
Le procédé d'injection – moulage

Depuis la fin des années 1800 et l'invention de la première machine d'injection par les frères John et Isiah Hyatt, le procédé d'injection-moulage n'a pas cessé d'être perfectionné pour devenir actuellement le procédé de fabrication de pièces plastiques le plus utilisé au monde. Il peut en effet s'adapter autant à l'élaboration de pièces imposantes (plusieurs kilogrammes) qu'à la production d'objets beaucoup plus petits, de l'ordre du gramme. L'avantage principal de ce procédé réside dans la possibilité d'obtenir des géométries de pièces très complexes tout en ayant des temps cycles très rapides, permettant une production à très haute cadence.

Une machine d'injection-moulage comprend une unité de plastification, une unité de fermeture (dans laquelle est fixé le moule) et une unité de commande. Son principe de fonctionnement est le suivant : Dans l'unité de plastification, la vis est placée dans un fourreau cylindrique, chauffé par conduction. Elle peut être entraînée soit en rotation, soit en translation. Lorsqu'elle tourne, sa fonction est tout d'abord de faire fondre des granules de polymère, de les mélanger et de convoier la matière à l'entrée de l'unité de fermeture. Ensuite, elle agit comme un piston pour injecter la matière fondue dans un moule. Ce dernier, généralement réglé à une température proche de la température ambiante va permettre de figer le plus rapidement possible le polymère. C'est ce qui se passe lorsque l'on transforme des thermoplastiques. Pour les polymères thermodurcissables ou des élastomères, en général, le mélange est tiède et injecté dans un moule chaud permettant l'initiation de la polymérisation.

1.1 Les étapes du procédé

Le procédé d'injection se déroule en cinq étapes :

Étape 1 (Cf. Figure 1a) : la phase de dosage. Les granules de polymère tombent depuis une trémie dans un ensemble vis-fourreau. Ils sont ensuite fondus progressivement par actions conjuguées des colliers chauffant le fourreau, du cisaillement de la matière, provoqué par la rotation de la vis et la friction des granules (entre eux et contre les parois du fourreau et de la vis). La matière fondue est alors convoiée en avant de la vis (via un clapet anti-retour), dans l'espace créé par le recul progressif de cette dernière lors de sa rotation.

Étape 2 (Cf. Figure 1b) : la phase d'injection. Grâce à un mouvement de translation de la vis, le polymère fondu est transféré du réservoir à un moule via des canaux. Ce mouvement de translation est généré par un vérin, à travers le clapet anti-retour qui, dans cette phase, empêche la matière de rebrousser chemin.

Étape 3 (Cf. Figure 1c) : la phase de compactage. Le moule est composé de deux parties, une fixe et une mobile. Durant le compactage, le moule est maintenu sous pression pour rester fermé, pendant que la matière est compactée par la vis. Pendant cette phase, le polymère fondu continue à être injecté pour compenser le rétrécissement, ou retrait, de la matière qui refroidit.

Étape 4 (Cf. Figure 1d) : la phase de refroidissement. Lorsque le polymère est entièrement figé au niveau du ou des seuils d'injection, il n'est plus nécessaire d'appliquer une pression de maintien, et la pièce continue de se refroidir jusqu'à ce qu'elle soit complètement solidifiée. La vis reprend son cycle de rotation à l'étape 1.

Étape 5 (Cf. Figure 1d) : la phase d'éjection. Le moule s'ouvre, et la pièce formée est éjectée du moule.

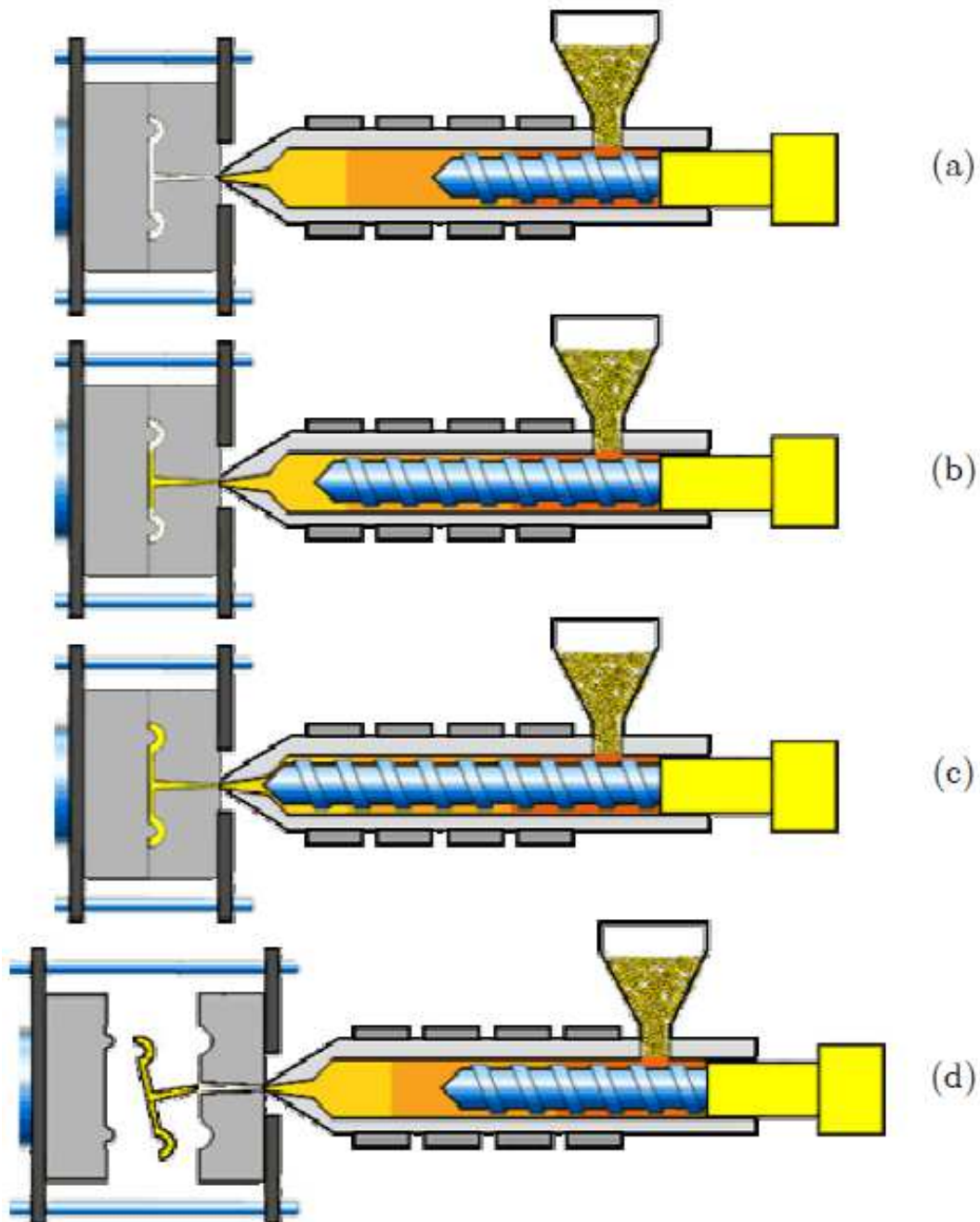


Figure 1 : Les étapes du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques

