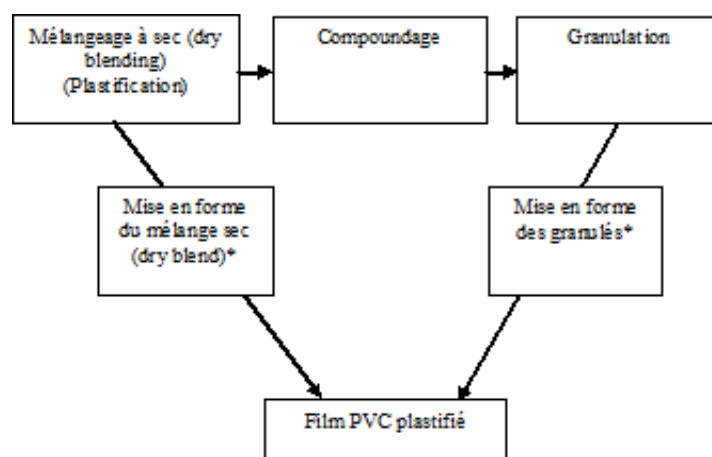
1.4 Recyclage

Le PVC-P est parfaitement recyclable. D'une part directement sur les lignes de production, ou une grande partie des déchets peut être directement réutilisée, après broyage. Les déchets de PVC en fin de vie sont parfaitement valorisables selon deux modes principaux [2] :

- Le recyclage matière : le PVC est récupéré, trié pour le séparer des impuretés les plus grosses. Il est ensuite filtré, jusqu'à obtenir une pureté de 99%. La matière récupérée est utilisée dans les roues pour conteneurs ou les semelles de chaussures.
- La valorisation énergétique : récupération du gaz chlorhydrique (HCL) par incinération, et réintroduction dans la fabrication de chlorure de vinyle monomère (VCM)

2. Plastification du PVC

Aujourd'hui deux procédés sont utilisés pour formuler un PVC-P : le procédé de mélangeage à sec (dry blending), avec utilisation direct de la poudre, et un procédé avec une étape de compoundage et de granulation en plus [11].



* Si la matière est stockée à froid une étape de chauffage est requise

Figure 2 Diagramme de la fabrication du film en PVC plastifié (A. MARTIN)

Quelques définitions :

- Mélangeage : action de mise en contact intime, d'unification de plusieurs composants, on parle aussi d'homogénéisation.
- Malaxage : action d'unifier les composants d'un mélange et d'abaisser sa viscosité.
- Cisaillement : action de soumettre la matière à des contraintes tangentielles à son écoulement.
- Ingrédients : résine, plastifiants et différents aditifs qui composent le mélange.

2.1 Dry Blending (mélangeage sec)

2.1.1. Mélangeur rapide

C'est la technique utilisée par tous les fabricants de PVC-P pour plastifier la résine de PVC (mélange de la résine de PVC avec les huiles de plastifiant et les autres additifs).

Dans une cuve verticale, l'action de mélangeage est produite par des pales, situées au fond du mélangeur, qui tournent à vitesse élevée (1500 à 3000 tr/min). Du fait de la friction entre les grains de PVC, la température du mélange monte à 120-130°C en quelques minutes [13].

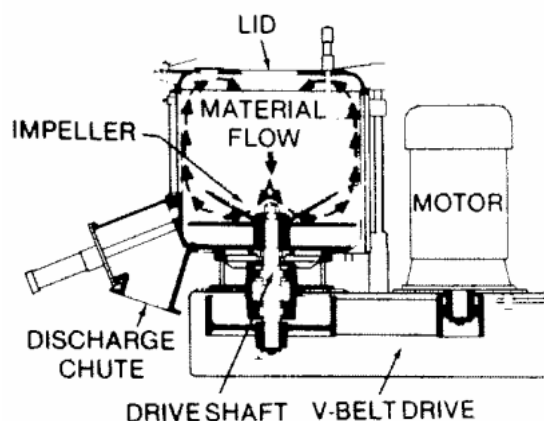


Figure 3 Schéma d'un mélangeur rapide (Encyclopedia of PVC Vol 3 p106)

La plastification se déroule en 2 phases :

Les plastifiants pénètrent dans les pores des grains de PVC par capillarité. Cette opération est très rapide, réversible et indépendante de la température.

Au dessus de la température de transition vitreuse du PVC (80-85°C) les plastifiants se diffusent entre les chaînes de PVC, devenues mobiles. Les chaînes s'écartent, les grains de PVC gonflent et le mélange devient sec en effet, le plastifiant est totalement absorbé. Cette phase est irréversible, dépend de la température, et dure quelques minutes.

On obtient une poudre sèche, plus ou moins blanche, qui peut être directement utilisée dans une extrudeuse pour la transformer en produit final, ou dans un appareil de compoundage (voir partie suivante).

Elle peut être aussi refroidi dans **un mélangeur lent** (ou bas, car il se trouve souvent en dessous du mélangeur rapide). Il est constitué d'une cuve horizontale ou verticale, à double paroi chauffée, comportant un axe avec des lames qui mélange la matière à vitesse lente (50 à 200 tr/min)

2.1.2. Turbo mélangeur K

Ce mélangeur permet de plastifier la résine de PVC avec un taux plus important que le mélangeur rapide, et permet une meilleure distribution des ingrédients. Cet appareil est plus cher mais permet ensuite de produire du film de meilleure qualité [11].

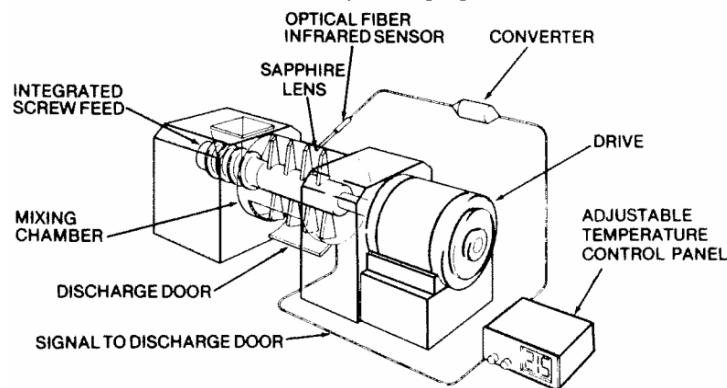


Figure 4 Schéma d'un Turbo mélangeur K (Encyclopedia of PVC Vol 3 p107)

2.1.3. Transport du dry blend

Les grosses entreprises qui produisent du film PVC plastifié hébergent toute la chaîne de formulation et de transport de la matière, du silo de résine PVC, jusqu'à l'extrudeuse qui transformera le PVC plastifié en film. La technique la plus répandue pour faire transiter la poudre de PVC entre le mélangeur rapide et l'extrudeuse est l'aspiration par le vide, dans des canalisations.

La poudre est ensuite stockée dans un mélangeur lent, en attente d'être utilisé. Pendant cette étape il est possible d'ajouter des colorants liquides directement dans le mélange.

2.2 Compoundage et granulation

C'est une étape supplémentaire utilisée par certains fabricants de film PVC plastifié en raison d'un choix technique particuliers dans le but d'obtenir un film de qualité supérieure. Le compoundage est un mélangeage à l'échelle moléculaire, il permet de former une matrice de polymère continue. Nous allons voir dans cette partie les différents appareils utilisés dans l'industrie du PVC plastifié [12].

Le compoundage s'effectue par l'intermédiaire de mélangeurs continus présentent sous la forme générale d'une extrudeuse : la matière est déplacée, mélangée et fondue en même temps. Leurs avantages sont : débit élevé, du fait de leur utilisation en continue (pas de cycle), possibilité d'automatisation complète du procédé et très bonne homogénéisation matière.

Les mélangeurs continus utilisés dans le compoundage du PVC sont du type extrudeuses monovis et extrudeuses biviois. La résine de PVC et les additifs sont en général mis ensembles dans un mélangeur lent avant de les incorporer dans l'extrudeuse.

2.2.1. Extrudeuses monovis

- Structure de l'extrudeuse [14]

Une extrudeuse monovis est constituée d'un bâti, sur lequel se trouve un ensemble vis fourreau, avec des éléments de chauffage et de refroidissement, ainsi que d'une trémie d'alimentation. A l'arrière se trouvent les éléments d'entraînement et de contrôle de la vis.

- Bâti

Généralement c'est un simple support des organes cités ci-dessus, mais il peut également comporter un dispositif d'ouverture du fourreau (en portefeuille : fourreau articulé autour d'une charnière latérale), manuelle ou assistée, permettant d'avoir facilement accès à la vis pour le nettoyage ou la maintenance. Il doit être parfaitement horizontal, pour éviter l'usure du système vis fourreau, et monté sur des patins réglables anti-vibration.

