



HAL
open science

Fonctionnement et utilisation des co-malaxeurs

Lucas Sardo, Bruno Vergnes

► **To cite this version:**

Lucas Sardo, Bruno Vergnes. Fonctionnement et utilisation des co-malaxeurs. Techniques de l'Ingénieur, 2021, AM 3 670, pp.1-18. hal-04058029

HAL Id: hal-04058029

<https://hal.science/hal-04058029>

Submitted on 4 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fonctionnement et utilisation des co-malaxeurs

Operation and use of co-kneaders

par **Lucas SARDO**

Docteur en Mécanique numérique et Matériaux de PSL Research University
Sciences Computers Consultants, Sophia-Antipolis (France)

Bruno VERGNES

Conseiller scientifique, CEMEF, MINES ParisTech, Sophia-Antipolis (France)

Résumé

Dans le domaine du mélange en continu, l'extrusion bivis est parfois concurrencée par l'utilisation de co-malaxeurs, qui sont des extrudeuses monovis dotées d'une cinématique et d'une géométrie très particulières. Dans cet article, la configuration d'un co-malaxeur sera présentée en détail. Son mode de fonctionnement (cinématique de la vis, rôle des doigts de malaxage, mode d'écoulement, etc.) sera ensuite explicité. L'influence des paramètres opératoires sur la température, le taux de remplissage et les temps de séjour sera alors décrite, avant d'introduire quelques aspects concernant la modélisation des écoulements dans ces extrudeuses particulières.

Abstract

In the field of continuous mixing, twin-screw extrusion sometimes faces competition from the use of co-kneaders, which are single-screw extruders but with very special kinematics and geometry. In this article, the configuration of a co-kneader will be first presented in details, explaining its operating mode (kinematics of the screw, role of the mixing pins, flow conditions, etc.). The influence of the processing parameters on temperature, filling ratio and residence time will then be discussed, before introducing some aspects concerning the modeling of flow in these particular extruders.

Mots-clés : Extrusion, Mélange

Keywords: Extrusion, Mixing

Table des matières

1	<i>Présentation générale</i>	3
1.1	Principe de base du co-malaxeur	3
1.2	Gammes de fonctionnement	4
1.3	Exemples d'utilisation	5
2	<i>Géométrie et mode de fonctionnement</i>	5
2.1	Description fonctionnelle et géométrique des éléments constitutifs	5
2.1.1	Eléments de transport	5
2.1.2	Eléments de mélange	6
2.1.3	Eléments associés aux bagues de restriction	6
2.1.4	Doigts de malaxage	7
2.1.5	Autres éléments	7
2.2	Mode de fonctionnement	8
2.2.1	Oscillation de la vis et trajectoires des doigts de malaxage	8
2.2.2	Définition d'un profil de vis	10
2.2.3	Mécanismes de fusion	11
2.2.4	Mécanismes de mélange	11
3	<i>Influence des paramètres opératoires</i>	13
3.1	Taux de remplissage	13
3.2	Température	14
3.3	Distribution de temps de séjour	14
3.4	Effets de la géométrie du co-malaxeur	16
4	<i>Modèles d'écoulement</i>	17
4.1	Modèles 1D	18
4.2	Modèles de réseau et modèles 2D	20
4.3	Modèles 3D	23
5	<i>Conclusion</i>	26
6	<i>Glossaire</i>	27
7	<i>Sigles, notations et symboles</i>	27

Introduction

Chaque jour, de nouveaux matériaux polymères sont créés pour répondre à des besoins de plus en plus spécifiques, tels que des matériaux allégés, plus résistants, ignifuges, antistatiques et qui respectent les nouvelles normes environnementales. Ces matériaux complexes nécessitent des outils de mélange efficaces, permettant une fabrication contrôlée et compétitive. Parmi les procédés de mélange en continu, les extrudeuses baxis sont très utilisées, mais les co-malaxeurs tiennent aussi une place importante. Un co-malaxeur est une extrudeuse monovis modulaire, animée d'un double mouvement de rotation et d'oscillation d'avant en arrière. Les filets de la vis sont interrompus de place en place et des doigts de malaxage sont fixés sur le fourreau. La cinématique mise en jeu permet à ces doigts de balayer les chenaux de vis en passant à travers les interruptions de filets, ce qui provoque un mélange très efficace, tout en ayant des taux de cisaillement en moyenne relativement faibles, induisant peu d'échauffement. Les co-malaxeurs sont donc généralement utilisés dans le cas de polymères thermosensibles, comme le PVC, ou lorsque des taux de charge importants sont nécessaires. Dans cet article, nous allons d'abord présenter en détail la configuration d'un co-malaxeur, en explicitant son mode de fonctionnement, très

différent de celui d'une extrudeuse monovis classique. On s'intéressera à la cinématique de la vis, au rôle des doigts de malaxage, aux modes d'écoulement, etc. L'influence des paramètres opératoires sera ensuite abordée, avant d'introduire quelques aspects concernant la modélisation des écoulements dans ces extrudeuses particulières.

1 Présentation générale

Le co-malaxeur est une extrudeuse particulière, inventée en 1945 par Heinz List et initialement commercialisée par la société suisse Buss AG. Le co-malaxeur est en fait composé de deux unités d'extrusion (Figure 1) : le co-malaxeur proprement dit, outil de mélange privilégié, et une unité de reprise, en général constituée d'une extrudeuse monovis, destinée à lisser le débit pulsé dû au mouvement oscillant de la vis du co-malaxeur (cf. paragraphe 2.1.1) et à mettre le matériau en pression au niveau de la filière fixée à son extrémité. Dans cet article, l'accent sera mis uniquement sur la partie co-malaxeur. Nous renvoyons le lecteur aux articles [AM3650] et [AM3651] pour tout ce qui concerne l'extrudeuse monovis de reprise.

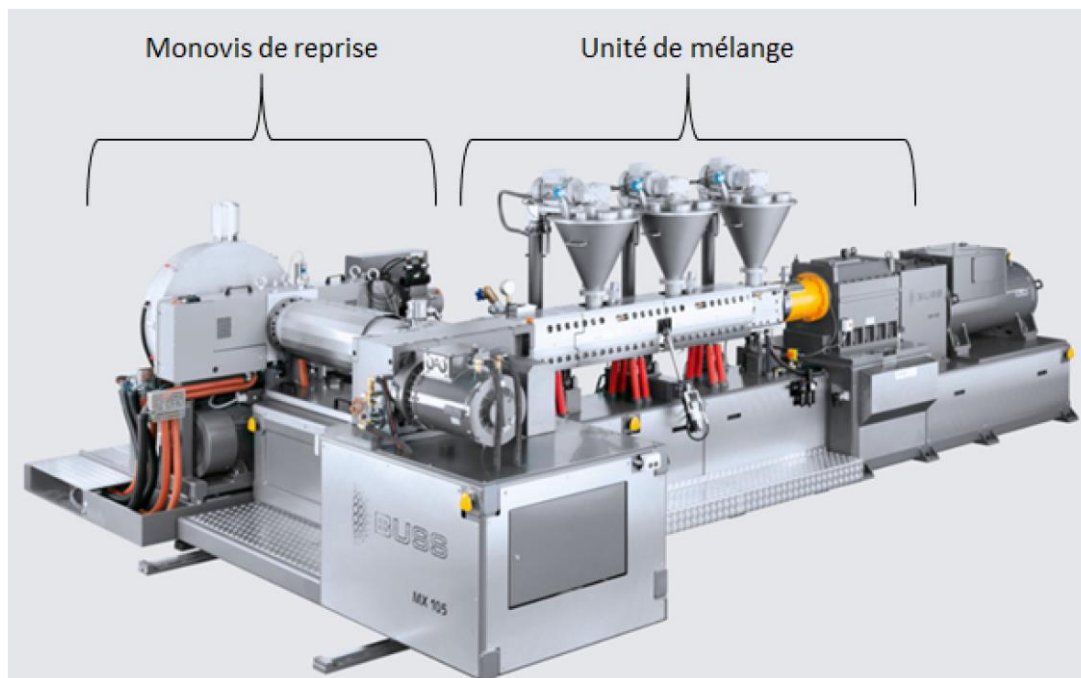


Figure 1 - Vue générale d'un co-malaxeur (d'après documentation Buss AG)

1.1 Principe de base du co-malaxeur

Le co-malaxeur peut être considéré comme une extrudeuse monovis mais, contrairement aux machines « classiques », celle-ci se différencie par une géométrie modulaire faite d'éléments interchangeables, la présence d'interruptions dans les filets de vis, la présence de doigts de malaxage fixés sur la face intérieure du fourreau (Figure 2) et un mouvement oscillatoire de la vis qui se superpose à son mouvement de rotation. Les éléments constitutifs du co-malaxeur sont essentiellement des éléments de transport et des éléments de mélange. A la manière d'une extrudeuse bi-vis (cf. l'article [AM3653]), il fonctionne essentiellement en sous-remplissage, c'est-à-dire avec un débit imposé par un doseur, volumétrique ou pondéral. Les éléments de transport ne sont donc souvent que partiellement remplis. Grâce aux interruptions de filet, à la présence des doigts de malaxage et à l'oscillation de la vis, le matériau passe régulièrement de chenaux en chenaux, ce qui est très efficace pour le mélange, aussi bien dispersif que distributif (cf. l'article [AM3636]).



Figure 2 - Co-malaxeur ouvert, montrant la vis avec les interruptions de filet et les doigts de malaxage fixés sur le fourreau [1]

1.2 Gammes de fonctionnement

Les machines proposées par les différents fabricants vont de la taille laboratoire (diamètre $D = 30$ mm, rapport longueur/diamètre $L/D = 8$ à 25) à la taille industrielle (diamètre $D = 750$ mm, rapport longueur/diamètre $L/D = 9,5$). Le pas de la vis peut varier tout au long du co-malaxeur, mais il est en général inférieur au diamètre (cf. tableau 1). Les vitesses de rotation maximales varient selon la taille : elles vont de 800 tr/min pour les machines de laboratoire jusqu'à 70 tr/min pour les plus grandes tailles. Les débits obtenus dépendent bien sûr de l'application choisie. A titre d'exemple, la Figure 3 montre la gamme de débit accessible en fonction du diamètre de vis, pour deux productions très différentes, celles de compounds PVC et de chewing-gum. Dans les deux cas, et comme c'est souvent le cas en extrusion monovis, le débit augmente en moyenne comme le cube du diamètre.

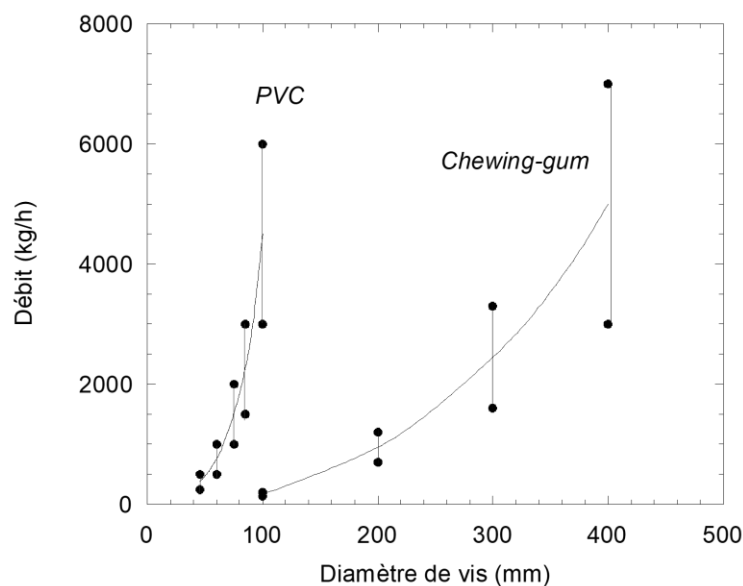


Figure 3 - Gamme de débit en fonction du diamètre de vis pour deux types

d'application (d'après données Buss AG)

1.3 Exemples d'utilisation

Comme on l'a vu dans le paragraphe précédent, les applications des co-malaxeurs sont multiples. Historiquement, ces machines ont été largement utilisées pour la fabrication de compounds PVC. Dans le domaine des câbles électriques, on a vu ces dernières années le remplacement du PVC par des compounds HFFR (Halogen Free, Flame Retardant), qui sont à base de polyoléfines ou d'élastomères fortement chargés en produits non halogénés (jusqu'à 65% en masse). Ces matériaux sont pour la plupart réalisés sur des co-malaxeurs. De manière générale, on retrouve des co-malaxeurs dès que l'on a affaire à des matériaux très chargés, comme des masterbatches colorés ou des polymères conducteurs chargés de noir de carbone. Dans le domaine alimentaire, ils interviennent dans la fabrication de bonbons ou de chewing-gum. Une autre application importante est la réalisation d'anodes pour l'industrie électrique à partir de pâtes carbonées. On peut encore citer la préparation de propergols ou d'encre pour toner, ainsi que des applications en extrusion réactive (polymérisation radicalaire, greffage, etc.) ou dans le domaine du recyclage.