1.2 Le groupe de plastification

Le groupe de plastification (Cf. Figure 2), qui est l'objet de notre étude, assure le passage de la matière de l'état solide à l'état liquide. Les principaux éléments constitutifs de ce groupe sont :

- **La trémie d'alimentation** : située à l'arrière du groupe, elle approvisionne l'unité de plastification en matière première (sous forme de poudre ou de granulés), en général par simple gravité.
- **L'ensemble vis-fourreau** : la vis est située dans un fourreau cylindrique, mis en température à l'aide de résistances électriques ou colliers chauffants. Leur rôle est de contribuer à l'apport d'énergie nécessaire à la plastification des polymères. La régulation de la température des résistances est assurée par une boucle de contrôle utilisant le plus souvent des thermocouples.
- **Le moteur** : Il assure la mise en rotation de la vis par des systèmes électriques ou hydrauliques.
- **Le système de vérin hydraulique** : il permet le déplacement transversal de la vis. La force nécessaire à l'injection du polymère dans le moule est développée en imposant une pression hydraulique sur le cylindre d'injection.
- **Le clapet "anti-retour"** : il est fixé à l'avant de la vis, et permet d'éviter le reflux de matière pendant la phase d'injection proprement dite.
- **La buse d'injection** : elle effectue la liaison entre le pot d'injection et le moule

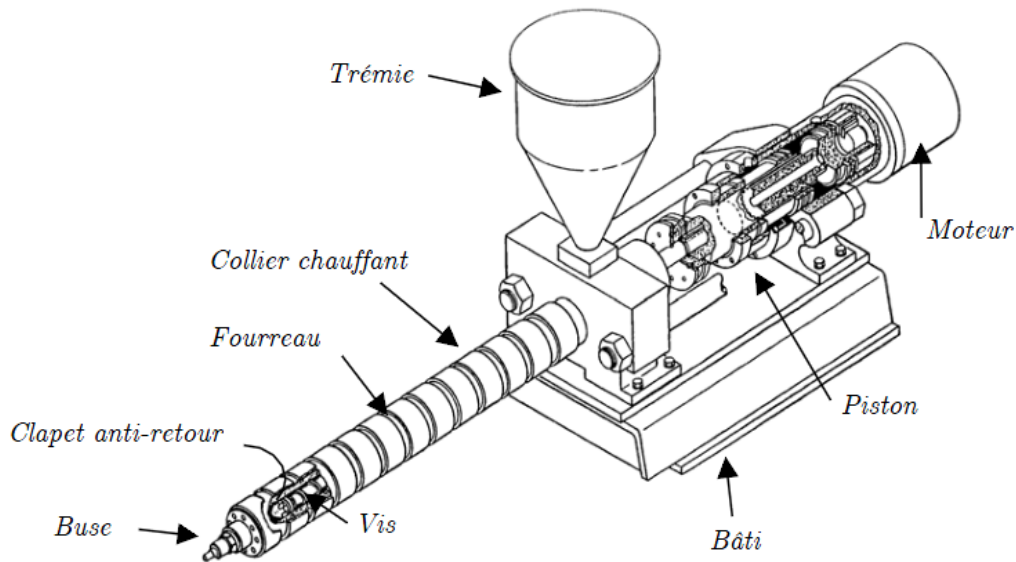


Figure 2: Schéma d'un groupe de plastification

(R.Nunn, « The reciprocating screws process », *injection Moulding Handbook*, 1986) [1]

1.3 Les vis d'injection

La monovis standard d'injection comprend en général trois zones (Cf. Figure 3)

- **Une zone d'alimentation** : dans laquelle les granulés de polymère sont convoyés et compactés dans le chenal de la vis. C'est ici que la profondeur du chenal est la plus grande, et elle reste constante.
- **Une zone de compression** : de forme tronconique, les granulés vont y être progressivement fondus par action conjuguée des colliers chauffants et du cisaillement de la matière. La profondeur du chenal diminue progressivement pour atteindre sa valeur minimale en zone de pompage.
- **Une zone de pompage** : dans cette dernière partie la profondeur demeure constant, le polymère est mis en pression et s'homogénéise.

Les deux premières zones d'une vis permettent de plastifier la matière.

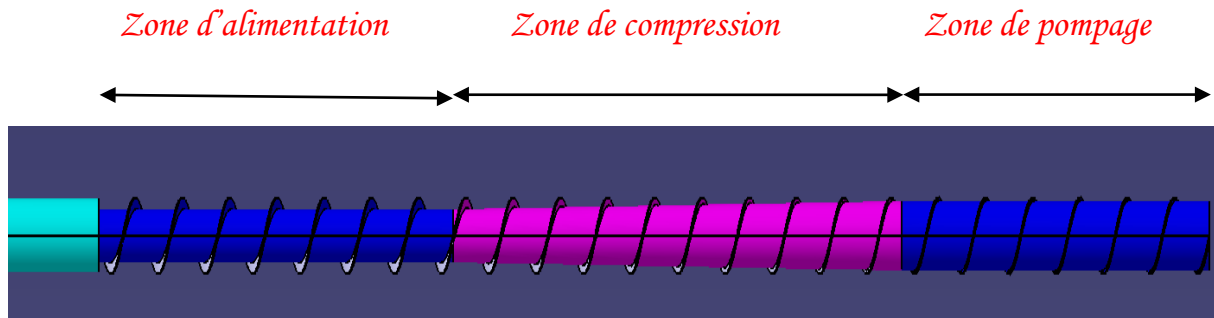


Figure 3: Schéma d'une mono-vis avec trois zones

Les différents paramètres permettant de caractériser une vis sont :