- Entraînement de la vis

La vitesse de rotation de la vis, ainsi qu'un couple constant sont des éléments importants pour pouvoir extruder du PVC-P dans de bonnes conditions. La mise en rotation de la vis est effectuée par un moteur électrique, relié à un réducteur, lui-même accouplé à la vis par un système de clavette ou de cannelure, qui est retenue par un système de buté.

Pour les grosses extrudeuses (plus de 60 kW de puissance) la plupart des producteurs de film PVC-P utilisent toujours des moteurs à courant continu. Ils ont une bonne flexibilité de réglage, surtout pour le contrôle du couple à petite vitesse. Par contre, ces moteurs nécessitent une maintenance préventive intensive et régulière au niveau du système de charbon et de collecteur. Pour les petites extrudeuses, ou les installations modernes, les moteurs asynchrones sont utilisés. La modulation de vitesse est assurée par des variateurs de fréquence, ils permettent d'avoir un gain en précision, un coût plus faible, et une maintenance minime. Par contre ils ont un encombrement plus important et un mauvais contrôle du couple, surtout à faible vitesse.

- Trémie d'alimentation

Il existe différents types de trémies d'alimentation en matière, l'objectif est que l'alimentation soit régulière et suffisante.

- PVC-P sous forme de granulés :

- Trémie simple : peu cher mais il peut y avoir des problèmes d'alimentation (bouchons)

- Systèmes d'alimentation avec vis doseuse : plus cher permet d'imposer un débit de granulés pour une vitesse vis donnée

- PVC-P sous forme de poudre :

- Trémie vibrante : évite les problèmes d'agglomération de la poudre dans la trémie

- Trémie gaseuse : avec une vis verticale à l'intérieur qui force la poudre à aller dans le fourreau, permet une alimentation régulière quelque soit le débit.

- Alimentation centralisée : une quantité de poudre est envoyée périodiquement, ainsi le cycle de remplissage de la trémie est toujours le même et l'alimentation constante.

- Fourreau (cylindre)

C'est un cylindre creux dans lequel la vis tourne, il est souvent constitué de plusieurs tronçons assemblés, pour pouvoir changer un seul des tronçons en cas d'usure. Sur la partie arrière se trouve un orifice, orienté vers le haut qui permet de recevoir la matière.

Pour transformer du PVC-P, le fourreau est actuellement réalisé en acier haute résistance, et chemisé à l'intérieur (deuxième couche de métal) avec du XALOY ou RELOY (acier au nickel, chrome, bore, très haute résistance) sur une épaisseur de 2 à 3 mm [15]. Il présente alors une bonne tenue à chaud (pas d'écaillage). Cela permet d'associer une dureté aussi élevée que possible, afin de résister à l'usure et la corrosion, avec une bonne résilience, qui permet de résister aux contraintes mécaniques due à la viscosité élevée de certaines formulations sans risque de rupture fragile.

- Thermorégulation du fourreau

Paramètre important lors de l'extrusion d'une matière thermosensible tel que le PVC, la température du cylindre doit être parfaitement contrôlée et régulée par des pyromètres (dispositif de mesure de la température). Le nombre de zones de chauffe est compris entre 3 et 6 zones, la puissance des résistances est calculée en fonction du débit maximum souhaité. A chaque tranche de résistance de chauffage on associe en général un dispositif de refroidissement (air, eau ou huile) de façon à éliminer rapidement les calories due à l'auto échauffement de la matière.

○ Vis d'extrusion

La vis est la partie la plus importante de l'extrudeuse, elle est caractéristique de la matière, de la machine et du produit manufacturé. La vis est réalisée en acier très dur mais moins que le fourreau afin qu'elle s'use plus facilement, il est plus facile et moins coûteux de changer la vis. Elles sont polies et blindées par un revêtement de nitrure de titane, soit complètement, soit au minimum sur les sommets des filets. De plus pour les matières corrosives comme le PVC-P, la vis est chromée, traitement qui de plus, facilite le nettoyage de celle-ci. La vis se termine par un embout de forme bombée ou conique, qui est ajusté par vissage [16].

La vis est définie principalement par son diamètre, sa longueur, son taux de compression et son profil :

- Diamètre nominal (D): il est exprimé en mm, c'est la caractéristique principale pour déterminer le débit d'une extrudeuse
- Longueur (L) totale : elle s'exprime en fonction du diamètre, pour la formulation du PVC-P, des longueurs élevées (28 à 32D) sont utilisées afin de bien plastifier la matière
- Profil

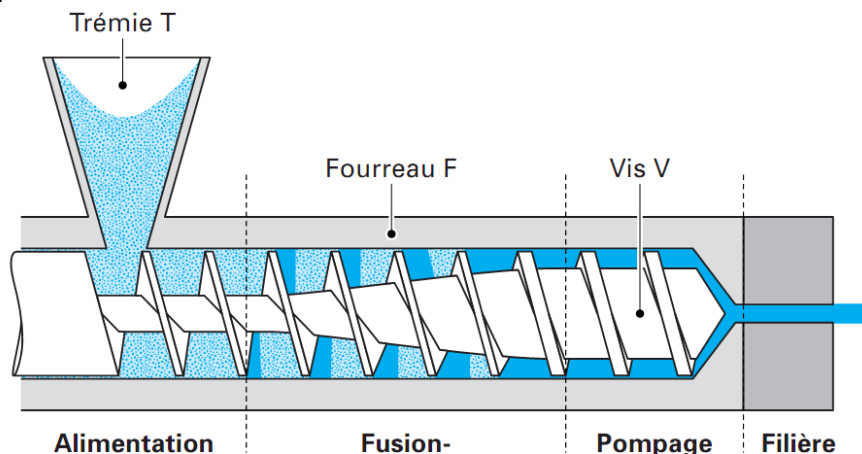


Figure 5 Schéma du profil de la vis (Techniques de l'ingénieur [15])

- Zone d'alimentation (ou culasse) : permet un transport régulier, et un compactage de la matière. le chenal de la vis est rempli de grains de matière solide qui sont comprimés entre eux. Au bout de quelques filets cet ensemble solide, nommé lit solide, progresse en bloc à l'intérieur du canal, entraîné vers l'avant par friction au contact de la paroi du cylindre. Une bonne adhérence de la matière sur la paroi du cylindre est recherchée, pour augmenter le processus d'écoulement en bloc. Ainsi la température de la vis doit être inférieure à celle du fourreau, et suivant les formulations, elle peut être refroidie par un liquide caloporteur passant à l'intérieur. Pour éviter une fusion trop rapide des grains après la trémie et éviter les bouchons il est parfois nécessaire de refroidir aussi le fourreau.

- Zone de fusion (ou de compression) : le cylindre est chauffé, le mécanisme de fusion commence lorsqu'un film de matière se forme entre le lit solide et la paroi chaude du fourreau. Après que le mécanisme de fusion est commencé le lit solide continue d'avancer en bloc alors que la matière fondue tourne sur elle-même, entraînée à l'arrière du canal par la face avant du filet de vis. Dans cette zone le diamètre intérieur de la vis augmente, donc la hauteur du filet diminue, ce qui a pour but de forcer la fusion du lit solide. Pour le PVC, les vis ont une très longue zone de compression, car c'est une matière thermosensible et, selon la formulation, elle peut être très visqueuse.

- Zone de pompage (ou de régularisation, homogénéisation, malaxage) : partie cylindrique située en bout de vis, homogénéise la matière et régule le débit. Sert à porter le polymère à la pression nécessaire pour assurer l'écoulement dans la filière au débit voulu. La hauteur de filet est à nouveau constante mais plus faible que dans la zone d'alimentation. Elle doit permettre une bonne homogénéisation de la matière avec les adjuvants ou pigments.

• Taux de compression : c'est le rapport du volume théorique de matière compris dans un pas entre deux filets, à l'entrée de la vis (zone d'alimentation), sur le volume de matière dans un pas à la sortie de la vis (zone d'homogénéisation). Selon les formulations de PVC plastifié, il sera compris entre 2 et 3.

- Amélioration du malaxage matière [14]

Pour améliorer la stabilité d'extrusion, on cherche à améliorer la capacité de fusion d'une vis en décalant la zone de fusion vers l'arrière. Parfois le cisaillement de la matière est insuffisant pour fondre le lit solide au-delà d'un certain débit. Alors des sections de malaxage supplémentaires sont rajoutées, elles diminuent les écarts de viscosité dans la matière, améliorant la fusion PVC par auto-échauffement. Ces sections de malaxage peuvent avoir des géométries diverses et être placées soit en bout de vis (on les nomme parfois torpilles ou embouts), soit plus couramment entre la zone de compression et la zone de pompage. Elles requièrent un contrôle pointu de la température, car un malaxage (cisaillement) trop important peut provoquer des différences de température au sein de la matière entraînant des problèmes d'hétérogénéité et de dégradation.