2 Géométrie et mode de fonctionnement

Comme on l'a dit précédemment, le co-malaxeur, comme les extrudeuses bi-vis, a une structure modulaire, constituée d'éléments placés les uns à la suite des autres sur un arbre cannelé. Les fourreaux sont chemisés et constitués de deux demi-coquilles. Ils peuvent s'ouvrir aisément pour avoir accès à la vis et changer les chemises. Les chemises ont des perforations pour permettre leur fixation sur le fourreau (via des doigts de malaxage « plats ») et l'installation des doigts de malaxage qui vont favoriser le mélange. Elles peuvent être aisément changées quand leur usure devient importante ou lorsque l'on souhaite supprimer une bague de restriction (§ 2.1.3).

2.1 Description fonctionnelle et géométrique des éléments constitutifs

Ces éléments sont de deux types principaux : transport et mélange.

2.1.1 Éléments de transport

Les éléments de transport sont nommés EZ (*Einzuglemente*, en allemand). Ils sont composés d'un seul filet, avec une interruption (Figure 4). Leur rôle est essentiellement de convoier le matériau le long du co-malaxeur. La Figure 4b montre une vue déroulée de cet élément, après mise à plat de la géométrie. Elle permet de mieux visualiser le chenal d'écoulement et la position des doigts fixés sur le fourreau. Les cercles représentent les positions potentielles des doigts de malaxage, les cercles noirs étant celles qui sont réellement utilisées. Pour les positions non utilisées (cercles blancs), les doigts sont remplacés par des bouchons (cf. paragraphe 2.1.4). Pour cet élément, il y a deux rangées de doigts utilisables, avec une position possible du doigt par rangée.

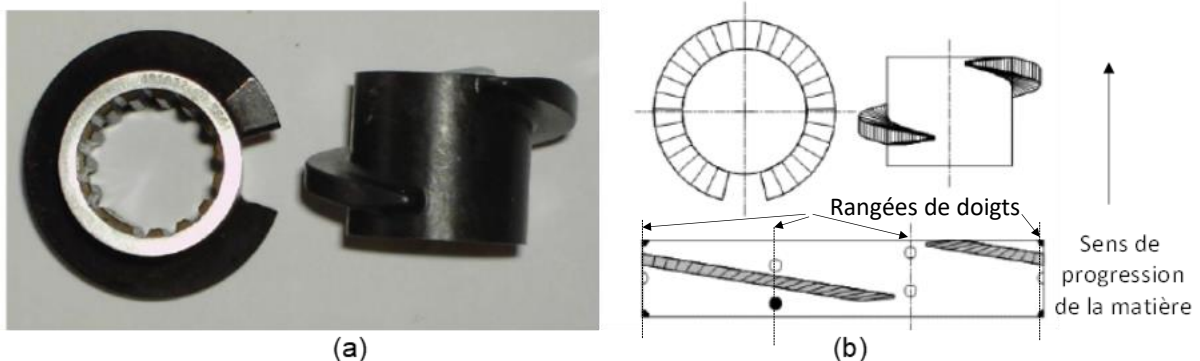


Figure 4 - (a) Photo d'un élément de convoyage, de face et de profil [1] ; (b) représentation schématique et vue déroulée [2]

2.1.2 Eléments de mélange

Ils sont généralement nommés KN ou KE (*Knetelemente*, en allemand). Ce sont des éléments à double filet, avec trois interruptions par filet (Figure 5). Toutes ces interruptions de filets permettent des séparations et recombinaisons multiples des flux, ce qui est très efficace pour le mélange distributif. Ces éléments sont combinés avec la présence possible de six doigts de malaxage sur le fourreau, deux par rangée, comme indiqué par les cercles noirs sur la Figure 5b. La largeur des interruptions de filet peut varier suivant les éléments et, plutôt que de filet interrompu, on parlera d'« ailettes » pour décrire ces géométries. Il y a donc trois ailettes par section sur un élément de mélange classique. Par contre, les dernières évolutions de co-malaxeurs proposent des éléments à quatre ailettes, avec quatre rangées de doigts de malaxage, qui permettent en théorie d'utiliser des vitesses de rotations supérieures avec moins d'échauffement et d'atteindre donc de plus hauts débits.

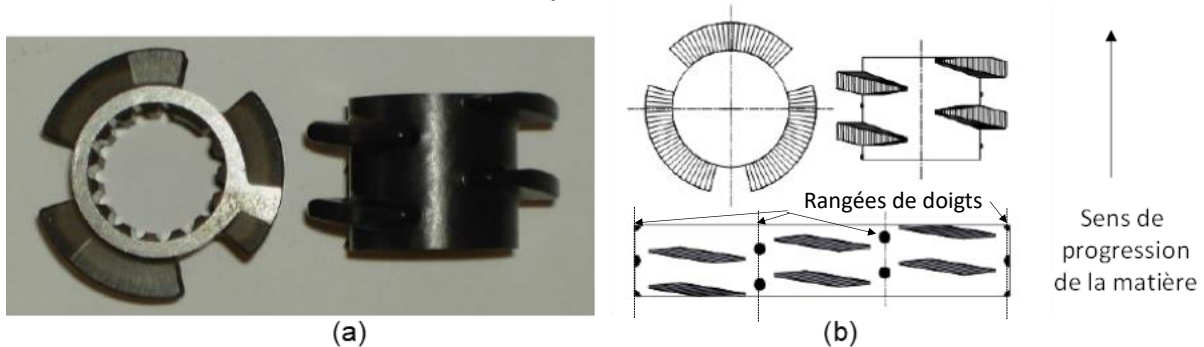


Figure 5 - (a) Photo d'un élément de mélange, de face et de profil [1] ; (b) représentation schématique et vue déroulée [2]

2.1.3 Eléments associés aux bagues de restriction

Comme le co-malaxeur fonctionne en n'étant que partiellement rempli, il est nécessaire en certains endroits d'imposer un remplissage complet, par exemple pour améliorer ou imposer la fusion et/ ou favoriser le mélange. Ceci est obtenu en insérant entre deux éléments de fourreau une bague de restriction (Figure 6), qui va localement réduire la section de passage.

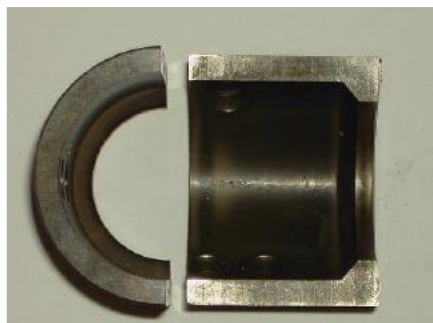


Figure 6 - Photo d'une bague de restriction, de face et de profil [1]

Un élément de vis particulier doit être associé à cette bague de restriction. Appelé ST (*Stauringelemente*, en allemand), il est similaire à un élément de mélange suivi d'un élément de transport, les deux parties étant séparées par une zone sans filet qui se trouve en vis-à-vis de la bague de restriction installée sur le fourreau (Figure 7).

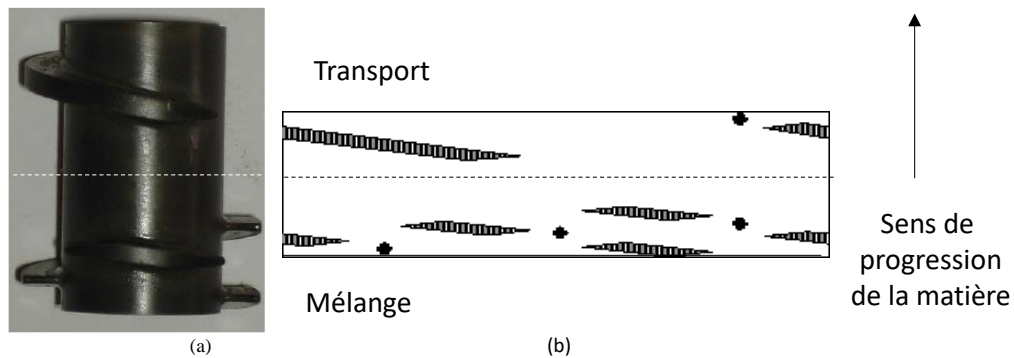


Figure 7 - (a) Photo d'un élément bague de restriction [1] ; (b) vue déroulée [3]

2.1.4 Doigts de malaxage

Le fourreau du co-malaxeur possède trois rangées de trous, situées à 120° les unes des autres dans une section transversale, dans lesquels sont fixés les doigts de malaxage. Il existe différents types de doigts de malaxage (Figure 8). Ils ont une forme cylindrique pour les machines de laboratoire et trapézoïdale pour les machines industrielles. Comme indiqué sur les Figures 4 et 5, selon le type d'éléments, certaines positions peuvent accueillir des doigts de malaxage, alors que d'autres doivent impérativement rester libres afin de permettre la rotation de la vis. Là où les doigts de malaxage ne sont pas requis, des doigts plats sont utilisés comme bouchon. Des doigts percés ou adaptés peuvent aussi être mis en place, pour injecter des liquides ou pour servir de capteurs. Il existe aussi des doigts dits « de demi-hauteur », pour limiter le cisaillement ou améliorer le convoyage en zone d'alimentation [1]. Des doigts plats peuvent aussi être utilisés à la place de doigts de malaxage « normaux » ou « demi-hauteur » pour réduire le cisaillement. Le rôle précis des doigts de malaxage sera explicité au paragraphe 2.2.

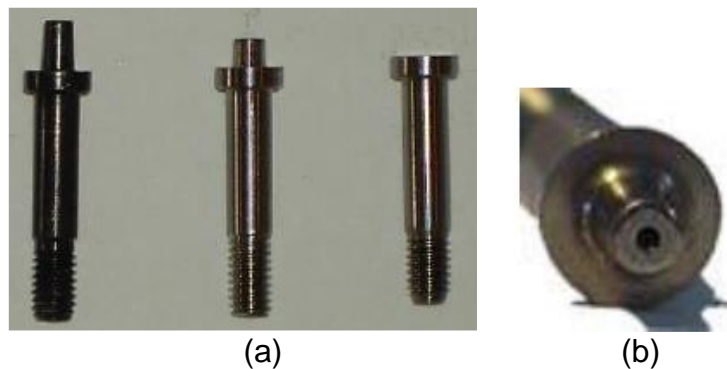


Figure 8 - (a) Photos de doigts de malaxage. De gauche à droite : doigt normal, doigt de demi-hauteur, doigt bouchon [1] ; (b) doigt percé permettant l'injection d'un liquide [1]

2.1.5 Autres éléments

D'autres éléments, beaucoup plus rarement utilisés, sont également disponibles. Citons par exemple le cas d'un filet à pas inverse, ou, pour une même géométrie, d'un filet plus ou moins épais ou plus ou moins haut. On peut aussi signaler les éléments GS (*Gangschliesselemente*, en allemand) qui sont une variante des éléments de mélange KE. Ils ont aussi un double filet, mais l'un compte trois interruptions alors que l'autre n'en compte qu'une. Ils ont pour rôle de réduire significativement les écoulements retour lorsque la vis avance, tout en assurant un mélange efficace (Figure 9).

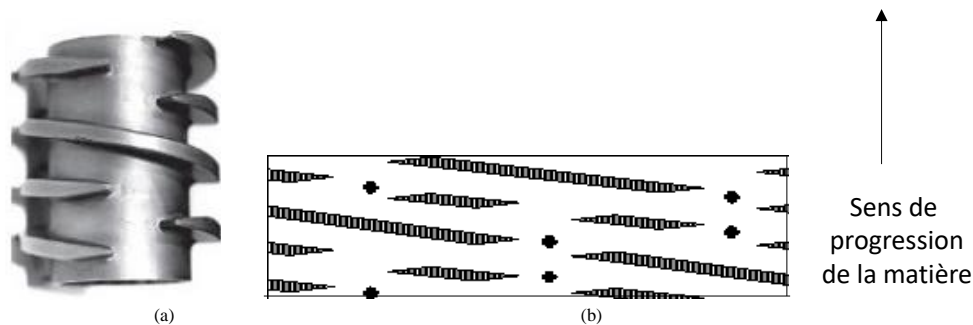


Figure 9 - (a) Photo d'un élément GS [3] ; (b) vue déroulée [3]

A titre d'exemple, le Tableau 1 présente les dimensions des principaux éléments d'un co-malaxeur de laboratoire Buss MK30.

Tableau 1 - Dimensions des éléments d'un co-malaxeur Buss MK30

Élément	EZ	EZ (1,5)	KE	KE (0,5)	ST
Diamètre extérieur (mm)	30	30	30	30	30
Hauteur de filet (mm)	5	5	5	5	5
Longueur de l'élément (mm)	18	27	18	9	36
Angle de filet (°)	9,8	16,0	6,3	6,3	-
Largeur du chenal (mm)	15,3	24,1	6,5	6,5	-
Nombre maximum de doigts de malaxage	2	2	6	3	4

2.2 Mode de fonctionnement

La particularité du co-malaxeur est sa cinématique originale, combinant un mouvement de rotation et des oscillations axiales. C'est ce mode de fonctionnement très particulier que nous allons maintenant expliciter.