- **La longueur de la vis** : une vis est généralement définie par le rapport entre sa longueur fixée (L) et son diamètre nominal (D). En général ce rapport oscille autour de $20L/D$. Les vis d'injection sont plus courtes qu'en extrusion ($30/35D$).
- **La profondeur du chenal** : une vis relativement profonde permet d'avoir une capacité de convoyage importante et réduit le cisaillement dans la matière, géométrie souhaitée pour les polymères sensibles à ce paramètre. Cependant, la vis serait plus sensible à la contre-pression.
- **Le taux de compression** : c'est le rapport entre la profondeur du chenal dans la zone d'alimentation et celle de la zone de pompage. Il varie entre 2 et 4 pour la majorité des vis industrielles. Une vis avec un faible taux de compression convient aux matières dont la plastification est aisée, comme les matières visqueuses, et inversement.
- **Pas de la vis** : la plupart des vis d'injection utilisent un pas « carré », ce qui signifie que le pas de l'hélice est égal au diamètre de la vis. Ce pas est proche de l'optimum pour le convoyage solide, mais peut être plus grand pour la partie fondue [2].

D'un point vu fonctionnel, la vis a pour rôles principaux :

- De convoyer et compacter le polymère solide
- De plastifier le polymère
- De convoyer de d'homogénéiser le polymère fondu

Malgré tout, les vis classiques d'injection présentent de plus en plus de limites. Les cadences d'injection toujours plus élevées demandent une amélioration constante des performances de l'unité de plastification. Trouver le bon compromis entre l'augmentation de la vitesse de plastification pour réduire les temps de cycle et l'homogénéisation physique et thermique du polymère fondu, et l'apparition de nouveaux polymères techniques sont autant de raisons qui ont encouragé les industriels à concevoir les designs de vis de plus en plus complexes.

Les premières solutions proposées par *Verbraak et Meijer [3]* sont pour éviter les limites concernant les temps de dosage courts et les dosages de grands volumes, en particulier pour des matériaux difficiles à plastifier, comme par exemple le Poly Chlorure de Vinyle (PVC), ou Poly Amide (PA). Pour cela, les vis peuvent être modifiées géométriquement :

- modification des taux de compression et des longueurs de compression par rapport à chaque matière
- zone d'alimentation plus longue pour améliorer la capacité de plastification de la vis
- zone de pompage plus longue pour augmenter la qualité de matière fondue

On peut ajouter des sections de mélange locales sur la vis pour agir sur le mélange dispersif (par cisaillement bref mais intense par l'intermédiaire d'éléments barrières – figure 4 à droite) et distributif (par des picots de formes et de distribution variées – figure 4 à gauche).

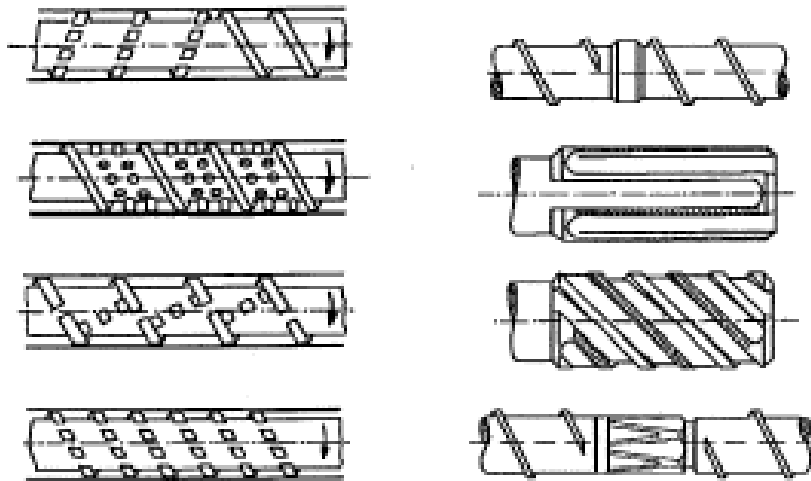


Figure 4 : Différentes sections de mélange de type dispersif et distributif, d'après J.F. Agassant, P. Avenas, J.P. Sergent, B. Vergnes et M. Vincent, "La mise en forme des matières plastiques", Technique et documentations, Lavoisier, Paris, 1996, 3^e édition [4]

Les autres profils de vis sont conçus et choisis en fonction des applications visées. Ils sont conçus:

- soit pour éviter la rupture du lit solide (vis barrière)



Figure 5 : Profil d'une vis barrière de type "Maillefer", C. Rauwendaal, "Extruder screw with barrier sections", *Polymer Engineering and Science*, vol. 26, n° 18, page 1245-1253, 1986 [5]

L'idée est d'ajouter un filet supplémentaire le long de la zone de compression, qui permet de contrôler le processus de plastification en séparant le polymère fondu du polymère encore à l'état solide. Elle se constitue d'un filet principal classique dont le pas est constant et égale au diamètre, puis d'un filet supplémentaire qui balaie progressivement la largeur du chenal principal, de l'arrière à l'avant. Ce filet joue le rôle d'une barrière entre le lit solide et le polymère fondu, dont la position est identique à celle qu'elle prendrait spontanément entre liquide et solide s'il n'y avait que le filet principal.

Cette géométrie assure une plastification complète : la totalité du polymère doit en effet passer le filet barrière où il est sujet pendant un cours instant à haut degré de cisaillement. La plastification des dernières particules non-fondues est garantie, ainsi que l'homogénéité est comparable à celle obtenue avec des sections de mélange. Les résultats obtenus avec ce profil de vis sont très intéressants, mais il est très peu développé en Europe.

- soit pour favoriser la rupture du lit solide (vis à énergie de transfert)

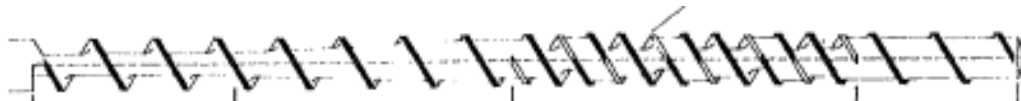


Figure 6: Vis à énergie de transfert, d'après C. Chung, "A novel energy efficient screw design", *SPE Antec 168*, page 168-169, Mai 1983 [6]

C'est un type de vis qui favorise la plastification par conduction. Dans ce profil, le chenal est divisé en deux par un filet barrière avec un large entrefer. La profondeur du chenal arrière (en direction de la tête de vis) décroît pendant que celle du chenal arrière est transférée dans le chenal avant où elle est mélangée avec le matériau s'y trouvant déjà, par simple rotation de la vis. Le chenal principal et le chenal secondaire sont ensuite périodiquement intervertis.