Trois types d'amélioration sont utilisés dans l'extrusion du PVC, parfois conjointement :

- Sections dispersives : passage de la matière dans des entrefers étroits. Le cisaillement est intense pendant un temps très court pour éviter tout échauffement excessif du matériau. Les agglomérats sont ainsi mieux dispersés dans le polymère. Exemples de sections utilisées : Maddock (ou Union Carbide, ou LeRoy), Egan, Dray, Troester

- Sections distributives : séparation et recombinaisons des flux de matière. permet d'atteindre un bon niveau d'homogénéité grâce à des taux de cisaillement importants qui induisent un échauffement élevé. Cependant, leur désavantage réside dans la présence de zones mortes, propices aux stagnations de la matière. Exemples de sections utilisées : Picots de fragmentation, Filet interrompu, Dulmage ananas, Rapra, Saxton,

- Filets barrières : Un filet supplémentaire peut être rajouté en zone de compression ou d'homogénéisation. Il possède un pas plus important que le filet principal de manière à faire un tour moins que celui-ci sur la longueur de la zone. Le but est de contrôler la plastification du polymère en séparant à chaque instant le lit solide du lit liquide. Le jeu entre le fourreau et le filet barrière est plus faible et soumet certains granules non fondus à des cisaillements très élevés qui vont permettre d'améliorer la plastification du polymère.

- Vis à plusieurs étages (à dégazage)

Le PVC-P a une tendance à former de l'acide chlorhydrique sous forme de gaz lors de la fusion, on utilise pour certaine formulation une vis à étages. Le premier étage correspond à une vis classique composée des trois zones connues.

La première zone d'homogénéisation impose une restriction sévère pour créer une mise en pression du polymère

Le deuxième étage, zone de décompression démarre par une zone dont la hauteur de filet est importante. Appelée zone de dégazage, cette section de la vis provoque un remplissage partiel du canal et permet l'échappement de certaines substances gazeuses (eau, chlore) au travers d'un orifice usiné dans le fourreau

Le troisième étage comporte une nouvelle zone de compression et de pompage dont la profondeur de filet est supérieure à celles en amont. Le but est d'assurer un débit supérieur à celui du 1^{er} étage afin d'éviter un refoulement de la matière par le trou de dégazage.

En général, la longueur de ce type de vis est plus importante (28 à 36 D). Dans certaines applications particulières, il est possible d'aspirer certains gaz occlus dans la matière fondue à l'aide d'une pompe à vide.

- Extrudeuses monovis en cascade

Ce système a le même but qu'une extrudeuse à dégazage. La première extrudeuse, sert à fondre et à malaxer la matière ainsi qu'un dégazage au bout, la seconde extrudeuse, qui peut tourner à une vitesse différente, permet de contrôler le flux de matière.

- Extrudeuses monovis avec fourreau munis d'ergo [17]

Extrudeuses monovis spéciales, appelées comalaxeur Buss, associent au mouvement de rotation un mouvement de translation, qui favorise le malaxage de la matière, grâce au mécanisme d'écoulement élongationnel. La vis comporte un filet interrompu pour laisser passer les ergots du fourreau, qui s'ouvre en portefeuille. Désavantage : production en sortie d'un débit pulsé, on utilise souvent une extrudeuse monovis en cascade en plus.



Figure 6 Photo d'un comalaxeur Buss (BUSS, Kneader Technology for PVC Pelletizing [17])

2.2.2. Extrudeuses bivis

Pour le compoundage du PVC-P les extrudeuses bivis sont très utilisées, car de part leur conception : deux vis en parallèles, elles permettent de mieux travailler la matière, d'avoir un meilleur débit pour une vitesse et une longueur de vis inférieure

○ Structure de l'extrudeuse

La structure de l'extrudeuse bivis est similaire à celle de l'extrudeuse monovis, sauf que l'on a deux vis côte-à-côte au lieu d'une. De plus le système d'entraînement est modifié pour convenir à deux vis et le fourreau possède un usinage spécial qui épouse parfaitement la forme des deux vis.

○ Système de vis :

Différents critères définissent les systèmes de vis d'une extrudeuse bivis

• Critères principaux [18] :

- Sens de rotation : si elles tournent dans le même sens, les vis sont dites corotatives, si elles tournent en sens inverse elles sont appelées contrarotatives.

Au niveau de l'écoulement de la matière les vis contrarotatives obligent le matériau à convoyer au centre des deux vis, Cette configuration est utilisée pour le PVC car elle génère un fort auto-échauffement de la matière, donc une très bonne homogénéisation du matériau. Cette conception est une solution très efficace pour la distribution de lubrifiant et de pigments.

- Interpénétration : lorsque le filet pénètre partiellement ou totalement dans le chenal de vis voisine.

• Critères secondaires :

- Profils conjugués : lorsque la surface de l'une des vis épouse parfaitement la surface de l'autre, aussi appelé vis autonettoyantes

- Profils coniques : pour les systèmes contrarotatifs, les vis peuvent être conique. Un système de vis conique est en général moins encombrant, car les vis sont plus courtes pour des débits équivalents.

- Profils multi filets : on peut trouver plusieurs filets hélicoïdaux dans une section perpendiculaire à l'axe des vis.

- Profils à plusieurs étages : comme pour l'extrusion monovis cette configuration permet le dégazage.

- Profils modulaires : lorsque la vis est constitué d'éléments indépendants que l'on peut agencer le long d'un axe pour constituer un profil suivant les fonctionnalités que l'on souhaite utiliser.

- Éléments malaxeurs : comme pour l'extrudeuse monovis les systèmes bivis peuvent être équipés d'éléments malaxeurs : disques mélangeurs, disques excentrés et disques à lobes.

○ Extrudeuse bivis avec extrudeuse monovis en cascade

De même que pour le système d'extrudeuse monovis en cascade, l'extrudeuse bivis peut être suivie d'une extrudeuse monovis, afin de pouvoir effectuer un dégazage et réguler le flux de matière à la sortie.

- Mélangeur continu Farrell

Composé de deux long rotors de forme spéciale, qui permettent un cisaillement très élevé bonne homogénéisation matière, et un débit très élevé, mais c'est une technologie très couteuse.

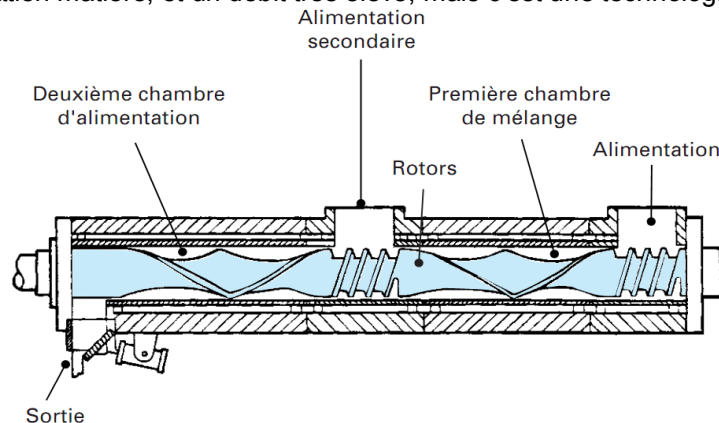


Figure 7 Mélangeur continu Farrell (Encyclopedia of PVC Vol 3 p 110)

2.2.3. Granulation

En général toutes les machines de compoundage citées ci dessus sont suivies d'appareil de granulation. Pour la granulation à chaud, ils sont composés d'une filière plate ou à trous et un système de coupe qui transforme la matière fondue en granulés de forme cylindrique ou cubique. Ce système de coupe est équipé d'un système de refroidissement pour solidifier les granulés.

Pour la granulation à froid, il consiste en une filière plate et d'un tapis roulant ou d'une série de rouleaux qui refroidissent la matière et l'achemine vers un système de coupe, qui transforme la matière solide en granulés ou cubes.

2.2.4. Transport du compound

Chez les grosse entreprises de production, la méthode de transport des granulés de compound jusqu'à l'extrudeuse est la même que pour le transport du dry blend,

On peut noter que les colorants sont soit directement incorporés dans le compoundeur, ou soit directement incorporés dans la trémie de l'extrudeuse de transformation, en même temps que les granulés afin de limiter l'encrassement du compoundeur.

3. Extrusion du PVC Plastifié

Deux techniques sont utilisées pour extruder du film PVC plastifié. Elles diffèrent en grande partie par leur procédé de conformation. La première l'extrusion de film à plat, ou cast consiste à obtenir un film à partir d'une filière plate. Au contraire, la seconde technique, l'extrusion gonflage, aussi appelée soufflage de gaine, consiste en un tube mince généralement de grand diamètre par rapport à son épaisseur, obtenu à partir d'une filière annulaire, mis à plat par la suite [20].