2.2.1 Oscillation de la vis et trajectoires des doigts de malaxage

La Figure 10 présente la configuration typique d'un co-malaxeur, avec filets de vis interrompus et présence de trois rangées de doigts de malaxage trapézoïdaux. A chaque rotation, la vis fait un aller-retour dont la course Z peut être décrite par une fonction sinusoïdale :

$$Z(t) = A \cos \omega t$$

avec A l'amplitude (m),
 ω la fréquence (rad/s),
 t le temps (s).

La fréquence d'oscillation ω est reliée à la vitesse de rotation par :

$$\omega = 2\pi \frac{N}{60}$$

avec N la vitesse de rotation (tr/min).

L'amplitude de l'oscillation correspond à la moitié de la distance entre deux doigts de malaxage, soit environ 15% du diamètre du co-malaxeur.

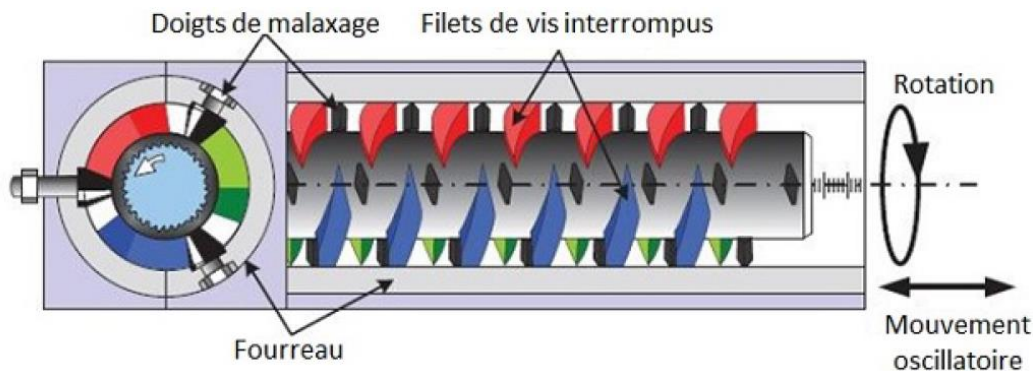


Figure 10 - Schéma de principe du fonctionnement d'un co-malaxeur (d'après documentation Buss AG)

La Figure 11 illustre les trajectoires des doigts de malaxage pendant une rotation, par rapport à un segment de filet de vis, qui est représenté en ombré. La géométrie de la vis et du fourreau a été déroulée et l'écoulement se fait de droite à gauche. Après un quart de tour, le doigt (vert, par exemple) a tangentié la paroi gauche du filet de vis ombré (c'est-à-dire le flanc de filet qui pousse) et le matériau qui est passé entre le doigt et le flanc de filet a été fortement cisailé. Après un autre quart de tour, c'est la paroi droite du filet qui est tangentiée et les autres doigts repoussent le matériau dans le chenal de vis précédent, ce qui provoque un mélange distributif efficace. À 270°, la paroi inférieure gauche du filet est tangentiée et, lorsque le tour de vis complet est terminé, c'est au tour de la paroi inférieure droite de l'être. Ce processus est le même pour tous les segments de filets et, en fin de compte, dans les éléments de mélange (KE), toute la surface des chenaux est balayée par les doigts, ce qui donne un caractère auto-nettoyant au procédé.

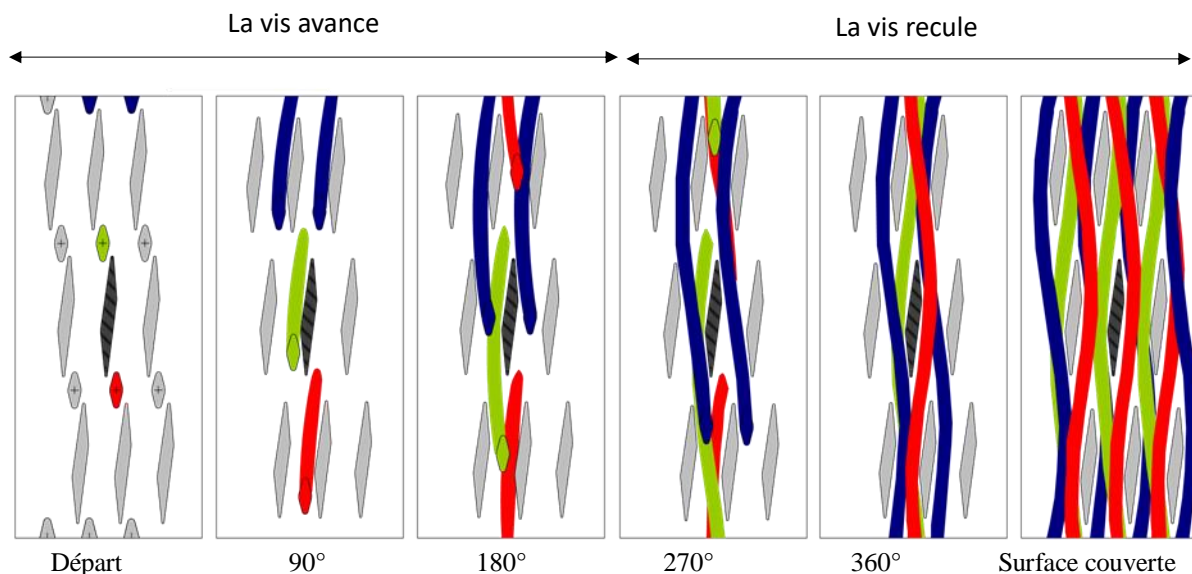


Figure 11 - Trajectoire des doigts de malaxage dans un élément de mélange au cours d'une rotation (d'après documentation Buss AG)

Une des fonctions principales des doigts de malaxage est de créer un cisaillement entre le doigt lui-même et le flanc de filet des éléments de vis (Figure 12). Ce taux de cisaillement peut être estimé par :

$$\dot{\gamma} = \pi \frac{D}{s} \frac{N}{60} \quad (1)$$

avec $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement (s^{-1}),
 D le diamètre de la vis (m),
 s la distance entre le doigt de malaxage et le flanc de filet (m).
 s dépend de la forme du doigt de malaxage et de la taille du co-malaxeur.

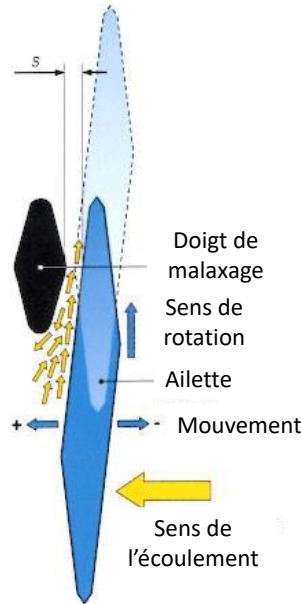


Figure 12 - Ecoulement de la matière entre un doigt de malaxage et une ailette d'un élément de mélange (d'après documentation Buss AG)

2.2.2 Définition d'un profil de vis

Le profil de vis du co-malaxeur sera bien sûr dépendant de l'application choisie. On peut toutefois définir quelques notions générales que l'on va retrouver quel que soit le matériau fabriqué. Comme on peut le voir à la Figure 13, le co-malaxeur est généralement divisé en plusieurs zones fonctionnelles, séparées les unes des autres par des bagues et des éléments de restriction (ST). Chaque zone comprend des éléments de transport (EZ), suivis par des éléments de mélange (KE). Le remplissage de ces éléments de mélange est assuré par les bagues de restriction situées en aval. Le fourreau comporte plusieurs ouvertures destinées à l'incorporation de la matrice et des charges (1, 2 et 3) ou au dégazage (4). Au droit de ces ouvertures, on trouve des éléments de transport partiellement remplis et donc sans pression. En général, la matrice est introduite en zone 1 ou 2 et fondue ou plastifiée dans les éléments de mélange situés en fin de zone. Les charges sont alors introduites en zone 3, dans la matière fondue, et dispersées dans les zones de mélange suivantes. L'ouverture 4 permet si nécessaire d'effectuer un dégazage ou d'introduire une charge supplémentaire.

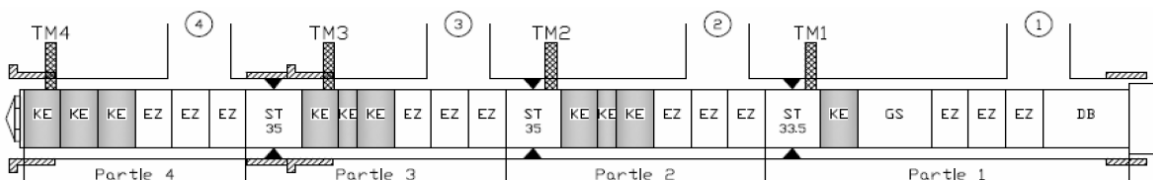


Figure 13 - Représentation schématique d'une configuration de co-malaxeur. La matière progresse de la droite vers la gauche. Les triangles noirs représentent les bagues de restriction. TM1 à TM4 représentent des thermocouples insérés dans des doigts creux

Le mouvement oscillatoire de la vis fait que le débit sortant est pulsé, ce qui ne permet

pas d'installer une filière directement en sortie du co-malaxeur. Pour réguler ce débit, on utilise le plus souvent une extrudeuse monovis de reprise, généralement placée en cascade à 90° du co-malaxeur (cf. Figure 1). Cette extrudeuse, qui n'est que partiellement remplie, va amortir les oscillations de débit et créer la mise en pression nécessaire à l'écoulement dans la filière et les systèmes de tirage ou granulation situés en aval. Dans certains cas, cette extrudeuse de reprise pourra être remplacée par une pompe à engrenage assumant le même rôle.

2.2.3 Mécanismes de fusion

Si les mécanismes de fusion sont bien connus pour l'extrusion monovis (voir l'article [AM3650]), c'est moins le cas pour l'extrusion bivis (voir les articles [AM3652] et [AM3653]) et également pour les co-malaxeurs. Seules quelques références sont disponibles dans ce domaine. Lyu et White [4] ont étudié la fusion de polypropylène et de polyéthylène sur un co-malaxeur de 46 mm de diamètre. Ils ont constaté que la fusion démarre en amont de la première bague de restriction, lorsque les chenaux commencent à être totalement remplis. Elle est plus rapide dans les éléments de mélange (KE) que dans les éléments de transport (EZ). La présence de doigts de malaxage accélère le mécanisme de fusion, qui semble appartenir au mode dispersif, comme celui que l'on rencontre en extrusion bivis corotative : il n'y a pas de séparation nette entre les phases solides et fondues, et les granulés de polymère sont entourés de matière fondue. En raison de la dissipation visqueuse, leur diamètre diminue progressivement alors qu'ils progressent le long des chenaux, jusqu'à disparition complète. La longueur nécessaire à une fusion totale semble peu affectée par les valeurs de débit ou de vitesse de rotation, mais les études sont trop fragmentaires pour en tirer des conclusions définitives. Dans le cas du PVC en poudre, il semblerait que la gélification soit surtout contrôlée par la température locale, résultant du profil de vis et des conditions opératoires [1].

2.2.4 Mécanismes de mélange

Le co-malaxeur est réputé pour ses capacités de mélange, aussi bien sur le plan dispersif que distributif. Le mélange dispersif consiste à réduire la taille des matériaux que l'on veut disperser au sein d'une matrice polymère (charges minérales, fibres de verre ou de carbone, autre polymère, etc.) (voir l'article [AM3635]). Il est essentiellement contrôlé par les contraintes appliquées. Comme expliqué à la Figure 12, c'est entre les doigts de malaxage et les flancs de filet de vis que s'exercent ces contraintes. Comme les doigts balayent l'ensemble des chenaux au cours du mouvement de rotation/oscillation (voir Figure 11), c'est l'ensemble de la matière qui est soumise à ces contraintes. Le co-malaxeur permet donc d'appliquer un traitement homogène et très efficace en termes de mélange dispersif. A titre d'illustration, la Figure 14 montre l'évolution le long d'un co-malaxeur du diamètre d'agglomérats de carbonate de calcium dispersés dans une matrice polypropylène [5]. Le taux de charge est de 25% en masse et deux profils de vis ont été testés dans des conditions identiques (210°C, 200 tr/min), le profil B contenant beaucoup plus d'éléments de mélange (KE). On constate une évolution rapide de la taille des agglomérats, suivie d'une stabilisation lorsqu'une taille critique a été atteinte. Comme attendu, le profil B est le plus efficace.