Ce profil de vis est développé tout d'abord par R. Barr [7] pour le procédé d'extrusion, pour accroître la capacité de plastification et la qualité du polymère fondu. D'un point de vue énergétique, ce profil de vis est très économique, car son principal intérêt est de casser le lit solide en petites parties, de mélanger avec le polymère chaud par le mouvement de rotation de

la vis en utilisant le moins d'énergie possible : la surface de contact entre le lit solide et le polymère fondu est beaucoup plus importante et la conduction thermique augmente.

Dans même objectif, nous trouverons aussi les vis à double vague et les vis à double effet de mélange.

- soit pour la transformation des matériaux sensibles à la reprise d'humidité ou des matériaux contenant des substances volatiles (vis à système de dégazage)

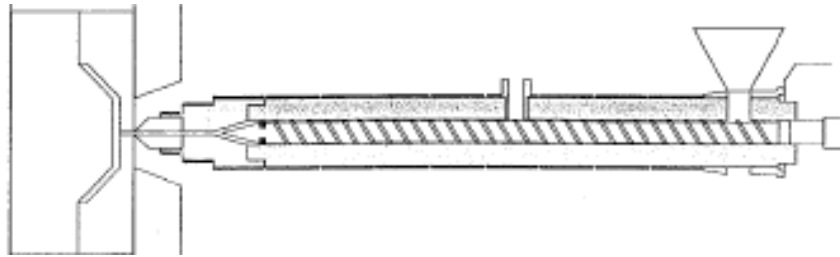


Figure 7: Schéma de principe de la vis avec système de dégazage, d'après H. Nakagawa, "Improvement of screw plasticizing in injection moulding", *Japan Plastics*, page 20-28, Octobre 1971 [8]

La vis est composée de deux vis jointes :

- la première vis est du côté trémie, appelée "premier étage"
- la deuxième vis du côté buse, appelée "second étage"

Le fourreau comporte un évent dans sa partie centrale. Le polymère arrivant de la trémie d'alimentation est plastifié par la première vis. Il arrive ensuite dans la section de dégazage du second étage. La pression chute fortement en raison de la brusque augmentation de la profondeur du chenal. L'eau et les matières volatiles commencent à s'évaporer et des bulles se forment. Ces dernières sont rompues par la rotation de la vis et les substances gazeuses sont séparées de la matière fondue et évacuées grâce à l'évent. La matière dégazée est accumulée en tête de vis, comme pour une vis classique. Une fois la matière dosée, la vis fait un mouvement de piston et la matière est injectée dans le moule.

Dans l'ensemble de la presse à injecter, chaque élément a sa fonction propre. On a essayé de développer plusieurs types de vis s'adaptant à des matériaux différents. Et selon le cahier des charges, on trouve un très grand nombre de solutions techniques différentes pour le moule. Pourtant, on ne trouve pas beaucoup de styles pour le fourreau.

Dans la littérature, nous pouvons bien voir les fourreaux de diamètres variés correspondant à ceux des vis ou de la taille de la machine, ainsi que des fourreaux avec des duretés différentes en utilisant différents types de matériaux. Mais ce n'est pas l'essentiel.

Depuis l'existence de la recherche dans les matières plastiques, nous trouvons beaucoup de travaux sur le phénomène de plastification des polymères dans l'ensemble vis-fourreau. Tous sont bien expliqués et vérifiés théoriquement, mais nous n'avons jamais eu vraiment de

vérifications pratiques quantifiées. Personne ne peut vérifier, ou bien confirmer ces phénomènes théoriques par ses propres yeux.

Effectivement, nous rêvons tous de voir directement comment les phénomènes se passent dans ce tube fermé. Quelques auteurs ont réussi à faire des fourreaux dits "transparents". Les résultats obtenus sont très encourageants. Mais jusqu'à maintenant, nous n'avons jamais vu personne créer un "fourreau transparent" pour une presse à injecter de taille industrielle. Les conditions de travail avec les matières plastiques sont très sévères (haute température, haute pression, etc.). C'est pour cela que les travaux ne sont pas menés jusqu'au bout.

À partir de cette idée, en se basant sur quelques travaux précédents, nous voulons faire notre fourreau unique au monde. Dans ce travail, nous allons vous proposer une conception d'un fourreau particulier. Ce fourreau a été conçu dans le but de visualiser les phénomènes au cours de la phase de plastification de la matière.

2 État de l'art

Nous savons que les écoulements dans le canal d'une vis d'extrusion ou d'injection ont un rôle très important dans la mise en œuvre des polymères puisqu'ils contrôlent le débit, les temps de séjour et le mélange du polymère fondu. De nombreux auteurs ont développé des expériences permettant d'observer le comportement de la matière dans les ensembles vis-fourreau.

Dans les dernières années du XX^{ème} siècle et début XXI^{ème} siècle, des chercheurs dans le domaine de la plasturgie n'ont eu de cesse de montrer différentes méthodes pour visualiser la transformation de la matière. *Wong et al [9]* et *Song et al [10]* ont présenté une extrudeuse industrielle dans laquelle étaient placées à intervalle régulier des fenêtres en verre, permettant l'observation directe du comportement du polymère en 1997. Pendant les années 90, *Yokoi et al [11]* ont développé un moule avec des fenêtres en verre pour observer les écoulements des matières et pour étudier leurs comportements une fois injectée dans le moule. Dans les années 2000, *Gao, Jin et al [12, 13]* ont repris l'idée de *Wong et al* pour une presse à injecter, pour l'étude de la rupture du lit solide pendant la phase de plastification. Et de 2003 à 2005, au sein de notre laboratoire au site de Plasturgie est né le VISIOVIS, un fourreau entièrement transparent en PMMA, inventé par *M. Moguelet et al [14]*.