3.1 Extrusion de film à plat (cast)

L'extrusion filière plate consiste à extruder un polymère à l'état fondu à travers une filière plate, à l'étirer dans l'air sur une courte distance et à le refroidir de façon rapide sur un ou plusieurs rouleaux thermostatés. Le film est ensuite stabilisé en passant sur plusieurs rouleaux successifs puis enroulé, après en avoir préalablement découpé les bords (appelés lisières ou trim). Une extrudeuse monovis est utilisée, souvent avec des éléments dispersifs et distributifs qui permettent de faciliter la plastification et l'homogénéisation de la matière rebroyée réincorporé dans la matière vierge.

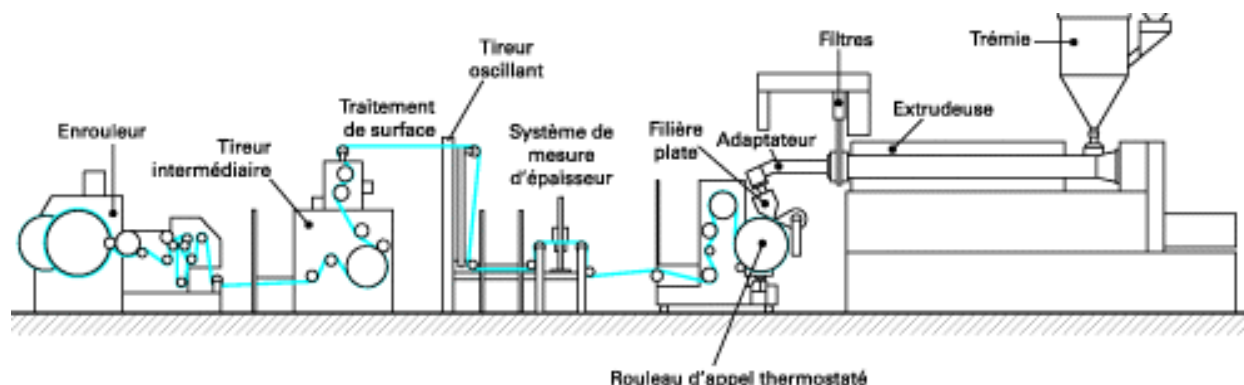


Figure 8 Schéma ligne d'extrusion de film à plat (Techniques de l'ingénieur [24])

3.1.1. Système de filtration

L'ensemble qui se trouve juste après l'extrudeuse se nomme : tête d'extrusion, elle comprend les éléments suivants : pièce de raccord avec l'extrudeuse et système de contre-pression et de filtration, suivit de la filière d'extrusion [21].

- Grille de contre-pression (ou de répartition) et de filtration

A la sortie de la vis d'extrusion, à l'extrémité du cylindre, on dispose une grille de contre-pression. Elle a pour but de supprimer l'effet de rotation dû à la vis (rupture du flux ou mouvement hélicoïdale de la matière) et d'augmenter la pression en bout de vis. La filtration est assurée par des tamis de filtration : maillages métalliques plus ou moins fins sont directement posés sur la grille de contre-pression, ils permettent de retenir les déchets (particules métalliques, carton) qui se trouvent dans la matière.

- Dispositifs de changement de filtration compatibles avec le PVC plastifié [22]

Lors d'une production par extrusion, les tamis des filtres peuvent s'encrasser rapidement, il en résulte une montée en pression plus importante ainsi qu'une baisse de débit. Il faut alors changer les tamis, mais cela demande un arrêt de production. Pour gagner en productivité il existe des changeurs de filtres. A cause du risque de dégradation élevé du PVC plastifié, le choix est limité aux systèmes suivants :

- Systèmes discontinus

- Changeurs de filtre de type « guillotine » ou « tiroir »

Une plaque coulissant entre la tête et l'extrémité de l'extrudeuse porte deux logements recevant chacun une grille et des filtres. Cette pièce est thermo-régulée. Lors du changement de filtre, par translation, réalisé soit manuellement, soit automatiquement par un vérin, on procède à l'échange des grilles. Les tamis de la grille encrassée sont alors retirés et remplacés par des neufs.

Ce dispositif, dont la mise en œuvre est simple, présente cependant deux inconvénients : Risque de fuites matière et perturbation du flux de matière lors du changement. Aussi convient-il de procéder au changement de filtre entre deux fabrications ou lors d'un changement de bobines à la réception. Ce système n'est donc pas adapté pour les productions hautes cadences.

- Systèmes continus

- Changeur de filtre à défilement continu de bande filtrante

Une bande de tamis spécial (double épaisseur) passe devant une grille de contre-pression. L'avance de cette bande est généralement programmée, la vitesse d'entraînement étant de quelques mm à l'heure. Cette technique permet de réaliser des fabrications de longue durée avec des filtres toujours propres et présente l'avantage de régulariser parfaitement la pression en bout de vis.

- Changeur de filtre rotatif à couronne dentée

Il est composé d'une roue dentée (reliée à un vérin qui effectue la rotation), dans cette roue se trouvent les filtres, séparés à intervalles réguliers par des séparations métalliques. Ces filtres sont constitués de grilles avec des trous coniques, et devant cette grille se trouvent les tamis.

Le fonctionnement à pression constante et élevée, avec un temps de séjour minimum, assure un flux quasiment continu.

3.1.2. Filière d'extrusion plate

Le polymère fondu s'écoule à travers une filière plate, dont la section finale est rectangulaire. L'un des objectifs de cet outil est d'obtenir une régularité de température et d'épaisseur sur toute la section. Cette section rectangulaire s'appelle l'entrefer, il est réglable de façon manuelle ou automatique. L'uniformité de la distribution de l'écoulement est liée à la conception du canal, appelé manifold et d'une lèvre flexible est utilisée pour l'ajustement final de l'épaisseur du polymère fondu. Le manifold est suivi d'une zone d'écoulement appelé land. Le polymère fondu pénètre au centre de la filière puis est reparti de façon régulière et symétrique de chaque côté de la filière. La géométrie du canal est conçue en prenant en compte d'une part les propriétés rhéologiques et thermiques du polymère, et d'autre part les conditions opératoires.

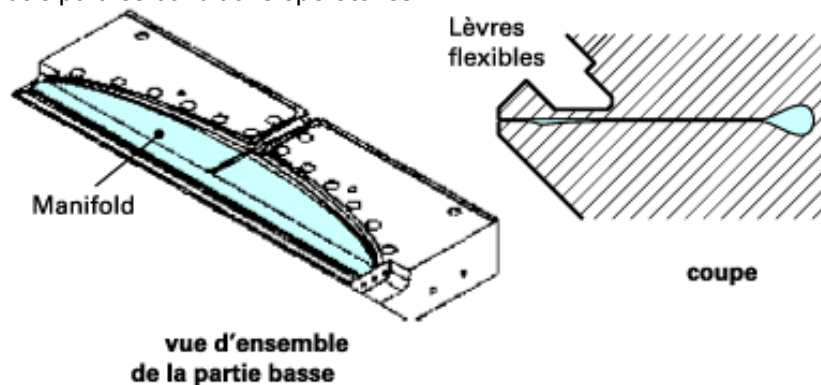


Figure 9 Schéma d'une filière plate de type "queue de carpe"(Technique de l'Ingénieur [24])

- Type de filières plates utilisées en extrusion de film PVC [23]
 - Filière en portemanteau (coat hanger die)
 - Filière en queue de carpe (fish tail die)

La filière queue de carpe permet d'obtenir une bonne distribution de la matière sur la largeur, de façon peu dépendante des conditions opératoires. Son principal défaut est son coût en raison de la géométrie complexe à usiner. La filière porte manteau est la plus fréquemment utilisée, la principale raison étant que cette géométrie compromis coût / qualité de distribution matière.

- Dispositifs ajustement

Les hétérogénéités d'écoulement sur la largeur de la filière très fréquentes peuvent être résolues par différentes méthodes. Des différences locales de vitesse d'écoulement peuvent être généralement éliminées en modifiant localement l'ouverture des lèvres constituant l'entrefer. Cela est effectué en réalisant un cintrage léger de la lèvre avec des vis de pression. Les lèvres flexibles qui sont positionnées sur toute la largeur de la filière, peuvent être ajustées de façon à contrôler l'épaisseur de l'extrudât et compenser les effets de bords et les gonflements engendrés par le comportement rhéologique du polymère fondu et son étirage.