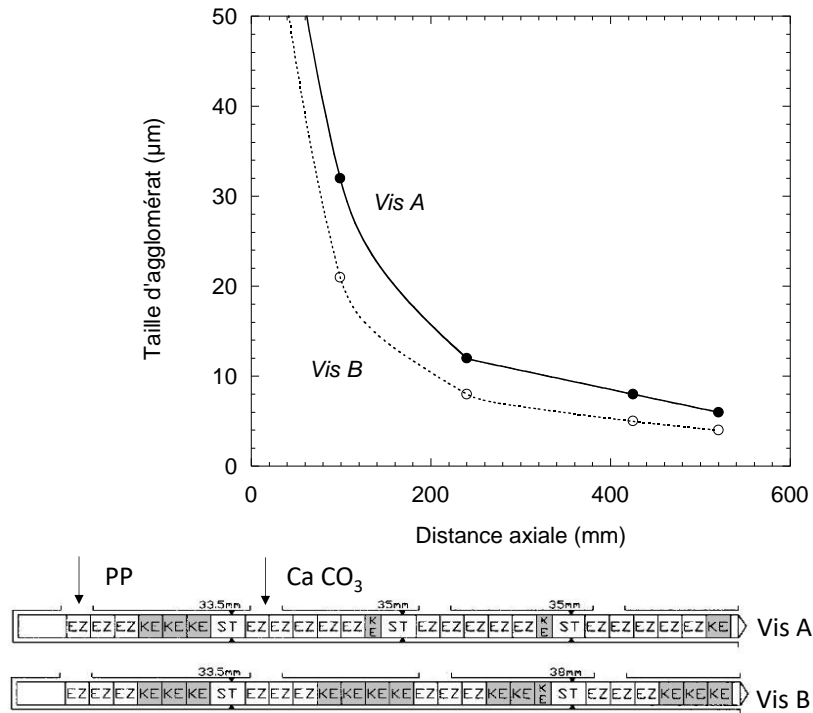


Figure 14 - Evolution de la taille d'agglomérats de carbonate de calcium le long d'un co-malaxeur, pour deux profils de vis (adapté de [5]). L'écoulement s'effectue de gauche à droite.

L'autre aspect du mélange est le mélange distributif, qui consiste à homogénéiser la répartition des charges au sein de la matrice. Ici, c'est la cinématique complexe des écoulements et le passage de la matière d'un chenal à l'autre à travers les interruptions de filet qui vont donner son efficacité au co-malaxeur. La séparation et la recombinaison des écoulements permet d'augmenter l'aire interfaciale et donc le mélange distributif : l'écoulement est en permanence divisé et recombinaison par les ailettes et les doigts de malaxage, ce qui mélange constamment les éléments fluides, entraînant la réorientation des interfaces. Elemans et Meijer [6] ont proposé les expressions suivantes pour calculer ce nombre de réorientations n_r , suivant le taux de remplissage des éléments considérés :

$$n_r = \frac{1}{40} \frac{p \pi^2 D^2 H \tan \varphi N}{Q_v} \left(1 - n_f \frac{e}{\pi D \sin \varphi} \right) \text{ pour les éléments remplis,}$$

$$n_r = \frac{1}{40} \frac{p \pi D H L_f N}{Q_v} \left(1 - n_f \frac{e}{\pi D \sin \varphi} \right) \text{ pour les éléments non remplis.}$$

- avec
- p le nombre de doigts de malaxage,
 - H la profondeur du chenal (m),
 - φ l'angle de filet ($^\circ$),
 - n_f le nombre de filets,
 - e la largeur du filet (m),
 - N la vitesse de rotation (tr/min),
 - Q_v le débit volumique (m^3/s),
 - L_f la longueur remplie (m).

Ces expressions montrent que la qualité du mélange distributif est proportionnelle à la vitesse de rotation et inversement proportionnelle au débit : pour un élément de géométrie donnée, le mélange distributif dépend donc directement du rapport N/Q .

Considérons par exemple l'élément KE d'un co-malaxeur Buss PR46, avec une

longueur de 27 mm et un diamètre de 46 mm. Il comporte six doigts de malaxage, deux filets, avec une profondeur de chenal de 7 mm, une largeur de filet de 3,5 mm et un angle de filet de 10,5°. A une vitesse de 240 tr/min et un débit de 20 kg/h (soit environ 5,5 cm³/s), le nombre de réorientations vaut :

$$n_r = \frac{1}{40} \frac{6 \times \pi^2 \times (46 \times 10^{-3})^2 \times (7 \times 10^{-3}) \times \tan 10,5 \times 240}{5,5 \times 10^{-6}} \times (1 - 2 \times 0,133)$$

= 131 pour un élément rempli et

$$n_r = \frac{1}{40} \frac{6 \times \pi \times (46 \times 10^{-3}) \times (7 \times 10^{-3}) \times (13,5 \times 10^{-3}) \times 240}{5,5 \times 10^{-6}} \times (1 - 2 \times 0,133)$$

= 65 pour un élément rempli à 50%.

On voit donc que le mélange distributif est d'autant meilleur que les éléments sont remplis. C'est pour cette raison que l'on place en général une bague de restriction en fin de zone de mélange, afin d'assurer un remplissage optimal de celle-ci.

3 Influence des paramètres opératoires

Dans cette section, nous allons passer en revue les principaux résultats issus de travaux expérimentaux concernant les paramètres que l'on peut mesurer lors du fonctionnement d'un co-malaxeur.

3.1 Taux de remplissage

Comme le co-malaxeur est alimenté par un ou plusieurs doseurs, il fonctionne en n'étant que partiellement rempli, comme une extrudeuse bivis. Il est donc important de connaître le taux de remplissage et de savoir quelles zones sont remplies pour bien appréhender son fonctionnement. Pour cela, on effectue en général des essais interrompus, au cours desquels le co-malaxeur est brutalement arrêté en cours de fonctionnement, puis ouvert pour avoir accès à la matière. La Figure 15 montre l'effet du débit sur le remplissage d'un co-malaxeur de laboratoire de diamètre 30 mm, alimenté en polypropylène [7]. Le remplissage est complet en amont des zones restrictives (bagues de restriction et filière). Les éléments de mélange (KE) sont le plus souvent remplis, ce qui n'est pas le cas des éléments de transport (EZ). Le taux de remplissage augmente avec le débit à vitesse de rotation constante et il diminue lorsque la vitesse augmente à débit constant. La température de régulation du fourreau semble avoir peu d'influence sur le taux de remplissage.

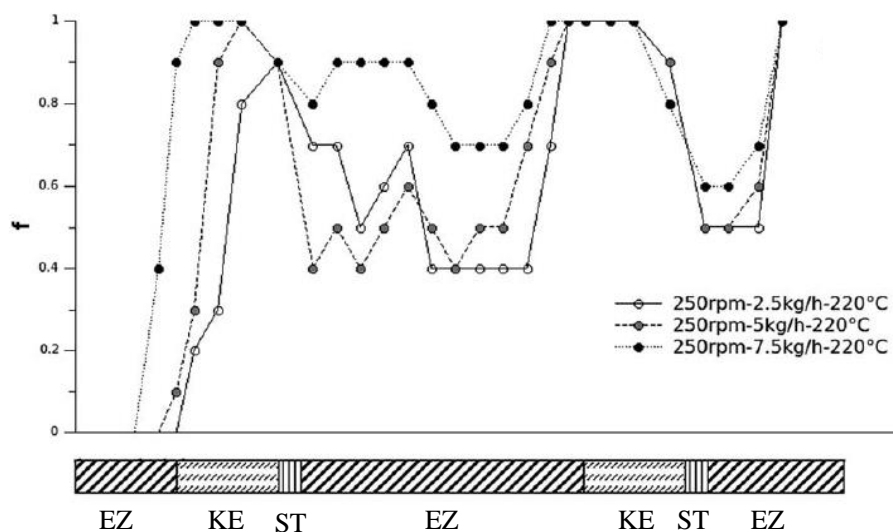


Figure 15 - Evolution du taux de remplissage le long d'un co-malaxeur, pour différents débits à vitesse de rotation constante [7]. L'écoulement se fait de gauche à droite

3.2 Température

La température le long du co-malaxeur peut être mesurée grâce aux doigts percés dans lesquels on peut insérer des thermocouples (voir paragraphe 2.1.4). De manière générale, elle est mieux contrôlée qu'en extrusion bivis car non seulement le fourreau mais aussi la vis sont régulés par des circulations de fluide caloporteur. La Figure 16 montre les profils de température mesurés sur un co-malaxeur Buss MDK 46, de diamètre 46 mm, extrudant du polypropylène avec un débit de 16,6 kg/h à différentes vitesses de rotation entre 100 et 300 tr/min [4]. On constate que le profil est relativement plat, avec une augmentation très progressive de la température tout le long du profil. La température finale augmente de 182°C à 204°C lorsque la vitesse passe de 100 à 300 tr/min, ce qui reste relativement limité. Comme en extrusion bivis, à vitesse de vis constante, la température finale décroît lorsque le débit augmente.

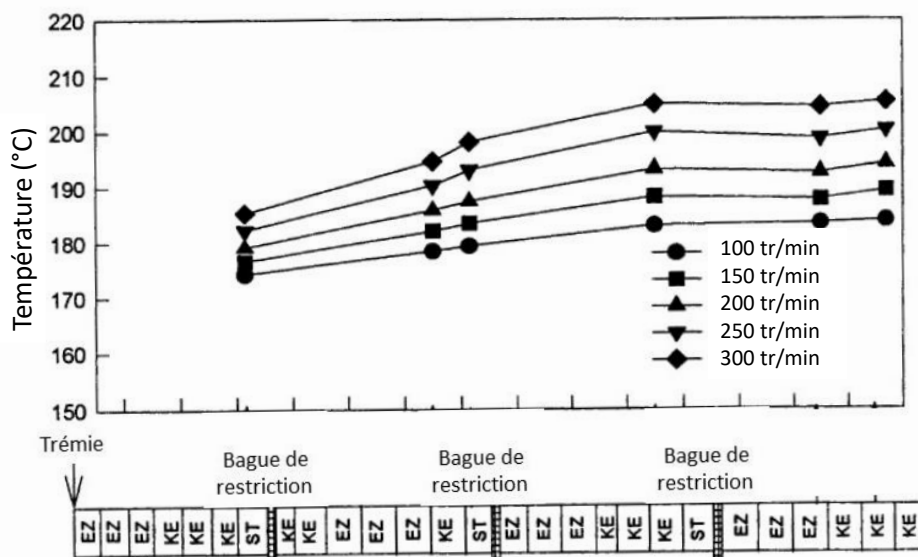


Figure 16 - Evolution de la température matière le long d'un co-malaxeur, pour différentes vitesses de rotation à débit constant (d'après [4]). L'écoulement se fait de gauche à droite

3.3 Distribution de temps de séjour

Comme le co-malaxeur présente certaines similarités avec les extrudeuses bivis corotatives (indépendance du débit et de la vitesse de rotation, remplissage partiel, avec alternance de zones remplies et de zones non-remplies), on peut penser que ces deux procédés auront des comportements voisins en termes de distribution de temps de séjour (DTS). C'est bien ce que l'on constate à la Figure 17, où sont tracées les DTS mesurées à l'aide d'un traceur coloré sur un co-malaxeur de 46 mm de diamètre, pour différents débits et différentes vitesses de rotation [8]. Lorsque le débit augmente, la DTS est décalée vers les temps plus courts et sa largeur diminue. Lorsque la vitesse augmente, la DTS est également décalée vers les temps courts, mais sa forme n'est quasiment pas modifiée. On remarque également que l'effet du débit est beaucoup plus marqué que celui de la vitesse de rotation.

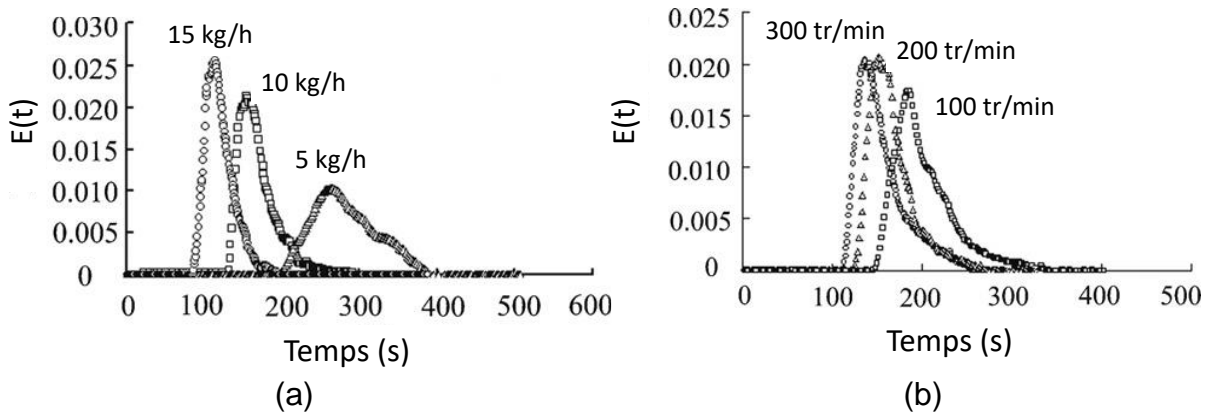


Figure 17 - Influence (a) du débit (à 200 tr/min) et (b) de la vitesse de rotation (à 10 kg/h) sur la distribution de temps de séjour (d'après [8])

Ces résultats s'expliquent par un comportement différent suivant que l'on considère une zone remplie ou non-remplie. Dans les zones remplies, le temps de séjour moyen peut s'écrire :

$$\bar{t}_r = \frac{\rho \mathcal{V}}{3600 Q} \quad (2)$$

avec \bar{t}_r le temps de séjour moyen (s),
 ρ la masse volumique (kg/m³),
 \mathcal{V} le volume de la zone considérée (m³),
 Q le débit (kg/h).