Nous allons nous concentrer sur la présentation des deux principaux fourreaux transparents existant, qui font l'objet de notre motivation pour le projet FONLIMICS. Nous allons présenter les modèles des deux fourreaux, les résultats obtenus par les deux équipes de chercheurs, et surtout, analyser les principales limitations qu'ils ont rencontrées. À partir de tous ces points, nous pourrions réaliser notre cahier des charges pour notre fourreau à fenêtre ("fourreau transparent").

2.1 Fourreaux à fenêtre existant

2.1.1 Fourreau de Gao-Jin [12, 13]

Cela fût vraiment le premier fourreau transparent existant dans le monde du plastique sur une presse à injecter Chen Hsong (model JM88NKIII). Les deux tableaux : tableau 1 et tableau 2 représentent des propriétés principales de cette machine et de la vis.

Le fourreau présente des fenêtres en verre et des capteurs de température et de pression. Les fenêtres sont alternées sur toute la longueur du fourreau et sur les deux côtés du fourreau, comme représenté dans la figure 8. Les fenêtres sont dessinées spécifiquement pour supporter la pression de 1000 bars et la température de 300°C. La taille de chaque fenêtre est de 80mm de long et 14mm de large. Comme les auteurs l'ont expliqué dans leur article, le volume de l'ensemble des fenêtres reste très petit par rapport au volume entier du fourreau, les erreurs d'observation peuvent donc être minimisées. L'équipe a observé les transformations d'un polyéthylène haut densité (HDPE) (Marlex, HMN6060) grâce à une caméra et un appareil photo numérique, dont les propriétés ne sont pas précisées dans le récit.

Modèle de la machine	Chen Hsong JM88-MKIII
Poids de la machine	3,4 (Tons)
Volume balayage	142 (cm ³)
Diamètre de la vis	36 (mm)
Vitesse de rotation de la vis	10-152 (rpm)
Moteur électrique	15 HP/380V/50hz
Pompe Hydraulique + Capacité	PV2R12-26, 6-26cm ³ /rov
Force de verrouillage	88 (U.S.ton)

Tableau 1 : Paramètres de la presse à injecter spécifique

Rapport L/D de la vis	18,75
Longueur de la zone d'alimentation	350 (mm)
Longueur de la zone de compression	185 (mm)
Longueur de la zone de pompage	140 (mm)
Profondeur du chenal de la zone d'alimentation	6 (mm)
Profondeur du chenal de la zone de pompage	2,4 (mm)
Pas de vis	36 (mm)
Taux de compression	2,5

Tableau 2: Paramètres de la vis

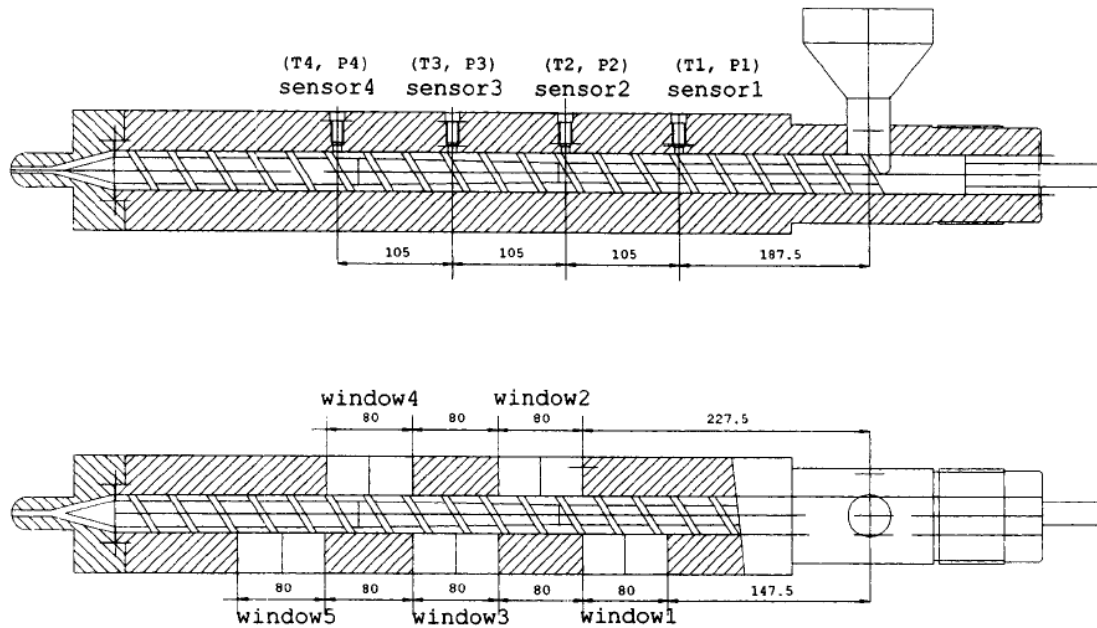


Figure 8: Design de fourreau à fenêtre pour une machine d'injection (F. GAO, Z.JIN, X.CHEN) – Pol. Eng. Sci, June 2000, vol 40, N°6

Grâce à ce fourreau à fenêtres, Gao, Jin et Chen ont pu prendre des images des phases de PE dans l'ensemble de vis-fourreau à trois moments différents : tout de suite après la plastification, à la fin de dosage et tout de suite après l'injection. Nous constatons qu'ils ont pu observer non seulement la transformation du polymère, de la phase solide à la phase totalement fondue mais aussi l'avancement et le recul de la vis.