- Régulation de la filière cast

Le chauffage d'une filière cast est assuré par des plaques chauffantes disposées sur la filière ainsi que des cartouches chauffants insérés à l'intérieur. Les températures sont plus élevées aux extrémités de la filière par rapport au centre. La filière est refroidie par fluide caloporteur.

- Défauts sur le film en sortie de filière [24] :

- Dépôts

Ils consistent en l'accumulation de matière en sortie de filière causée par le gonflement du polymère et les possibles impuretés contenus dans les additifs ou la résine de PVC qui composent la formulation du PVC-P. L'accumulation progressive du dépôt fait que ce dernier entre en contact avec le film pendant l'extrusion, ce qui entraîne une détérioration des propriétés optiques et mécaniques et aussi parfois une pollution du film. Lorsque le dépôt devient trop important il faut interrompre la production et nettoyer la filière.

- Peau de requin

Des instabilités d'écoulement près de la surface de la filière peuvent augmenter la rugosité du film, ce qui se traduit par la détérioration de sa transparence et de son aspect. Il peut être atténué par l'utilisation d'agents appelés « Aid processing ».

3.1.3. Etirage et refroidissement du film

A la sortie de la filière, le PVC plastifié subit un étirage plus ou moins long selon l'épaisseur souhaitée, puis est directement plaqué sur un rouleau thermostaté (appelé aussi « Chill roll ») qui fige la matière. La ligne de figeage sur le rouleau thermostaté est optimisée en déplaçant ce dernier longitudinalement (parallèlement à la direction d'extrusion) et verticalement par rapport à la filière. Les dimensions du rouleau thermostaté doivent être déterminées en fonction du débit global de la ligne de production pour garantir un refroidissement homogène du film. Le film peut également passer dans plusieurs autres rouleaux thermostatés, si le débit est très important.

Les conditions de refroidissement sur le rouleau thermostaté peuvent conditionner la structure cristalline du film PVC-P (très faiblement car c'est un polymère très peu cristallin), et par conséquent influencer en particulier ses propriétés optiques.

Dans le but d'obtenir un bon contact entre le film et la surface du rouleau thermostaté, il est courant de rencontrer des dispositifs optionnels destinés à faciliter ce contact :

Lame d'air : pièce métallique présentant une fente longitudinale dont l'entrefer est extrêmement précis et alimenté par de l'air qui peut être refroidi ou chauffé.

Boîte à vide : positionnée entre la filière et le rouleau thermostaté, elle génère une dépression permet d'améliorer le contact avec le rouleau thermostaté.

3.1.4. Guidage du film et équipements

Après avoir quitté le rouleau thermostaté, le film passe à travers une série d'éléments destinés à le guider vers l'étape d'enroulement. On peut rencontrer en particulier des rouleaux libres ou des rouleaux déplisseurs. Les rouleaux libres sont des cylindres qui permettent de convoyer des films délicats avec une tension faible avant enroulement final.

Afin de réaliser des productions de film reproductibles et pour éviter une tension excessive pendant le convoyage, il est possible de mesurer la tension du film à l'aide de rouleaux dont le système de guidage est équipé d'un système de mesure.

Cette partie de la ligne de transformation peut comporter les équipements auxiliaires suivants :

- Système de découpe longitudinal des lisières (ou « trim ») et aspirateur de lisières, qui sont broyées et réutilisées.
- Mesure d'épaisseur en ligne : plusieurs méthodes sont utilisées (infrarouge, rayons gamma), elles ont toutes le même principe, c'est un capteur qui effectue des translations sur la largeur du film.
- Unité de traitement de surface : le traitement Corona consiste à appliquer une décharge électrostatique à haut voltage près de la surface du film générant ainsi une oxydation locale qui entraîne la création de très fines irrégularités. Cette augmentation de la rugosité du film permet d'améliorer son imprimabilité. Il est aussi possible d'appliquer sur le film une très mince couche d'une substance polaire qui facilite l'impression.
- Unité d'impression : La flexographie est la technique d'impression la plus courante, l'héliogravure est aussi utilisée (plus coûteuse, impression de meilleure qualité). Dans les deux cas, l'impression se fait en soumettant le film à des impressions successives à partir des couleurs de base du motif désiré.

3.1.5. Enroulement du film

Le film en PVC-P est souvent séparé en plusieurs sections par des couteaux, avant de passer dans un système d'enroulement qui va permettre d'enrouler automatiquement une ou plusieurs bobines selon la largeur désirée. Le choix d'un système d'enroulement dépend autant des propriétés de la formulation de PVC-P utilisé que des exigences du marché.

- Système d'enroulement tangentiel (appelé aussi enroulement circonférentiel, ou enroulement surfacique), consiste à appliquer un rouleau dont l'axe est motorisé sur le rouleau de film. Les avantages sont surtout leur simplicité d'utilisation et leur faible coût.

Leurs principaux défauts résident dans leur impossibilité de produire des bobines faiblement serrées et dans la limitation qu'ils ont à générer des bobines de grand diamètre (maximum autour de 1 500 mm). Ce système convient bien pour les films PVC-P de faible épaisseur, ainsi que les films qui ont du collant, comme les films étirables alimentaires.

- Système d'enroulement axial (dénommé également enrouleur central ou enroulement direct), l'axe d'enroulement est directement motorisé, le couple augmente au fur et à mesure que le diamètre de la bobine augmente (et que la vitesse du moteur diminue), afin de maintenir une tension de bobinage constante.

L'utilisation d'enrouleurs axiaux est recommandée pour des films PVC-P à faible propriété collante ou lorsque des bobines de films extrêmement peu serrées doivent être produites. Un film issu d'une bobine obtenue par enroulement axial présentera un état de contrainte résiduel généralement plus faible que celui obtenu par enroulement tangentiel.

Il est de plus en plus fréquent de rencontrer des systèmes d'enroulement qui combinent les deux principes précédents. On parle alors de système mixte axial-tangentiel qui permettent ainsi de contrôler précisément la tension de bobinage [24].

Une conception généralement plus coûteuse est le système d'enroulement à tourelle (ou à barillets) qui permet un changement de bobine automatique. Chaque axe d'enroulement est motorisé individuellement et possède un dispositif de contrôle de la tension également individuel.

Les films épais (plus de 100µm d'épaisseur), sont peu sensibles à la tension d'enroulement sont enroulés à une vitesse relativement faible (généralement inférieure à 30 m/mn). Le transfert de film pendant le changement de bobine se fait manuellement. L'enroulement de films fins ou sensibles à la tension (film PVC-P étirable) à haute vitesse (200 m/min) nécessite un système de contrôle de la tension et un guidage du film extrêmement précis. Dans ce cas, le changement de bobines et la découpe transversale du film sont complètement automatisés. Une fois le changement de bobine effectué, la bobine venant d'être réalisée est dégagée de l'axe de la machine puis convoyée vers la zone de stockage.

3.1.6. Coextrusion cast

En associant plusieurs extrudeuses il est possible de coextruder des films multicouches et ainsi de combiner plusieurs autres polymères avec le PVC, généralement choisis pour empêcher la migration des additifs du PVC. Bien que expérimenté par le fabricant KM [25] cette technique n'est quasiment pas utilisée.

3.2 Extrusion Gonflage (gaine)

Pour l'extrusion gonflage, le film est appelé gaine, c'est pour cette raison que ce procédé de fabrication est aussi nommé soufflage de gaine. Il fait appel à une extrudeuse monovis longue (entre 24 et 32D), ou bivi pour les débits très élevés. Les techniques de filtration du PVC-P sont les mêmes que pour l'extrusion cast.