Dans les zones non-remplies, le temps moyen est obtenu en divisant la longueur de la trajectoire par la vitesse moyenne de l'écoulement :

$$\bar{t}_{nr} = \frac{L}{\bar{V}}$$

avec \bar{t}_{nr} le temps de séjour moyen (s),
 L la longueur de l'écoulement (m),
 \bar{V} la vitesse moyenne (m/s).

Compte tenu de la complexité de l'écoulement, le temps de séjour moyen \bar{t}_{nr} n'est pas facile à expliciter. Par contre, comme la zone n'est pas remplie, il n'y a pas de pression et l'écoulement est simplement dû au cisaillement créé par le mouvement de la vis. On peut donc en conclure que la vitesse moyenne est proportionnelle à la vitesse de rotation N . Par conséquent :

$$\bar{t}_{nr} = \frac{C}{N} \quad (3)$$

avec C une constante dépendant de la géométrie de l'élément considéré.

Le temps de séjour moyen dans le co-malaxeur est donc obtenu en sommant les expressions (2) et (3) sur les différentes zones remplies et non-remplies du profil de vis :

$$\bar{t} = \sum_i \bar{t}_r + \sum_j \bar{t}_{nr} = \sum_i \frac{\rho \mathcal{V}_i}{3600 Q} + \sum_j \frac{C_j}{N} = \frac{A}{Q} + \frac{B}{N} \quad (4)$$

avec i le nombre d'éléments remplis
 j le nombre d'éléments non-remplis

A, B des constantes ne dépendant que de la géométrie du co-malaxeur.

L'expression (4) montre qu'une augmentation de la vitesse de rotation ou du débit se traduit bien par une diminution du temps de séjour moyen. De plus, comme le temps passé en zone remplie est bien plus long que celui passé en zone non-remplie, cela explique aussi le rôle plus marqué joué par le débit par rapport à la vitesse de rotation. On peut également constater que la viscosité du matériau extrudé n'apparaît pas dans l'expression (4). Le fait que le temps de séjour moyen est indépendant de la viscosité a été validé expérimentalement [7].

La détermination théorique des constantes A et B n'est pas évidente. Pour remédier à cela, nous proposons une méthode simple, fondée sur l'expérimentation [9]. Pour une configuration fixée du co-malaxeur, il suffit de mesurer, à un débit Q donné, les temps de séjour moyens \bar{t}_1 et \bar{t}_2 pour deux vitesses de rotation N_1 et N_2 . Cela peut se faire par différentes méthodes, mais l'utilisation de traceurs colorés est la plus simple à mettre en œuvre. On a alors :

$$A = Q \frac{N_2 \bar{t}_2 - N_1 \bar{t}_1}{N_2 - N_1}$$

$$B = N_1 N_2 \frac{\bar{t}_1 - \bar{t}_2}{N_2 - N_1}$$

Testée sur un co-malaxeur Buss PR46 avec deux configurations géométriques différentes, cette méthode a permis de prédire des temps de séjour moyens sur une plage de 50 à 300 s avec une précision de l'ordre de 10%.

Considérons un co-malaxeur Buss PR46, avec un diamètre de 46 mm et un rapport L/D de 15. A 10 kg/h, on a mesuré un temps de séjour moyen de 200 s à 100 tr/min et de 140 s à 285 tr/min. On a donc :

$$A = 10 \times \frac{(285 \times 140) - (100 \times 200)}{285 - 100} = 1075,7$$

$$B = 100 \times 285 \times \frac{200 - 140}{285 - 100} = 9243,2$$

Le temps de séjour moyen s'écrit donc :

$$\bar{t} = \frac{1075,7}{Q} + \frac{92343,2}{N}, \text{ avec } \bar{t} \text{ en s pour } Q \text{ en kg/h et } N \text{ en tr/min.}$$

Pour, par exemple, 20 kg/h et 150 tr/min, on obtient donc $\bar{t} = 53,8 + 61,6 \approx 115$ s. Le temps de séjour mesuré expérimentalement dans ces conditions était de 100 s.

3.4 Effets de la géométrie du co-malaxeur

Un co-malaxeur de taille donnée peut être utilisé avec des longueurs variables puisque vis et fourreaux sont modulaires. Pour illustrer ce point, nous prenons l'exemple d'un co-malaxeur Buss PR 46, de diamètre 46 mm, pouvant être utilisé suivant des rapports longueur/diamètre de 11 et 15 (Figure 18). Ce co-malaxeur est utilisé pour disperser du noir de carbone dans une matrice polyamide/Pebax[®] [10]. La matrice est introduite en trémie 1 ($L/D=15$) ou 2 ($L/D=11$), et le noir de carbone en trémie 3. On s'intéresse principalement à l'évolution des températures mesurées aux points TM2 et TM4 en fonction de la quantité de noir de carbone, pour des conditions de fonctionnement identiques (20 kg/h, 280 tr/min, température de vis 230°C, température du fourreau

270°C en zone 1 et 240°C en zone 2).

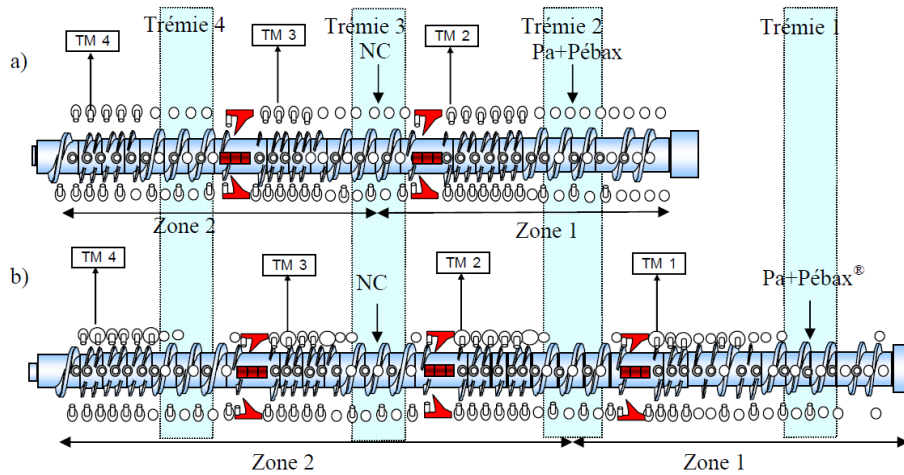


Figure 18 - Configurations du co-malaxeur pour (a) $L/D = 11$ et (b) $L/D = 15$ [10]

Les résultats sont présentés Figure 19. Au point TM2, c'est-à-dire avant l'introduction du noir de carbone, la température est bien sûr indépendante du taux de noir. Elle est plus élevée d'environ 7°C pour la configuration $L/D = 15$, ce qui s'explique par un nombre presque deux fois plus élevé d'éléments de mélange. En sortie de co-malaxeur (point TM4), la température augmente quasi-linéairement avec le taux de noir de carbone, en raison de l'augmentation résultante de la viscosité du mélange. Elle est toujours plus élevée pour la configuration $L/D = 15$, avec cette fois des écarts de température allant de 15 à 25°C. Il a été montré que cette température plus élevée dans le cas de la configuration longue était favorable à l'obtention de propriétés de conductivité électrique du matériau chargé [10].

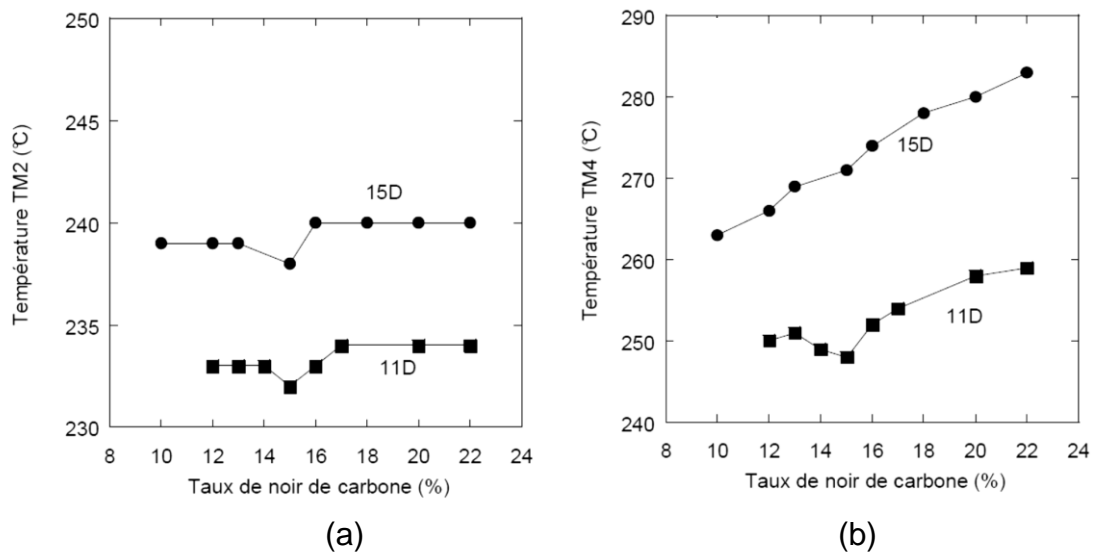


Figure 19 - Evolution de la température matière en fonction du taux de noir de carbone pour les deux rapports L/D . (a) au point TM2, (b) au point TM4 [10]

4 Modèles d'écoulement

Comme on vient de le voir, le co-malaxeur est un outil complexe et l'on comprend bien que la modélisation des écoulements pourrait être un outil intéressant pour mieux appréhender et optimiser le fonctionnement de ces machines. Le problème est cependant beaucoup plus difficile que pour les autres procédés d'extrusion (monovis, bivis co- ou contrarotatives) en raison des particularités déjà évoquées : mouvement

oscillant de la vis, interdisant une approche stationnaire, présence des interruptions de filet, trajectoire des doigts de malaxage, etc. Dans ce qui suit, nous allons présenter les différentes approches tirées de la bibliographie, en insistant sur les limites actuelles de ces modèles.

4.1 Modèles 1D

Un des premiers modèles d'écoulement dans un co-malaxeur a été proposé par Elemans et Meijer en 1990 [6]. Il considère, pour un fluide newtonien et isotherme, la présence des doigts de malaxage et des interruptions de filet, mais ne prend pas en compte le mouvement oscillant de la vis. Il est fondé sur les modèles classiques d'extrusion où le débit est la somme de termes de cisaillement et de termes de pression :

$$Q_v = (1 - \alpha) Q_d + Q_p + \varepsilon Q_{pin} - Q_L - Q_{LD}$$

avec	Q_v	le débit volumique du co-malaxeur (m ³ /s),
	Q_d	le débit de cisaillement (m ³ /s),
	Q_p	le débit de pression (m ³ /s),
	Q_{pin}	le débit dû aux doigts de malaxage (m ³ /s),
	Q_L	le débit de fuite au-dessus des filets (m ³ /s),
	Q_{LD}	le débit de fuite dans les interruptions de filet (m ³ /s),
	α	le rapport de forme des doigts de malaxage,
	ε	le paramètre d'efficacité des doigts de malaxage.

Ces différents débits s'expriment en fonction de la géométrie locale et des conditions de fonctionnement du co-malaxeur :

$$Q_d = f \frac{1}{120} \pi D N \cos \varphi H \pi D \sin \varphi F_d \left(1 - n_f \frac{e}{\pi D \sin \varphi} \right)$$

avec	f	le taux de remplissage,
	φ	l'angle de filet (°),
	H	la profondeur du chenal (m),
	F_d	un facteur de forme, dépendant du rapport H/W ,
	n_f	le nombre de filets,
	e	l'épaisseur du filet (m).

$$Q_p = - \frac{H^3}{12\eta} \pi F_p \frac{dP}{dz} \left[\sin \varphi \left(1 - n_f \frac{e}{\pi D \sin \varphi} \right) + \frac{1-r}{\sin \varphi} \right]$$

avec	η	la viscosité (Pa.s),
	F_p	un facteur de forme, dépendant du rapport H/W ,
	dP/dz	le gradient de pression (Pa/m),
	r	longueur relative de filet (longueur déroulée du filet sur longueur déroulée totale sans interruption, sur un tour)

$$Q_{pin} = \frac{\rho \pi D N H d_{pin}}{60}$$

avec	ρ	le nombre de doigts de malaxage,
	d_{pin}	le diamètre d'un doigt de malaxage.

Cette expression fait l'hypothèse que le doigt de malaxage crée un écoulement bouchon devant lui, c'est-à-dire qu'il déplace un volume de matière égal à son propre volume. Ce débit est toutefois pondéré par un paramètre d'efficacité ε , supposé proche de zéro et devant être déterminé expérimentalement. Des valeurs de 0,01 pour les éléments de transport (EZ) et de 0,1 à 0,2 pour les éléments de mélange (KE) ont été

proposées [6].

$$Q_L = \frac{1}{120} \pi^2 D^2 N \cos \varphi \sin \varphi F_d \delta r \left(1 - n_f \frac{e}{\pi D \sin \varphi} \right)$$

avec δ le jeu vis-fourreau (m).

$$Q_{LD} = \frac{1}{120} \pi^2 D^2 N \cos \varphi \sin \varphi F_d H(1-r) \left(1 - n_f \frac{e}{\pi D \sin \varphi} \right)$$

Ce modèle permet de calculer des relations pression/débit pour les différents types d'éléments (EZ et KE). Il a ensuite été complété pour prendre en compte un comportement non-newtonien et non-isotherme. La Figure 20 montre un exemple de résultats obtenus avec ce modèle 1D : évolutions de pression et de température, pour différentes vitesses de rotation et différentes températures initiales. Seules les zones de mélange sont remplies, avec une longueur qui diminue lorsque la vitesse augmente. Le profil de température a la même allure que celui mesuré expérimentalement à la Figure 16.