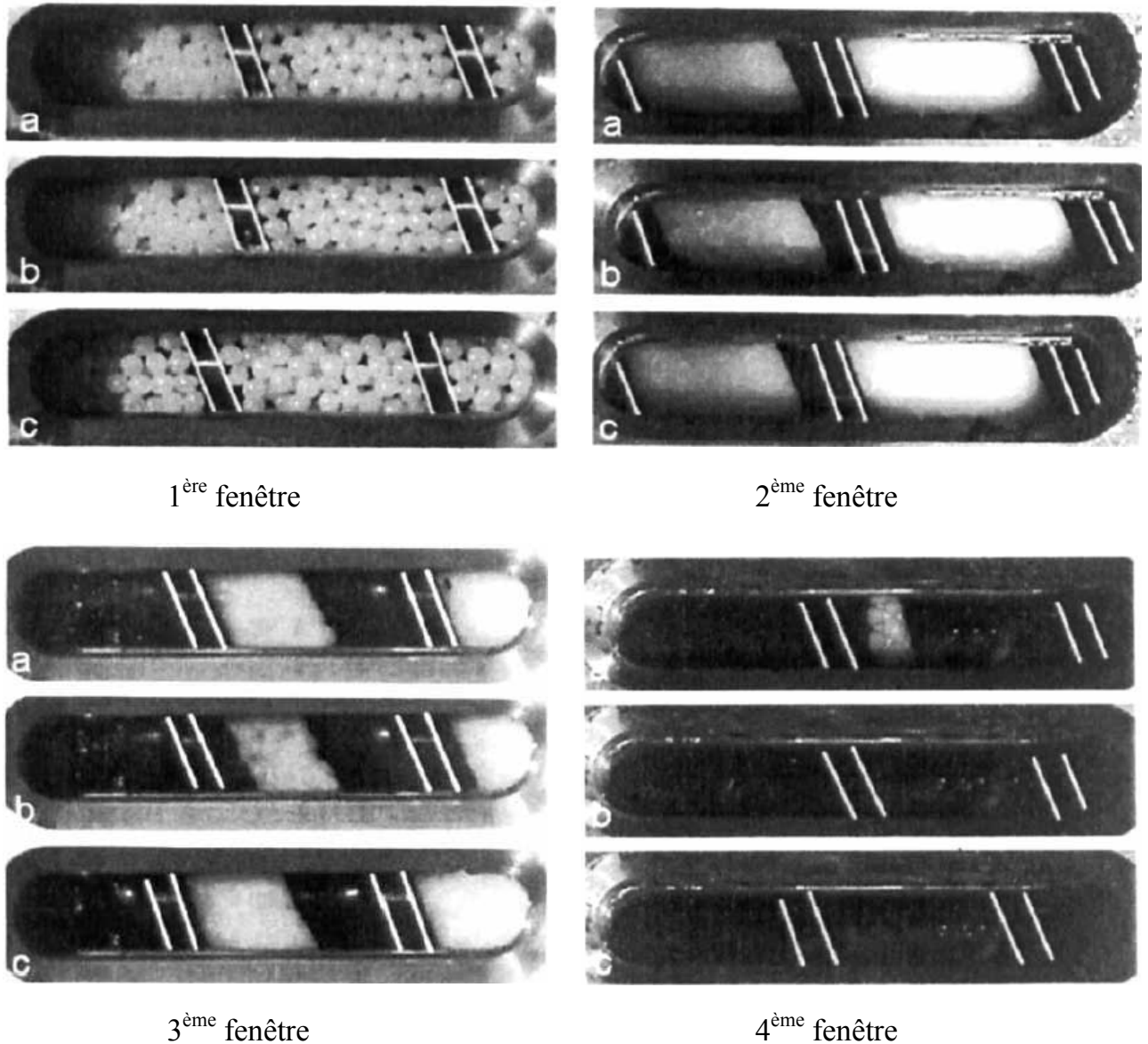


Figure 9: Résultats obtenus grâce aux 4 fenêtres dans le fourreau représentant les différentes phases de transformation de polymère dans le système vis-fourreau (a) après plastification (b) à la fin de dosage (c) après injection

La première fenêtre est située dans la zone d'alimentation de la vis, nous voyons bien les granules de polymère gardant leurs formes solides. Le polymère commence à fondre à l'interface polymère – fourreau à partir de la seconde fenêtre, par conduction thermique et cisaillement entre le polymère et le fourreau. Bien que la qualité des images ne soit pas parfaite, nous pouvons tout de même voir l'apparition d'un film très fin de polymère fondu collé aux parois de la fenêtre. Le lit solide du polymère a été filmé à la troisième et quatrième fenêtre. Nous avons constaté que quand la matière est totalement fondue dans les chenaux de la vis, l'image est totalement noire, car le PEHD devient transparent à l'état fondu, donc sur la photo ils ne peuvent voir que la couleur de la vis (noir acier). D'ailleurs, c'est pour cette raison que nous n'avons pas vu les photos de la cinquième fenêtre présentées.

2.1.2 Visiovis (Maël Moguedet) [14]

En 2003, au sein du laboratoire du site de plasturgie à Bellignat, M. MOGUEDET a inventé et assemblé un outil de visualisation VISIOVIS. Cet instrument a été initialement conçu dans le but de visualiser les trajectoires en 3 dimensions d'une particule fluorescente dans un liquide transparent. Pendant ces dernières années, le laboratoire a continué à développer ce système comme un équipement original afin de pouvoir l'adapter à l'analyse de la dispersion (ou de la distribution) des nano-charges dans les fluides visqueux, circulant dans une géométrie complexe, dans ce cas elle est présentée comme un système vis-fourreau d'une presse à injecter ou d'une extrudeuse.

Ce dispositif fut inventé en se basant sur le principe P.T.V (Particle Tracing Velocimetry). Cette technique est différente de la technique P.I.V (Particle Image Velocimetry), qui est beaucoup utilisée en mécanique des fluides, et pour étudier l'instabilité de l'écoulement dans les filières d'extrusion du domaine de plasturgie. L'explication de ces deux techniques se trouve dans le chapitre "Caméras et système de visualisation".

VISIOVIS reste jusqu'à présent un outil très spécifique, composé par **un fourreau entièrement transparent** et une vis sans fin, fonctionnant à température ambiante. La matière choisie pour faire ce fourreau est poly-méthacrylate (PMMA). Une ouverture a été percée à l'entrée de la VISIOVIS pour l'insertion des particules fluorescentes. Elles sont ensuite en mouvement dans le chenal de la vis, transportées par une huile de silicone polydiméthyle siloxane (PDMS), et suivies par quatre caméras numériques connectées à l'ordinateur pour l'enregistrement et pour l'acquisition des données.

Les traceurs sont éclairés par des diodes Ultra-Violet (émettant à $400\pm 5\text{nm}$), placé autour de l'ensemble du système. Le fourreau en PMMA est traité anti-UV. L'ensemble PMMA-PDMS garde 60% de transparence pour assurer l'enregistrement des images des particules.

Les quatre caméras sont implantées sur un support en aluminium rigide, dont deux sur les axes horizontaux, et deux sur les axes verticaux, l'une en face de l'autre, à équidistance du fourreau. Les capteurs intégrés dans les caméras (Basler A310F) sont des capteurs CCD, et enregistrent jusqu'à 80 images par seconde, avec une résolution de $640*480$ pixels. Les caméras sont filtrées pour rejeter la lumière excitatrice.