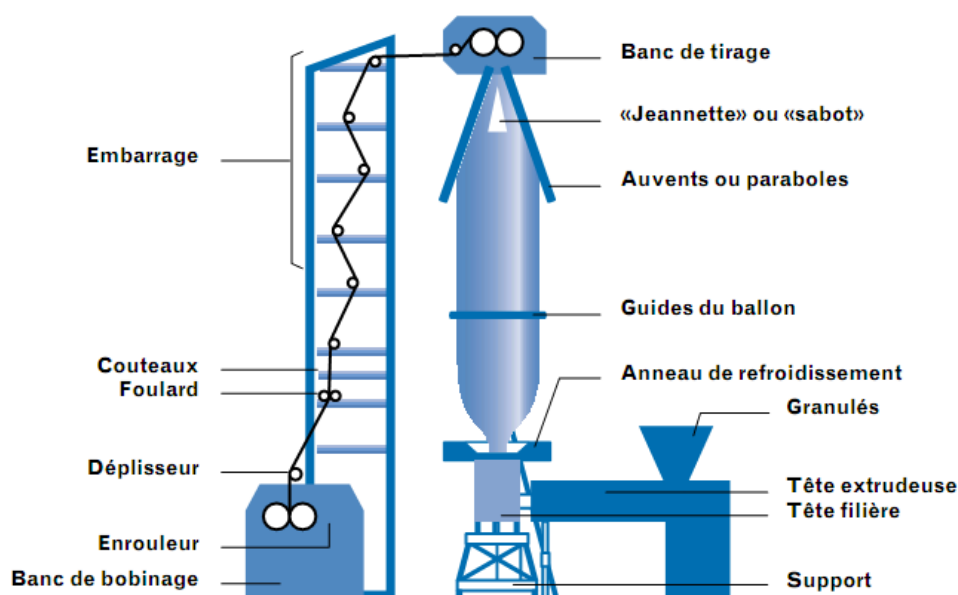


Figure 10 Schéma extrusion gonflage (Dossier Elf ATO Chem [27])

À la sortie d'une filière circulaire, l'extrudat est refroidi par un anneau de refroidissement tandis que de l'air est insufflé à l'intérieur pour former une bulle. La bulle est ensuite mise à plat entre les auvents (ce dispositif est aussi appelé « A »), pincé et tiré entre les cylindres de tirage, qui constituent

l'organe le plus élevé de la ligne d'extrusion. Les bords de la bulle peuvent être repliés à l'intérieur, à l'aide de « jeannettes » ou « sabots » pour produire de la gaine à soufflets. La gaine mise à plat est ensuite enroulée au sol après avoir traversé le dispositif d'embarage (série de rouleau où passe le film). Entre les cylindres de tirage et l'enrouleur, interviennent les appareils destinés à donner à la gaine sa présentation définitive (coupes, traitement pour l'impression)

3.2.1. La filière d'extrusion gonflage

Dans le cas le plus général, l'alimentation d'une filière fait un angle de 90° avec la direction de la sortie extrudeuse. La tête d'extrusion gonflage comporte les pièces suivantes : une carcasse externe, constituée généralement de deux ou trois parties superposées, solidement assemblées. La dernière partie est couramment désignée sous le nom de filière. Un poinçon interne, généralement en deux parties : Dans sa partie inférieure, le poinçon est fixé au corps de la filière, soit par une torpille (cas de l'alimentation centrale), soit directement par emboîtement et vissage à la base de la carcasse (cas de l'alimentation latérale). Entrefer : c'est la largeur du passage entre la filière et le poinçon au niveau du land. Afin de régulariser l'écoulement de la matière fondue, le passage entre filière et poinçon comporte généralement de zones d'étranglement ou de laminage, disposées de préférence dans la partie amont [27].

La filière doit permettre de délivrer le PVC plastifié fondu de façon régulière, c'est-à-dire sans présence de ligne de resoudure qui pourrait se traduire par la présence de défauts de surface, de défauts optiques ou de défauts structuraux pouvant engendrer des faiblesses du film.

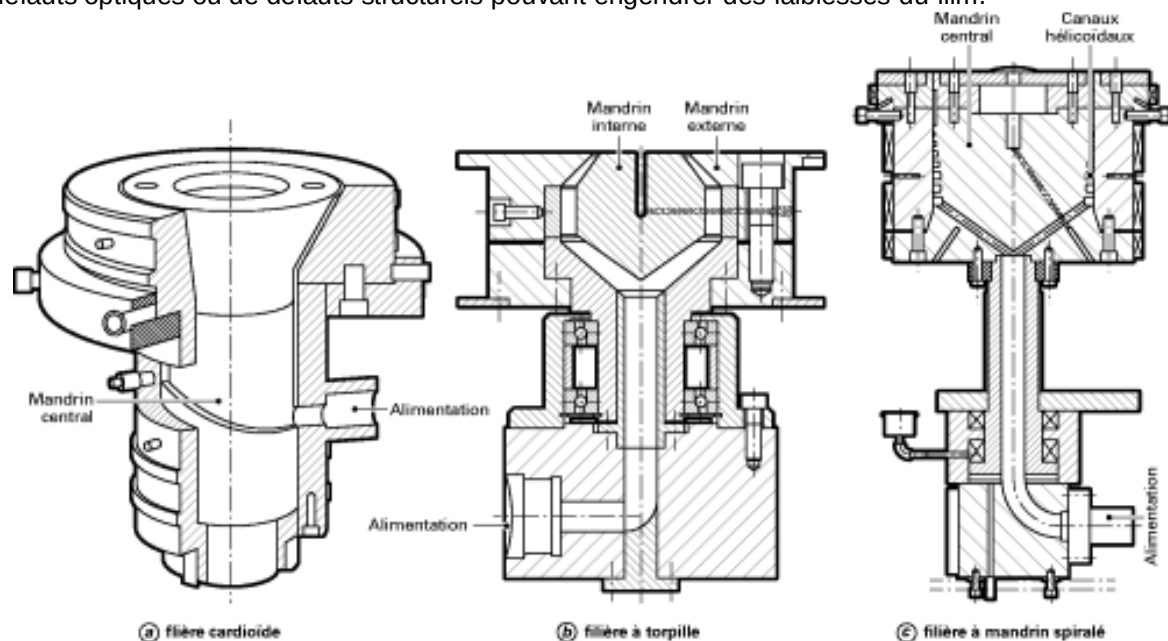


Figure 11 Schémas des filières d'extrusion gonflage (Techniques de l'ingénieur [26])

- Alimentation latérale ou cardiode (fig. 12 a) :

La matière se répartit dans une gorge autour du porte-poinçon. Un écoulement préférentiel se crée sur le côté d'arrivée matière, dû au parcours plus long sur le côté opposé. Pour remédier à cet inconvénient, on a réalisé des alimentations sur le poinçon. Bon marché, mais peu utilisées pour l'extrusion de film PVC-P : risque de ligne de soudure sur la gaine.

- Alimentation centrales ou à torpille (fig. 12 b et c) :

Dans cette conception, la matière arrive dans un canal et se répartit autour du poinçon par l'intermédiaire d'une pièce porte porte-poinçon : c'est la torpille. La torpille peut être conçue de différentes façons : torpilles à ailettes, torpilles à grille, torpilles à canaux en étoile. L'alimentation centrale permet d'éviter la ligne de soudure, un réglage plus facile en général une meilleure régularité de l'épaisseur, une purge plus rapide. Une Variante, aujourd'hui la plus utilisée la filière hélicoïdale ou à mandrin spiralés : Le polymère fondu est introduit dans des canaux hélicoïdaux. Au fur et à mesure de sa progression, le polymère peut aussi s'écouler directement vers le haut afin de rejoindre un pas de d'hélice situé plus haut.

- Hauteur de la filière : pour éviter les problèmes de « mémoire plastique du PVC », qui peuvent

créer des rayures ou des faiblesses d'épaisseur, on choisira une hauteur de filière suffisamment importante (1,5 fois le diamètre).

- Chauffage de la filière: il devra être le mieux réparti possible. A l'intérieur du poinçon épingle chauffantes, 4 zones de chauffage au minimum : au niveau du raccord, au niveau du coude, au niveau de la torpille, au niveau de la filière.
- Défaut d'extrusion : les filières circulaires subissent les mêmes défauts d'extrusion que pour les filières cast.
- Têtes d'extrusion tournantes (fig. 12 c) :

Malgré les précautions prises lors du centrage de la filière, des différences d'épaisseur sont observées, dues aux propriétés d'écoulement du polymère fondu. Lors de l'enroulement, la superposition de surépaisseurs au même endroit, entraîne la déformation de la bobine par création de cordes ou nerfs. Plusieurs solutions existent : rotation de l'extrudeuse, rotation de l'ensemble réception autour de l'axe vertical d'extrusion.

Dans la plupart des cas (sauf pour les très grosses têtes d'extrusion) la filière est animée d'un mouvement oscillant dont l'amplitude angulaire est inférieure à 360°, la vitesse est adaptée pour que l'on puisse obtenir deux oscillations complètes par bobines. Dans certains cas cependant, la rotation est complète. Les résistances chauffantes sur la tête sont alors alimentées par des balais venant au contact des couronnes.

Le mouvement de rotation, donné par un moteur, qui est relié à la filière par courroie (ou chaîne) peut affecter soit la filière seule, soit le poinçon seul (alimentation latérale), soit l'ensemble de la filière.

3.2.2. Le gonflement de la gaine

Il suffit d'une surpression (par rapport à la pression atmosphérique) de quelques dizaines de pascals pour gonfler la bulle. Lorsque le diamètre souhaité est atteint, la vanne d'alimentation en air est fermée. Les rouleaux pinceurs qui plaquent les parois du film l'une contre l'autre servent aussi à prévenir les fuites d'air servant au gonflement de la bulle. Le volume d'air piégé à l'intérieur de la bulle est donc constant. La vitesse des rouleaux pinceurs permet de contrôler le taux d'étirage longitudinal du film [26].