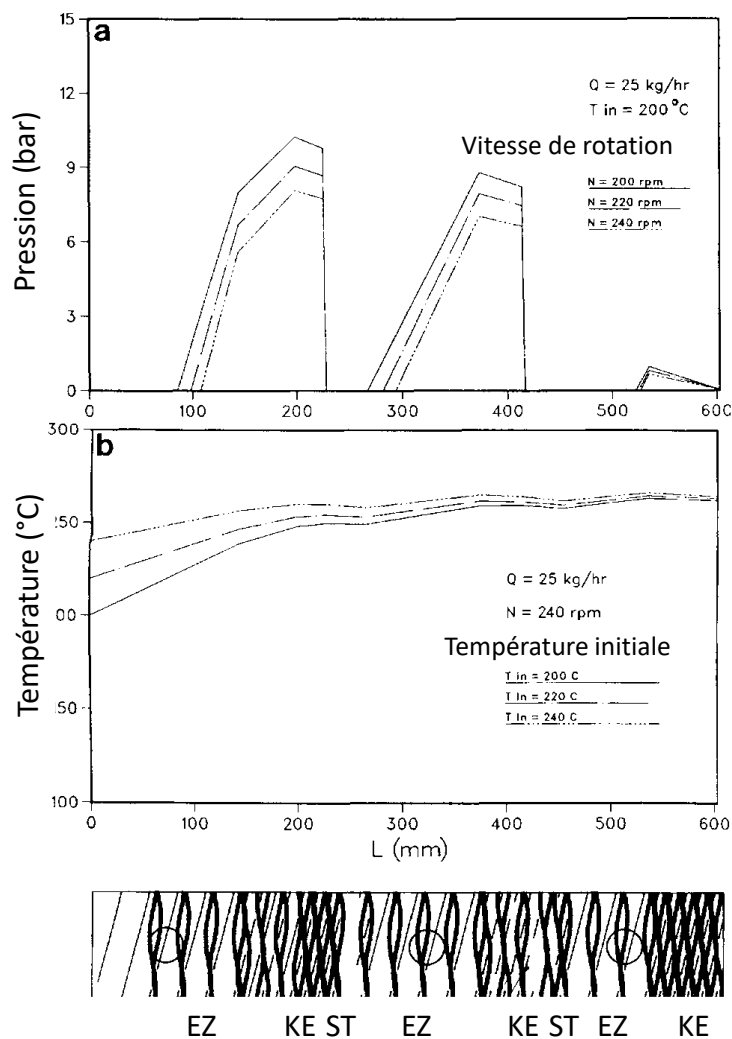


Figure 20 - Evolution de la pression (a) (à 25 kg/h et une température initiale de 200°C) et de la température matière (b) (à 25 kg/h et 240 tr/min) le long d'un co-malaxeur de diamètre 46 mm. Influence de la vitesse de rotation (a) et de la température initiale (b) (d'après [6])

4.2 Modèles de réseau et modèles 2D

Pour mieux prendre en compte les écoulements complexes au sein du co-malaxeur, des approches 2D ont ensuite été développées. Les modèles de réseau sont fondés sur la mise à plat de la géométrie et la prise en compte de deux types de débits : des débits dans la direction du chenal de vis, Q_I et Q_{II} , et un débit de fuite à travers les interruptions de filet Q_{leak} (Figure 21). Q_I est le débit entre deux filets de vis ininterrompus et Q_{II} celui au droit des interruptions de filet. La conservation du débit permet d'écrire :

$$Q_I = Q_{II} + Q_{leak}$$

Chaque débit est alors exprimé classiquement comme la somme d'un débit de cisaillement et d'un débit dû à la pression, ce qui permet d'arriver à un système d'équations ayant comme inconnues les valeurs de la pression dans les différents éléments de calcul. Cette approche permet de prendre en compte les oscillations de la vis et la présence des interruptions de filets, mais néglige la présence des doigts de malaxage.

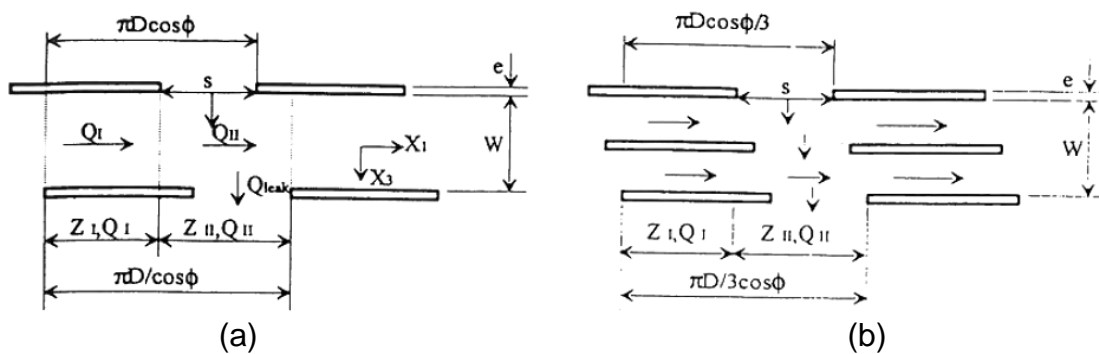


Figure 21 - Mise à plat et découpage (a) d'un élément de transport EZ et (b) d'un élément de mélange KE [11]

Pour aller plus loin, des méthodes plus précises ont ensuite été développées. Fondées sur des approches de type différences finies, elles consistent à effectuer un maillage de la géométrie déroulée à partir de cellules rectangulaires (Figure 22) et, pour chaque maille, d'écrire la conservation des débits, c'est-à-dire que la somme des débits entrants est égale à la somme des débits sortants [12]. Comme dans les méthodes de réseau, en exprimant chaque débit par des expressions classiques (cisaillement plus pression), on arrive ici aussi à un système d'équations en pression dont la résolution permet de décrire complètement les conditions d'écoulement.

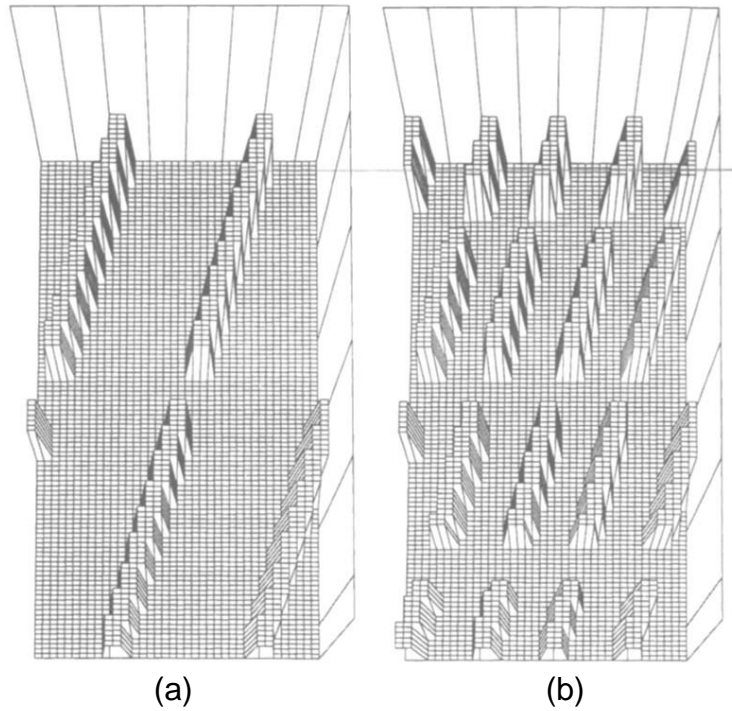


Figure 22 - Exemple de maillage (a) d'un élément de transport EZ et (b) d'un élément de mélange KE [12]

Ces méthodes permettent de prendre en compte la présence des interruptions de filet et des doigts de malaxage, mais aussi le mouvement oscillant de la vis, pour des matériaux non-newtoniens et non-isothermes. A titre d'exemple, la Figure 23 montre l'effet des doigts de malaxage sur la variation de débit au cours d'une oscillation : sans oscillation, ni doigts, le débit est bien sûr constant. Les oscillations créent comme l'on s'y attendait un débit lui-même oscillant, de forme sinusoïdale, dont la valeur moyenne est celle du débit sans oscillations. Enfin, la présence des doigts de malaxage perturbe ces oscillations, avec des variations beaucoup plus marquées. Ce sont ces variations qui imposent la présence d'une extrudeuse de reprise ou d'une pompe à engrenage à la sortie du co-malaxeur.

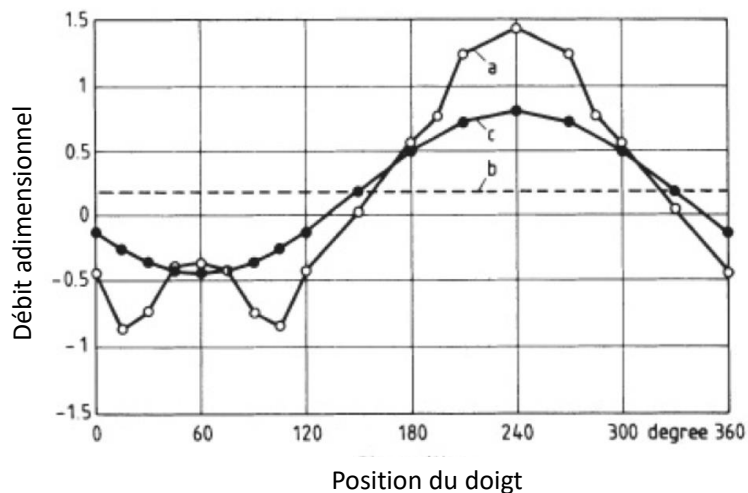


Figure 23 - Variation du débit au cours d'une rotation (de 0 à 360°) (a) avec oscillations et doigts de malaxage, (b) sans oscillation, ni doigts, (c) avec oscillations seules (d'après [13])

Ces calculs permettent également de tracer des courbes caractéristiques (débit

fonction de la perte de charge) pour les différents types d'éléments, en les supposant totalement remplis. La Figure 24 montre un exemple de résultats pour un fluide en loi-puissance d'indice $n = 0,6$, présentés en données adimensionnelles :

$$Q^* = \frac{60 Q}{2\pi N \cos \varphi W H}$$

$$P^* = \frac{\Delta P H^{n+1}}{K L} \left(\frac{60}{2\pi N \cos \varphi} \right)^n$$

avec ΔP la différence de pression dans l'élément (Pa),
 n l'indice de la loi-puissance,
 K la consistance (Pa.sⁿ),
 L la longueur axiale de l'élément.

Alors que les éléments de transport EZ et de mélange KE sont capables de créer de la pression, l'élément de restriction ST est seulement capable d'en consommer. La perte de charge qu'il crée augmente très fortement avec le débit, ce qui explique qu'il soit capable de remplir complètement les zones en amont. En raison d'une seule interruption de filet au lieu de trois, l'élément de transport EZ a des capacités de pompage plus élevées que l'élément de mélange KE.

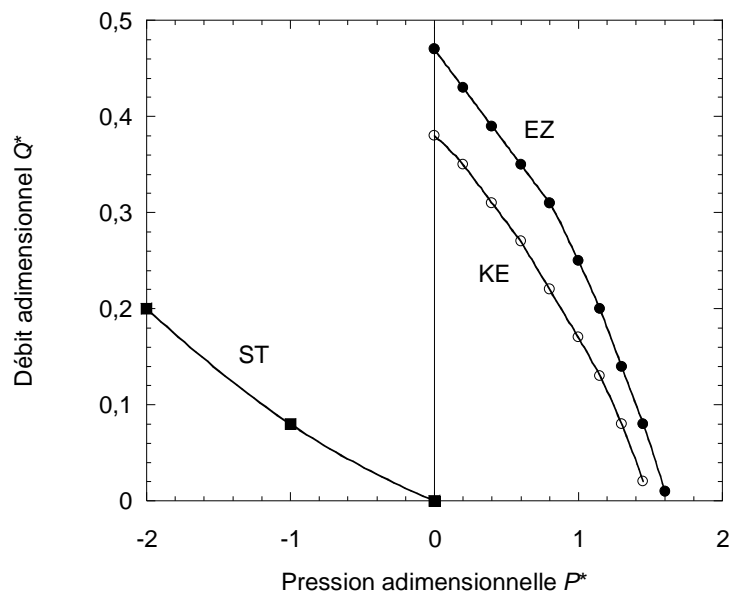


Figure 24 - Courbes caractéristiques en variables adimensionnelles des éléments de transport (EZ), de mélange (KE) et de restriction (ST), dans le cas d'un fluide en loi-puissance d'indice 0,6 (d'après [12])

A partir de ces courbes caractéristiques, il est ensuite possible de bâtir des modèles globaux du co-malaxeur, à l'image de ce qui a été fait pour les extrudeuses bivi-co ou contrarotatives (voir les articles [AM3652] et [AM3653]). Le co-malaxeur est découpé en tranches successives et, le débit étant fixé, les courbes caractéristiques permettent d'obtenir le gradient de pression local, et donc l'évolution de la pression le long du profil. La résolution de l'équation de la chaleur permet en parallèle de calculer l'évolution de la température moyenne le long du co-malaxeur. Un exemple de résultats est présenté Figure 25. Le calcul démarre après la fusion du matériau, c'est-à-dire après la première bague de restriction. Le remplissage est complet en amont des autres bagues, avec une mise en pression correspondante. D'un point de vue qualitatif, ces résultats sont proches de ceux présentés à la Figure 20 pour un modèle 1D.