Après la détection des particules, les ordinateurs commencent à sauvegarder les images en temps réel. Une horloge externe assure la synchronisation des prises des images à travers un déclencheur. Nous trouvons plus clairement l'assemblage de ce dispositif dans la figure 10. Le tableau 3 représente les principaux paramètres de ce VISIOVIS.

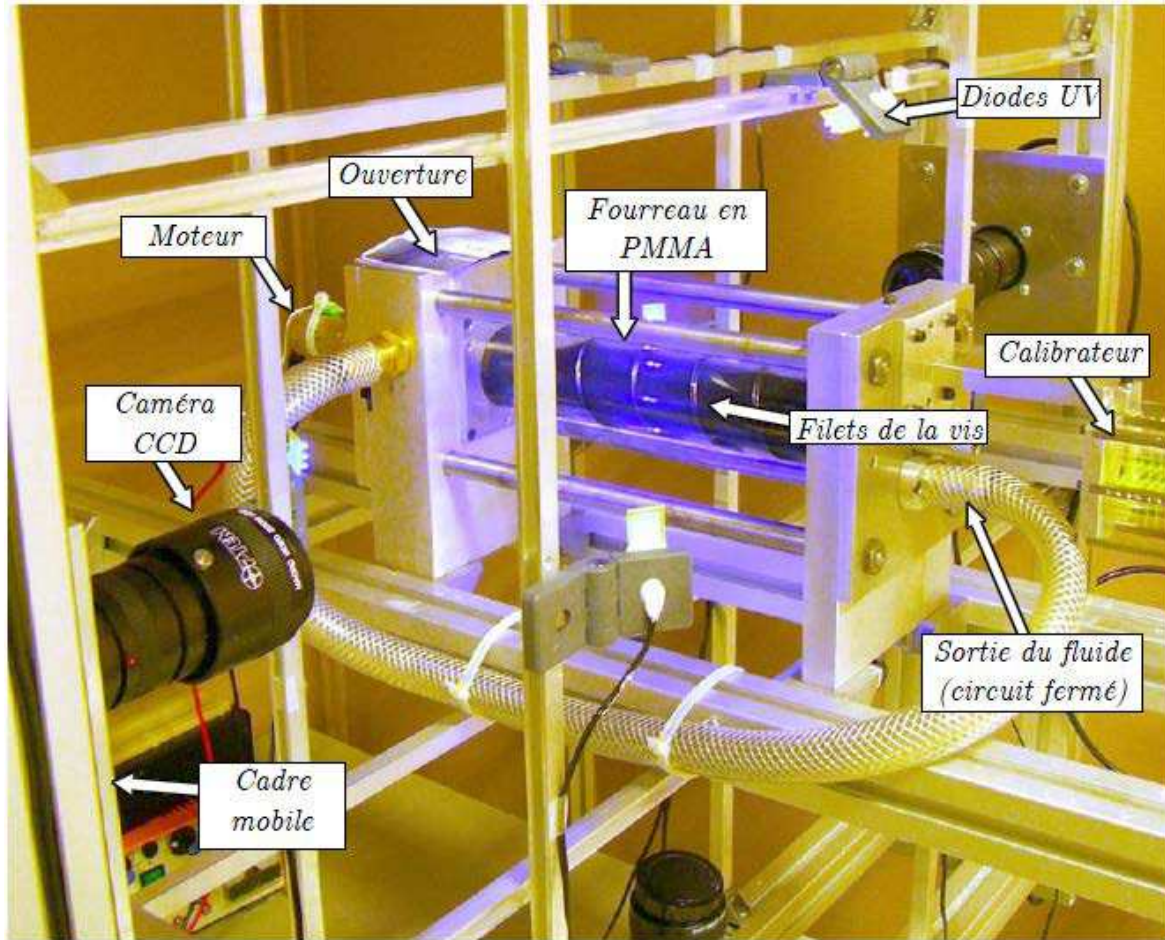


Figure 10 : VISIOVIS du laboratoire du Site de Plasturgie – INSA de Lyon (Thèse de M. Moguedet, 2005)

Diamètre du fourreau	40 mm
Diamètre du cœur de la vis	30 mm
Pas de la vis	40 mm
Profondeur de chenal	5 mm
Largeur de chenal	34,6 mm
Angle de vis (au milieu du chenal)	20°
Rapport d'aspect	6,9
Longueur de vis	250 mm

Tableau 3: Principaux paramètres de VISIOVIS

Grâce à ce dispositif innovant, l'objectif principal de l'équipe de recherche a été de suivre la trajectoire d'une particule dans l'huile de silicone poly diméthylsiloxane (PDMS), ce qui ressemble à l'écoulement dans la zone de pompage du système vis-fourreau. La particule est ajoutée dans l'huile de silicone, puis pompée par la vis qui a une vitesse de rotation d'un tour par minute (1rpm). Cette particule est suivie par des caméras placées perpendiculairement au

fourreau, conformément au montage précédemment (Cf. Figure 10). La fréquence maximale de prise d'image que l'équipe a pu atteindre est de 7 images par secondes.

Après des analyses des images, M. Moguedet et ses co-équipiers ont pu reconstruire la trajectoire tridimensionnelle de la particule fluorescente, comme représentée dans la figure 11. Ce résultat obtenu manque effectivement de quelques informations, correspond à la position des caméras. Malgré des corrections optiques, ils conservent des erreurs dues à la réfraction, notamment au passage de la particule devant la caméra.