- Le **taux d'étirage TUR** (*Take Up Ratio*) permet de définir l'étirement longitudinal du film induit par les rouleaux pinceurs.

$$TUR = Dr = \frac{U_f}{U_0}$$

Avec U_0 , vitesse linéaire d'écoulement du polymère en sortie de filière et U_f , à la position de figeage.

- Le **taux de gonflement BUR** (*Blow Up Ratio*) permet de définir l'étirage transversal du film induit par le gonflement de la bulle

$$BUR = \frac{R_f}{R_0}$$

Avec R_0 , rayon de la bulle de polymère en sortie de filière, et U_f , à la position de figeage.

Le taux de gonflement a un effet sur le diamètre de la bulle, mais aussi sur la position de la ligne de figeage et donc sur les contraintes internes, l'orientation des cristaux et les performances du film. L'augmentation de TUR (Dr) entraîne une augmentation de la position de la ligne de figeage (à taux de gonflement et débit d'air de refroidissement constant). Le PVC-P, de part sa formulation, est moins réactif aux variations de TUR et BUR par rapport à d'autres matériaux comme le polyéthylène [27]. Il est possible de contrôler l'épaisseur du film en ajustant de façon appropriée le débit, le taux d'étirage et le taux de gonflement.

- Défauts de gonflement :

La présence de la surface libre rend la bulle fortement sensible aux nombreuses perturbations (champ de vitesse non uniforme, courant d'air, etc.) pouvant générer des instabilités.

Des instabilités surviennent généralement à des taux de gonflage élevés caractérisés par un mouvement hélicoïdal de la bulle entre la sortie de la filière et les rouleaux pinceurs, avec un pas d'hélice constant dans le temps.

Une augmentation du débit ou une diminution de la température de l'air de refroidissement entraîne aussi une modification de la géométrie de la bulle.

Ces instabilités engendrent des variations dimensionnelles du film (épaisseur et largeur de la bulle) qui rendent délicat le conditionnement du film (bobinage) mais d'où découlent également des variations significatives des propriétés finales incompatibles avec les exigences du marché.

3.2.3. Le refroidissement de la gaine

L'air qui a servi pour le gonflage est emprisonné à l'intérieur de la bulle et se réchauffe rapidement, sa participation au processus de refroidissement du film est presque négligeable. Lorsque le débit est élevé, il faut accélérer le refroidissement, par apport d'air entre la filière et les rouleaux pinceurs. La gaine, en sortie de filière, subit un refroidissement accéléré par le passage dans un courant d'air forcé créé par des anneaux de refroidissement. Leur action peut être complétée par des cylindres refroidisseurs, mis en place après le banc de tirage.

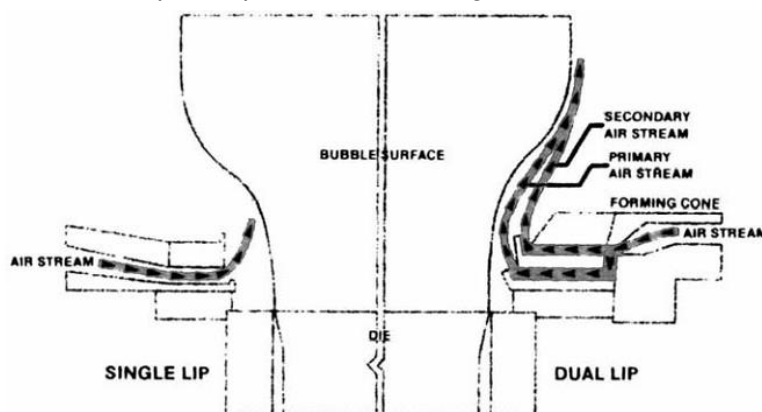


Figure 12 Schéma anneau d'air simple et double flux (Blown Film Extrusion an Introduction [28])

Les anneaux simples flux sont encore utilisés sur les lignes les moins récentes. Leur conception est rudimentaire : ils sont constitués d'une chambre creuse et d'une petite ouverture circonférentielle, plus ou moins orientée vers le haut, servant à projeter l'air vers la bulle.

Les lignes de production modernes utilisent un anneau de refroidissement double flux. Ce type d'anneau scinde l'écoulement d'air en deux à partir d'une alimentation unique. Le débit provenant de l'orifice inférieur se mélange à celui provenant de l'orifice supérieur, ce qui crée un effet Venturi puissant qui attire encore plus la bulle vers le cône de formation interne accélérant ainsi le gonflement de la bulle. Ce gonflement rapide a aussi pour conséquence d'amincir rapidement le film et donc de faciliter encore plus son refroidissement. L'utilisation d'air refroidi est courante mais implique de maîtriser la température pour éviter la création de vapeurs.

Certains producteurs de film PVC-P utilisent aussi un système de refroidissement interne (*Internal Bubble Cooling system, IBC*) qui permet de remplacer l'air situé à l'intérieur de la bulle par de l'air à basse température en continu [28].

Un refroidissement efficace permet d'augmenter la productivité car la bulle est plus rapidement stable. Il permet aussi de minimiser les pertes de transparence résultant de la formation de la phase cristalline.

3.2.4. Tirage et bobinage de la gaine

La bulle est rabattue progressivement sur elle-même au travers d'une cage en forme de de A. Le guidage est effectué par un cadre équipé de rouleaux métalliques ou plastique. Il est aussi possible d'utiliser un cadre métallique sur lequel circule une lame d'air de façon à ne pas endommager le film.

Le film passe ensuite entre des rouleaux pinceurs. La vitesse des rouleaux est pilotée par un système de contrôle qui permet d'obtenir le taux d'étirage souhaité. Le film passe enfin au travers d'un banc de tirage à rouleaux verticaux ou à rouleaux horizontaux.

Le banc doit aussi maintenir une tension uniforme afin de ne pas étirer de façon hétérogène le film. Le film est ensuite orienté vers le bas de la tour de soufflage de gaine afin d'être bobiné.

Les lignes d'extrusion gonflage permettent aussi de réaliser des opérations sur les films avant leur bobinage (voir extrusion cast film).

L'utilisation d'un banc oscillant évite d'avoir recours à une filière oscillante, le banc ainsi que les rouleaux pinceurs décrivent une lente rotation (autour de l'axe de la filière), ce qui permet de distribuer les défauts d'épaisseur sur la totalité de la largeur du film et d'homogénéiser les légères

variations d'épaisseurs pouvant engendrer la formation de défauts d'enroulement. La rotation du banc de tirage implique un système permettant la descente du film sans que celui-ci ne soit déformé par la rotation du pinceur.

Les systèmes de bobinage utilisés pour du film obtenu par extrusion gonflage sont similaires à ceux utilisés pour le film obtenu par extrusion cast. La différence est que la gaine étant la superposition de deux épaisseurs de film, elle est séparée par des couteaux à l'entrée du système d'enroulement. Chaque partie est ensuite enroulée séparément, les systèmes d'enroulement sont donc doubles, ils permettent de produire simultanément deux séries de bobines.

3.2.5. Systèmes de contrôle en ligne

Les lignes d'extrusion gonflage de film PVC-P les plus anciennes ne sont pas équipées de système de contrôle en ligne, les bobines sont pesées à la sortie de l'enrouleuse. Cela permet, en fonction de la densité du film de contrôler l'épaisseur du film. Le taux d'étirage, le taux de gonflage et la vitesse de rotation des extrudeuses sont ajustés afin d'atteindre les dimensions souhaitées. Un désavantage majeur de cette méthode est que la distance entre la bobine et la filière peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et donc, en cas de variations importantes d'épaisseur, les longueurs de films à éliminer sont importantes. Afin d'y remédier, les systèmes de mesure récents sont maintenant installés directement au niveau de la bulle, ce qui permet d'effectuer des ajustements beaucoup plus rapidement. L'instrument de mesure pivote autour de la bulle. La mesure d'épaisseur peut être effectuée par Infrarouge ou par évaluation de la capacitance ou à l'aide de rayons (X ou Gama). Il existe aussi des systèmes de mesures après la mise à plat de la bulle. Ces dispositifs sont similaires à ceux utilisés pour le film obtenu par extrusion cast, la différence est qu'ils mesurent le film en double épaisseur.

Afin d'assurer un contrôle encore plus précis, il est maintenant possible de modifier le débit d'air en sortie d'anneau de refroidissement ainsi que sa distribution circonferentielle. En effet, certains anneaux de refroidissement comportent plus de 300 vannes réparties de façon circonferentielle. En cas de variation locale d'épaisseur, l'ouverture des vannes peut être ajustée avec précision de façon à obtenir un film homogène [26].