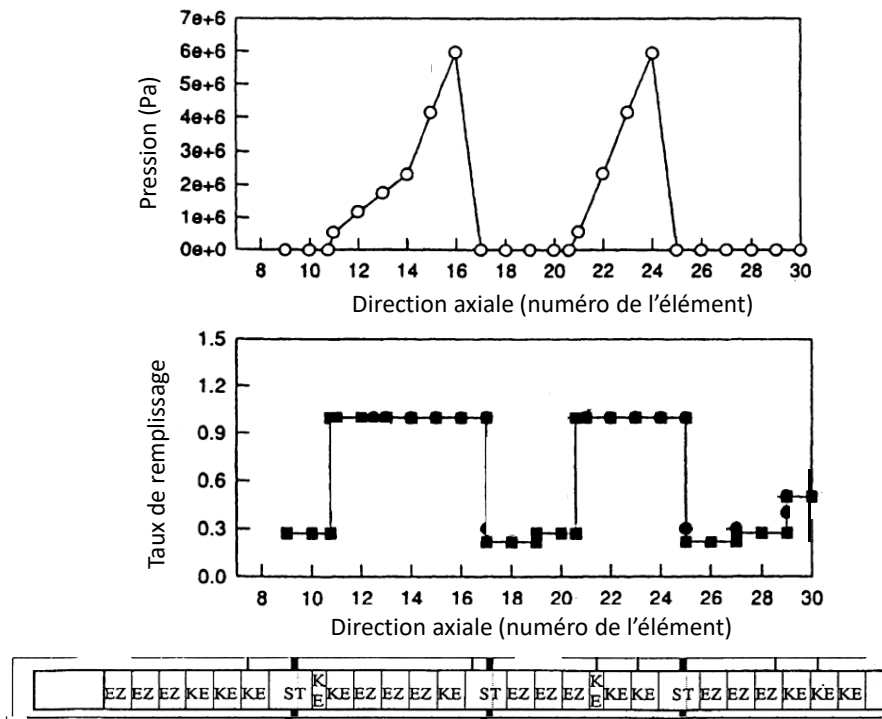


Figure 25 - Exemple de modèle global. Evolution de la pression (a) et du taux de remplissage (b) le long d'un co-malaxeur de diamètre 46 mm à 16,6 kg/h et 200 tr/min (d'après [14])

4.3 Modèles 3D

Les modèles de calcul les plus élaborés, fondés sur la méthode des éléments finis, ont été développés ces dernières années. Ils permettent de travailler sur la géométrie réelle ou une géométrie déroulée, mais avec la prise en compte de toutes les particularités du co-malaxeur : cinématique réelle de la vis, géométrie précise des différents éléments de vis, présence des doigts de malaxage avec leur vraie géométrie, etc. Ces modèles permettent d'accéder à de nombreuses informations sur les conditions d'écoulement mais, à l'heure actuelle, sont limités à des taux de remplissages complets du co-malaxeur. Ils peuvent donc fournir des données locales, mais ne sont pas adaptés à la description de l'ensemble du procédé, dont on a vu précédemment qu'il n'était que partiellement rempli.

La Figure 26, tirée de la thèse de Brito Bazan [2], montre un exemple de l'intensité de la vitesse dans un élément de mélange au cours d'une rotation. Lorsque le doigt de malaxage est au milieu de l'interruption de filet (Figure 26a), la vitesse est maximale dans cet espace et la matière va passer d'un chenal sur l'autre, « poussée » par le doigt, ce qui favorise le mélange distributif. Lorsque les doigts sont absents (Figure 26b), cet effet est moins important. Quand les doigts se trouvent à l'intérieur du chenal de vis (Figure 26c), ils poussent la matière qui est accélérée d'un côté et freinée de l'autre. En leur absence (Figure 26d), la vitesse est très homogène le long du chenal.

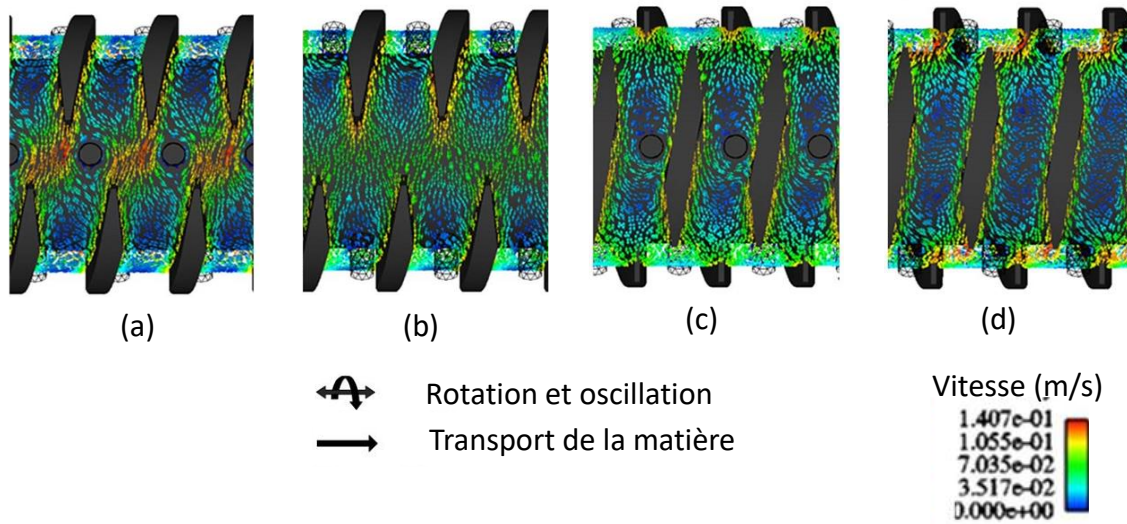


Figure 26 - Intensité de la vitesse dans un élément de mélange au cours d'une rotation (d'après [2]). Co-malaxeur de diamètre 50 mm à 10,3 kg/h et 50 tr/min

En utilisant la technique de traçage par lâcher de particules, ces modèles 3D permettent de mettre en évidence les mécanismes de mélange distributif. A la Figure 27, 1500 particules fictives (c'est-à-dire sans interaction avec le fluide en écoulement) sont injectées à l'entrée d'un élément de mélange et suivies au cours du temps [2]. On constate que la distribution de ces particules est due essentiellement aux séparations de flux créées par la présence des doigts de malaxage et des interruptions de filet. Après seulement quelques secondes et dès les premiers filets de l'élément de mélange, la distribution est déjà très homogène.

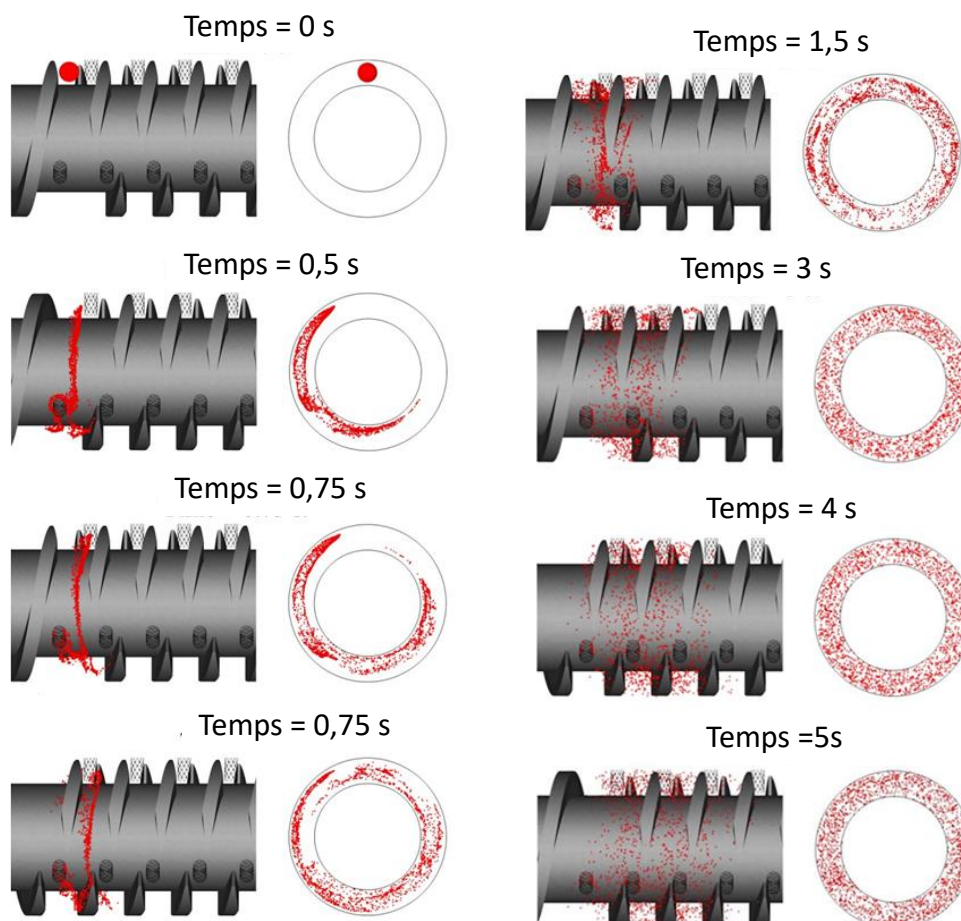


Figure 27 - Evolution du mélange distributif au cours du temps (d'après [2]). Co-malaxeur de diamètre 50 mm à 17,8 kg/h et 75 tr/min

Une étude du même type a été proposée plus récemment par Sardo [3] dans le cas d'une géométrie déroulée. Elle pose clairement un certain nombre de problèmes liés aux conditions de calcul, comme l'établissement de conditions aux limites réalistes. En effet, on considère en général un débit imposé ou des pressions imposées en entrée et sortie du domaine de calcul, alors que, du fait du mouvement oscillant de la vis, débit et pression évoluent à chaque instant.

Dans le cas de la configuration de la Figure 28a (deux éléments de transport suivis par deux éléments de mélange), le calcul montre le champ de pression obtenu lorsque la vis recule (Figure 28b) et lorsqu'elle avance (Figure 28c). L'isobare 0 correspond à la limite entre la partie totalement remplie et celle partiellement remplie. Lorsque la vis recule, tout l'élément de mélange et une partie de l'élément de transport sont remplis. La pression est maximale à l'entrée de l'élément de mélange et décroît jusqu'à la sortie. Lorsque la vis avance, le remplissage diminue et la pression est maintenant croissante le long de l'élément de mélange.

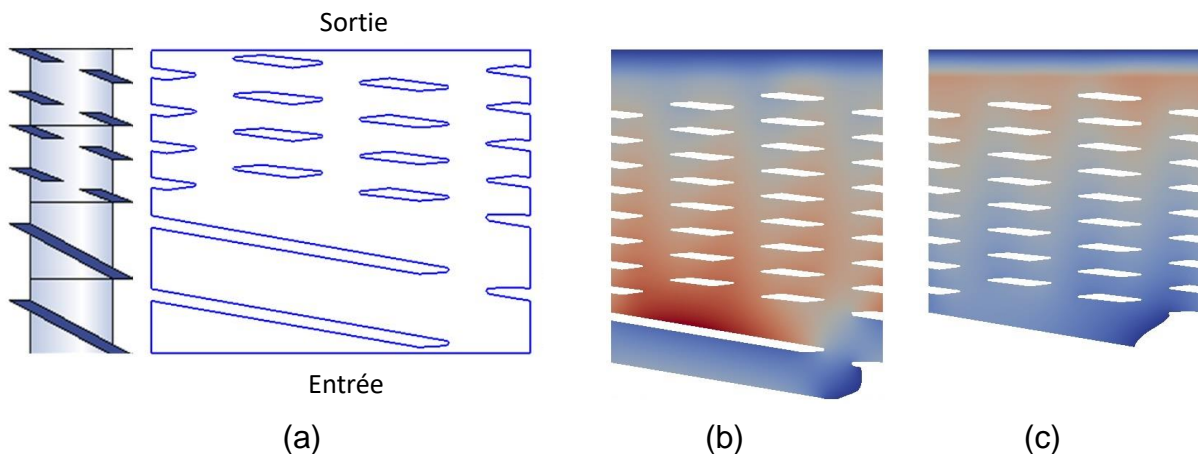


Figure 28 - Configuration d'écoulement (a) et champs de pression lorsque la vis recule (b) et avance (c). La pression varie de 0 (bleu foncé) à 2 MPa (marron foncé) (d'après [3])

Le calcul montre aussi l'hétérogénéité des taux de cisaillement moyens liée aux doigts de malaxage. Pour un co-malaxeur de 30 mm de diamètre à 500 tr/min, le taux de cisaillement dans un chenal de vis est de 150 s^{-1} environ, alors qu'il atteint 1100 s^{-1} dans l'espace étroit de 0,7 mm entre le doigt de malaxage et la paroi du chenal (voir Figure 12). Cette valeur est très proche de celle obtenue par l'équation (1), qui donne dans ces conditions 1122 s^{-1} . C'est ce taux de cisaillement local très élevé qui explique l'efficacité du co-malaxeur en termes de mélange dispersif, tout en ayant un auto-échauffement global limité.