3.3 Modélisation

L'objectif de la modélisation est de permettre une meilleure compréhension du procédé afin de prévoir l'évolution de la géométrie, de la température et des contraintes développées à l'intérieur du film. Des modèles de calculs existent pour les deux méthodes d'extrusion film. Ce type de modélisations est moins répandu que celles réalisées en injection, mais peut apporter beaucoup dans la compréhension des phénomènes et l'amélioration des performances.

3.4 Comparaison des deux procédés

3.4.1. Avantages du procédé de soufflage de gaine

- Meilleure homogénéité des caractéristiques mécaniques dans le sens transverse et le sens longitudinal : les propriétés d'impact des films obtenus par cette technique sont donc plus importantes, à épaisseur égale que celles des films obtenus par extrusion à plat.
- Faible dimension de la filière : en effet, pour produire un film possédant une largeur de 2,5 m par extrusion à plat, il est nécessaire d'utiliser une filière de 2,6 m. Par contre, en utilisant la technique de soufflage de gaine avec un taux de gonflement de 3, il faut utiliser une filière de 0,265 m de diamètre.
- propriétés barrières et des propriétés mécaniques en traction le faible taux de refroidissement (par air) a pour effet de créer des films possédant un plus haut degré de cristallinité ou encore possédant une taille d'entités cristallines plus grande amélioration de ces propriétés.
- Moins énergivore : les filières d'extrusion à plat entraînent de fortes pertes thermiques.

3.4.2. Avantages du procédé cast

- Utilisation formulation de PVC est très visqueuse (haut K-wert) : avec le procédé d'extrusion gonflage il est plus difficile de produire du film avec une formulation très visqueuse.
- Meilleure étirabilité sens travers : le film n'étant que étiré dans un seul sens.
- Meilleure transparence : En extrusion gonflage, le faible taux de refroidissement (par air) a pour effet de créer des films possédant un plus haut degré de cristallinité ou encore possédant une taille d'entités cristallines plus grande, le film est moins translucide
- Haute précision en épaisseur : les filières de soufflage de gaine ne permettent pas de réglage de l'entrefer en sortie de filière et elles ne possèdent pas de lèvres d'ajustements. En effet, même sur une bulle stable, un film produit par soufflage de gaine présente en général une plus grande variabilité d'épaisseur qu'un film produit par extrusion à plat.
- Démarrage plus rapide : le démarrage d'une ligne de soufflage de gaine est plus compliqué que celle d'une ligne d'extrusion à plat. En effet, le temps de stabilisation de la bulle est relativement long et les différents ajustements sont délicats.
- Moins d'encombrement : les lignes de soufflage nécessitent une hauteur sous plafond importante. Cependant certains fabricants de film étirable PVC utilisent des lignes d'extrusion horizontales [28], elles permettent d'avoir une infrastructure beaucoup moins haute, et des manipulations beaucoup plus faciles.

Conclusion

Les développements des techniques de formulation et d'extrusion du film en PVC plastifié ont peu évolués depuis les 20 dernières années.

Les innovations technologiques récentes portent sur l'optimisation du refroidissement, sur le contrôle continu de l'épaisseur et sur l'augmentation de la productivité par baisse de l'épaisseur du film.

Les domaines d'évolution sont : l'automatisation plus poussée des systèmes de bobinage du film PVC, car c'est encore un secteur où il y a beaucoup de manipulations ou d'actions manuelles et le développement et l'emploi des méthodes de modélisation

Cette faible évolution est expliquée du fait que la production de film en PVC plastifié soit un secteur de niche, les constructeurs d'appareils de formulation et de production, ainsi que les producteurs de résine et d'additifs ne cherchent pas à développer des produits spécifiques à ce secteur. Alors chaque entreprise de production de film en PVC plastifié développe ses propres innovations, mais ils ne bénéficient pas d'un développement global.

L'avantage de cette faible évolution est que les entreprises maîtrisent maintenant parfaitement les procédés de fabrication ce qui permet au secteur du film PVC plastifié de rester très compétitif.

Bibliographie

- [1]. **ZUMDAHL Steven S.** Chemical Principe 6ème ed. [ouvrage] 2009. (Part 1.5 Polyvinyl Chloride: Real-World Chemistry).
- [2]. **HRUSKA Z., SALIN C., GUESNET P.** AM3325 Poly(chlorure de vinyle) ou PVC [article]. Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites. Juillet 2007.
- [3]. **TROTIGNON J.-P.** Précis de matière plastique Structure propriétés mise en œuvre et normalisation 5^{ème} édition [ouvrage]. Edition AFNOR – NATHAN. 1994.
- [4]. **SEVENSTER F.** Le PVC Données Techniques [ouvrage]. Syndicat des producteurs de matières plastiques. Septembre 1995.
- [5]. **WILKES C. E., DANIELS C. A.** PVC Handbook [ouvrage]. Hanser Verlag. 2005. (Part 10 Flexible PVC).
- [6]. **STARK T.D., CHOI H., DIEBEL P.** Plasticizer Retention in PVC Geomebranes [article]. Geosynthetics International. 2005, Vol. 12 N°1 (11 pages).
- [7]. **SUMMERS J.** Lubrication Mechanism in Poly(Vinyl Chloride) Compounds: Understanding Three Distinct Roles of Lubricants [article]. P3Consultants, Inc. – ANTEC, 2006, p. 2882-2886 (5 pages)
- [8]. **CARETTE L.** AM 3 236 : Antistatiques, Lubrifiants, Antichocs [article] Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites. 2000.
- [9]. **TITOW W. V.** PVC Technology Fourth Edition [ouvrage]. Elsevier Applied science publishers. 1984.
- [10]. **BRAUN D.** Poly(vinyl chloride) on the Way of the 19th Century to the 21st Century [article]. Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry. 2004. Vol. 42, n° 3, 578-586 (9 pages).
- [11]. **NASS I.-L., HEIBERGER C.-A.** Encyclopedia of PVC. Volume 3. Compounding processes, product design, and specifications [ouvrage]. Marcel Dekker, inc., 1993, Vol. 3.
- [12]. **CHEREMISINOFF N.P.** Handbook of Polymer Science and Technology Volume 3: Application and Processing operations. Dekker, 1989, p. 373-417.
- [13]. **HUGO C.** LVM (INEOS) assistance technique pour le PVC [Présentation].
- [14]. **OSSWALD T.A.** Polymer processing Fundamentals [ouvrage]. Hanser. 2006.
- [15]. **VERGNES B., PUISSANT S.** AM 3 650 : Extrusion monovis [ouvrage]. Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites. 2002.
- [16]. **WHITE J. POTENTE H.** Screw Extrusion [ouvrage]. Hanser. 2003.
- [17]. **BUSS.** Kneader Technology for PVC Pelletizing [En ligne]. 2008 [Consulté le 05/12/2011]. <http://www.busscorp.com/documents/database/seiten/52640/Buss_pvc.pdf>.
- [18]. **VERGNES B., CHAPET M.** AM 3 653 : Extrusion Procédés d'extrusion bvis [ouvrage]. Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites. 2002.
- [19]. **SHIH C., DENELSBECK D., Latimer S. L.** Characterization of the Twin Screw Extrusion Process [article]. E. I. du Pont de Nemours and Co. – ANTEC, 2006, p. 995-999 (5 pages).
- [20]. **NASS I.-L. ; GROSSMANr F.-R.** Encyclopedia of PVC: conversion and fabrication processes [ouvrage]. Marcel Dekker, inc.1998,Vol. 1.
- [21]. **RAUWENDAAL C.** Polymer Extrusion [ouvrage]. Hanser. 2001.
- [22]. **DARLEY D.** Polymer Filtration Options: Screen Changers or Large Area [En ligne]. 3rd International Polymer Filtration Conference, Stuttgart, Germany. 2004 [Consulté le 05/12/2011]. <<http://www.extrusionauxiliary.com/filtration.html>>.
- [23]. **KOSTIC M.** Encyclopedia of Chemical Processing, Design of Extrusion Dies [article]. Taylor & Francis Group. 2006.
- [24]. **SILAGY D.** AM3707 Extrusion de film à plat : cast film [article]. Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites. Octobre 2005.
- [25]. **GRAJEWSKI F. STIEGLITZ H.** Extruding Plasticised PVC Film [En ligne]. Research & development Innovations at KraussMaffei. 2003 [Consulté le 05/12/2011]. <http://www.krauss-maffei.de/en/site_185/> .
- [26]. **GAMACHE E.** AM3702 Soufflage de gaine [article]. Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites. Avril 2010.
- [27]. **ELF ATO Chimie.** Fabrication par extrusion soufflage, Dossier technique [ouvrage]. 2001.
- [28]. **CANTOR K.** Blown Film Extrusion an Introduction [ouvrage]. Hanser 2006.