Comme il est difficile de présenter des résultats qui varient en permanence au cours du temps, on peut considérer des valeurs moyennes sur une oscillation. Cela permet par exemple de mettre en évidence l'effet du débit et de la vitesse de rotation sur les profils de pression dans la géométrie de la Figure 28a, à laquelle on a rajouté une bague de restriction finale. A vitesse de rotation constante (250 tr/min), la perte de charge dans la bague de restriction augmente avec le débit (Figure 29a). Comme le gradient de pression dans l'élément de malaxage diminue avec le débit, cela implique que la longueur remplie augmente significativement. A débit constant (7 kg/h), la perte de charge dans la bague de restriction reste constante, mais le gradient de pression augmente avec la vitesse (Figure 29b). Il en résulte une diminution nette de la longueur

remplie avec la vitesse de rotation. Ces résultats sont qualitativement en très bon accord avec les observations expérimentales.

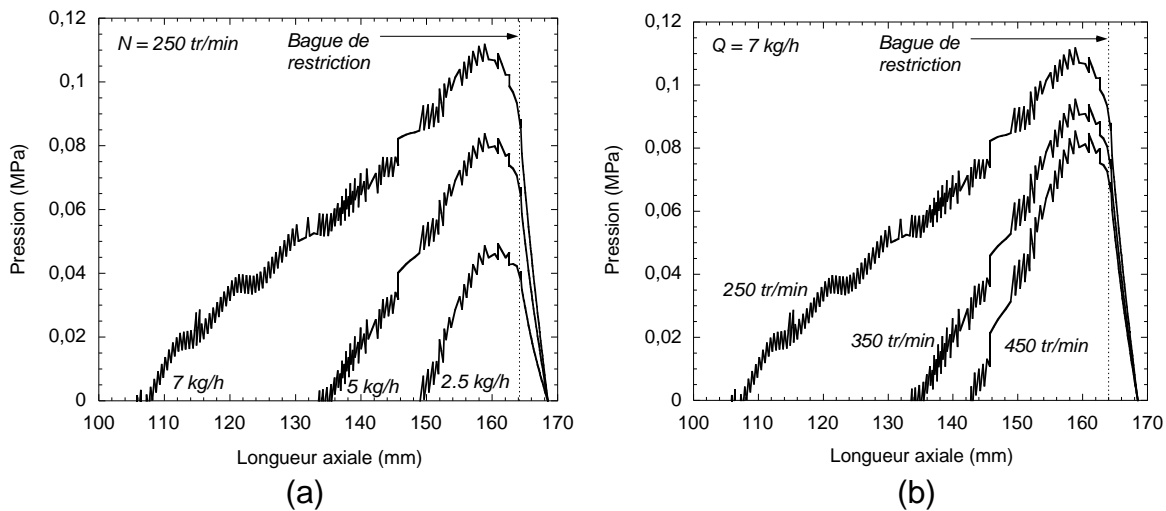
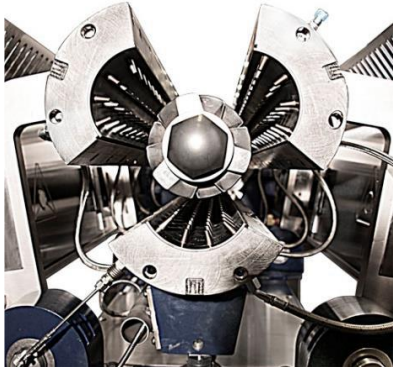


Figure 29 - Influence du débit (a) et de la vitesse de rotation (b) sur le profil de pression dans la configuration de la Figure 28 (d'après [3])

5 Conclusion

Le co-malaxeur a fait ses preuves depuis longtemps en tant qu'excellent outil de mélange, aussi bien sur le plan dispersif que sur le plan distributif. Ces qualités sont dues à son mode de fonctionnement très particulier, qui permet aux doigts de malaxage fixés sur le fourreau de parcourir les chenaux de vis et, grâce aux interruptions de filet, d'effectuer de nombreuses séparations et recombinaisons de flux, associées à des taux de cisaillement locaux importants. Bien qu'ayant donné lieu à beaucoup moins d'études scientifiques que les autres procédés d'extrusion, son mode de fonctionnement est maintenant bien compris et, malgré certaines lacunes résiduelles, des modèles plus ou moins sophistiqués ont été développés pour aider à son utilisation optimale. Par contre, il n'existe à notre connaissance aucun logiciel commercial dédié au co-malaxeur, à l'inverse de ce qui existe par exemple en extrusion baxis.

D'un point de vue technique, les évolutions récentes ont concerné l'apparition d'éléments de mélange à quatre interruptions de filet au lieu de trois, ce qui permettrait en théorie d'utiliser des vitesses supérieures et, à taille de machine identique, d'aller vers des débits plus élevés. Le constructeur B&P Littleford a proposé une machine appelée « TriVolution », fondée sur le même principe de fonctionnement mais avec trois allers-retours par rotation. Les éléments de mélange ont alors jusqu'à douze interruptions de filet et douze rangées de doigts de malaxage (Figure 30). Aux dires du constructeur, cela permet de multiplier les séparations / recombinaisons de flux et donc d'augmenter les capacités de mélange (essentiellement distributif), ce qui autorise des débits plus élevés à des vitesses plus faibles. De même, avec la gamme Compeo, Buss AG a récemment commercialisé une nouvelle évolution de son co-malaxeur, avec des éléments de mélange comportant deux à six ailettes et permettant d'obtenir des débits plus importants à des vitesses de rotation 20% plus faibles. L'extrudeuse de reprise est alors une extrudeuse baxis contrarotative conique, assurant une excellente capacité de pompage.



(a)



(b)

Figure 30 - Procédé « TriVolution ». (a) Vue générale, (b) exemples d'éléments de vis (d'après documentation B&P Littleford)

6 Glossaire

Ailette ; *flight segment*

Portion de filet de vis entre deux interruptions dans les éléments de mélange

Facteur de forme ; *shape factor*

Facteur correctif servant à prendre en compte dans les expressions de débit le fait que les dimensions de l'écoulement ne sont pas infinies. Il en existe pour les débits de cisaillement et de pression et ils s'expriment en fonction du rapport H/W (profondeur du chenal/largeur du chenal). Pour plus de détails, voir l'article AM 3650

Mélange dispersif ; *dispersive mixing*

Action de mélange visant à réduire la taille de la phase à disperser

Mélange distributif ; *distributive mixing*

Action de mélange visant à homogénéiser la répartition des charges au sein de la matrice

7 Sigles, notations et symboles

Symbole	Description	Unité
A	Amplitude de la course de la vis	M
d_{pin}	Diamètre d'un doigt de malaxage	M
D	Diamètre de la vis	M
e	Largeur du filet de vis	M
f	Taux de remplissage	-
F_d, F_p	Facteurs de forme	-
H	Profondeur du chenal de vis	M
K	Consistance de la loi-puissance de viscosité	Pa.s ⁿ
L	Longueur d'écoulement	M
L_f	Longueur remplie	M
n	Indice de la loi-puissance de viscosité	-
n_f	Nombre de filets	-
n_r	Nombre de réorientations	-
N	Vitesse de rotation	tr/min
p	Nombre de doigts de malaxage	-
P	Pression	MPa
Q	Débit massique	kg/h
Q_v	Débit volumique	m ³ /s

Q_d	Débit de cisaillement	m^3/s
Q_p	Débit de pression	m^3/s
Q_{pin}	Débit dû au doigt de malaxage	m^3/s
Q_L	Débit de fuite au-dessus des filets	m^3/s
Q_{LD}	Débit de fuite à travers les interruptions de filet	m^3/s
r	Longueur relative des filets	-
s	Distance entre doigt de malaxage et filet de vis	M
t	Temps	S
\bar{t}_{nr}	Temps de séjour moyen dans les éléments non remplis	S
\bar{t}_r	Temps de séjour moyen dans les éléments remplis	S
V	Volume	m^3
\bar{V}	Vitesse moyenne	m/s
Z	Course de la vis	M
α	Rapport de forme des doigts de malaxage	-
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement	s^{-1}
δ	Jeu vis-fourreau	M
ε	Paramètre d'efficacité des doigts de malaxage	-
η	Viscosité	Pa.s
φ	Angle de filet	°
ω	Fréquence des oscillations	rad/s
ρ	Masse volumique	kg/m^3

Fonctionnement et utilisation des co-malaxeurs

par **Lucas SARDO**

Docteur en Mécanique numérique et Matériaux de PSL Research University
Sciences Computers Consultants, Sophia-Antipolis (France)

Bruno VERGNES

Conseiller scientifique, CEMEF, MINES ParisTech, Sophia-Antipolis (France)

Sources bibliographiques

- [1] MONCHATRE (B.). – *Contribution à l'étude expérimentale d'un outil de mélange de type co-malaxeur : application aux polymères*. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne (2015).
- [2] BRITO BAZAN (M. M.). – *Mixing Studies in a Co-Kneader*. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal (2011).
- [3] SARDO (L.). – *Modélisation et simulation numérique de la thermomécanique des écoulements dans les co-malaxeurs*. Thèse de doctorat, Université de recherche Paris Sciences et Lettres (2016).
- [4] LYU (M.-Y.) et WHITE (J.L.). – *Polym. Eng. Sci.*, 38, p. 1366 (1998).
- [5] SHON (K.), LYU (M.-Y.) et WHITE (J.L.). – *Intern. Polym. Proc.*, 20, p. 322 (2005)
- [6] ELEMANS (P.H.M.) et MEIJER (H.E.H.). - *Polym. Eng. Sci.*, 30, p. 893 (1990).
- [7] MONCHATRE (B.), RAVEYRE (C.) et CARROT (C.). - *Polym. Eng. Sci.*, 58, p. 133 (2018).
- [8] BI (C.) et JIANG (B.). – *J. Mat. Proc. Tech.*, 209, p. 4147 (2009).
- [9] VERGNES (B.). - *Intern. Polym. Proc.*, 26, p. 587 (2011)
- [10] LEBOEUF (M.). – *Influence des paramètres du procédé sur les propriétés électriques et rhéologiques des polyamides chargés de noir de carbone*. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris (2007).
- [11] LYU (M.-Y.) et WHITE (J.L.). – *Intern. Polym. Proc.*, 10, p. 305 (1995).
- [12] LYU (M.-Y.) et WHITE (J.L.). – *Intern. Polym. Proc.*, 11, p. 208 (1996).
- [13] BRZOSKOWSKI (R.), KUMAZAWA (T.) et WHITE (J.L.). – *Intern. Polym. Proc.*, 6, p. 136 (1991).
- [14] LYU (M.-Y.) et WHITE (J.L.). – *J. Reinf. Plast. Comp.*, 16, p. 1445 (1997).

À lire également dans nos bases

AGASSANT (J.-F.), PINSOLLE (F.) et VERGNES (B.). – *Opérations de mélange dans les procédés de transformation des polymères – Concepts*. [AM3635], Plastiques et Composites (2017).

AGASSANT (J.-F.), PINSOLLE (F.) et VERGNES (B.). – *Opérations de mélange dans les procédés de transformation des polymères – Mise en œuvre*. [AM3636], Plastiques et

Composites (2017).

VERGNES (B.) et CHAPET (M.) – *Procédés d'extrusion baxis*. [AM3653], Plastiques et composites (2001).

VERGNES (B.) et PUISSANT (S.) – *Extrusion monovis (partie 1)*. [AM3650], Plastiques et composites (2002).

VERGNES (B.) et PUISSANT (S.) – *Extrusion monovis (partie 2)*. [AM3651], Plastiques et composites (2003).

VERGNES (B.) – *Extrusion baxis contrarotatives*. [AM3652], Plastiques et composites (2020).

Principaux fabricants

BUSS AG	Hohenrainstrasse 10, 4133 Pratteln, Suisse https://busscorp.com
B&P Littleford	1000 Hess Avenue, Saginaw, Michigan 48601, USA https://www.bplittleford.com
X-Compound	Hardmatt 932, 5082 Kaisten, Suisse http://www.x-compound.ch
Xinda	No.3-1, Huandong Road, Xiake Town, Jianguyin City, Chine http://www.xindacorp.com