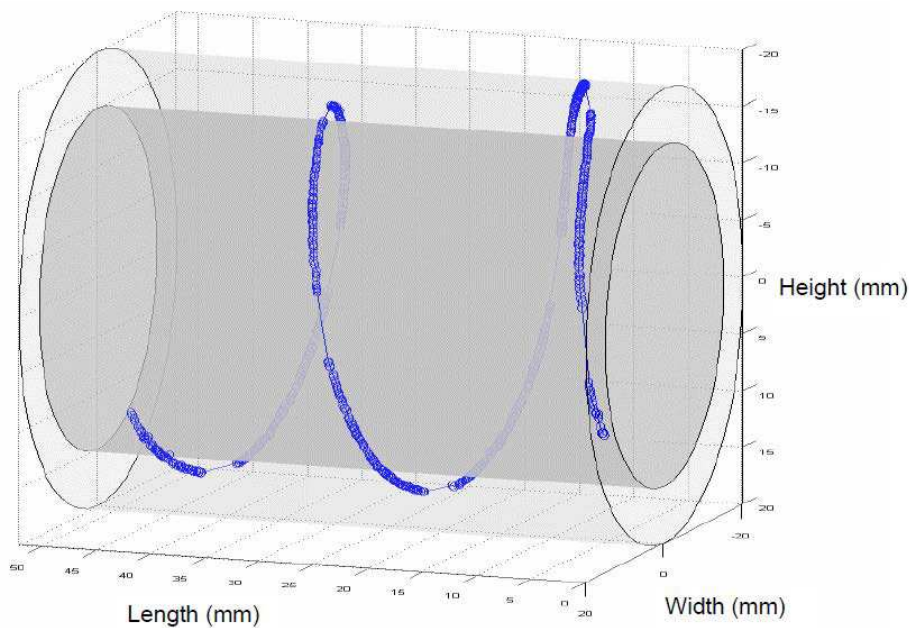


Figure 11: Trajectoire tridimensionnelle d'une particule dans le chenal de la Visiovis, à 1rpm (Thèse M. Moguedet, 2005)

Ce résultat est ensuite comparé avec des simulations numériques. Ils se sont aperçu qu'il y a une légère différence entre les deux trajectoires. Au début de la courbe, la trajectoire simulée effectue environ quatre tours de vis, alors que celle de l'expérience n'en fait que deux.

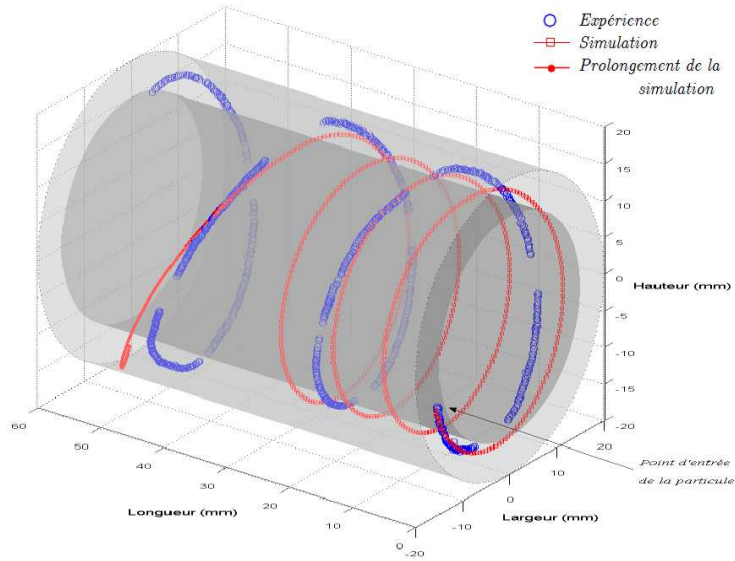


Figure 12: Comparaison entre une trajectoire obtenue expérimentalement avec la Visiovis à Irpm et la trajectoire correspondante en simulation numérique (Thèse M. Moguedet, 2005)

En ce qui concerne l'évolution du rayon de la particule dans le chenal, ils ont obtenu expérimentalement des résultats très proches de celui de la simulation. Plus précisément, la particule, une fois ajoutée dans le système, commence sa trajectoire près du cœur de la vis (axe de l'ensemble vis-fourreau), puis rapidement elle va vers la surface du fourreau pour finalement replonger vers l'axe du système. Plus remarquablement, le temps de passage près de l'un, ou l'autre des deux outillages est presque identique.

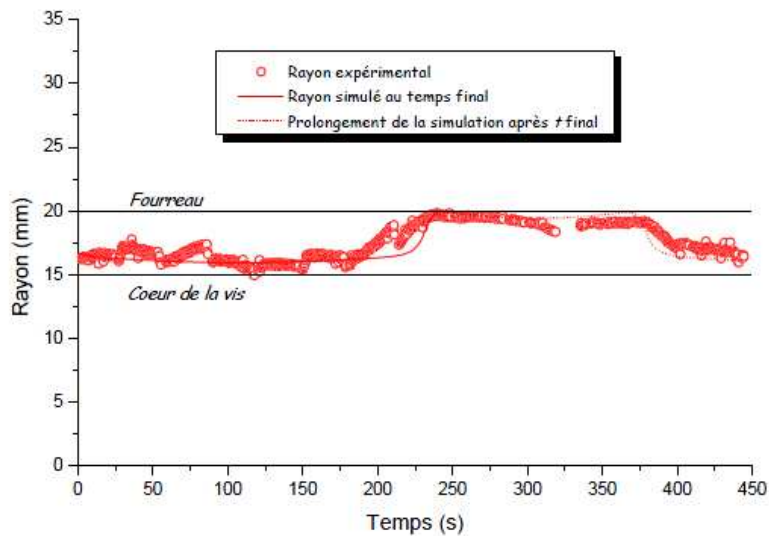


Figure 13: Comparaison de l'évolution du rayon expérimental et simulé de la particule dans la Visiovis, à Irpm (Thèse M. Moguedet, 2005)

2.2 Des limitations non négligeables

Ces deux systèmes de fourreaux : le fourreau presque industriel de Jin-Gao-Chen et le fourreau entièrement transparent sont innovants et très intéressants. Les premiers résultats obtenus sont prometteurs. Par contre, nous ne pouvons pas négliger les inconvénients de ces deux projets.

- Le fourreau de l'équipe de Gao et Jin est monté sur une presse industrielle, mais ce design n'est pas totalement transparent. Les cinq fenêtres, placées successivement et alternativement sur une certaine longueur du fourreau (5 x 80mm, par rapport à la longueur de la vis 19 x 36 mm), nous ont permis de visualiser l'évolution des phases de transformation du polymère dans le système vis-fourreau. Les deux premières fenêtres occupent la fin de la zone d'alimentation de la vis (5 derniers chenaux de cette zone). La troisième et la quatrième montrent totalement la zone de compression. Le dernier verre permet de voir le début de la zone de pompage. Mais comme nous pouvions le constater auparavant, seules les images des trois premières fenêtres sont exploitables. Dès que le polymère est totalement fondu dans le chenal de la vis, il devient transparent, les photos captées n'ont aucun intérêt. Les zones d'observation sont donc limitées.

Un autre inconvénient majeur de cette invention est de ne pas pouvoir visualiser en continu le changement d'état du polymère, car il n'utilise qu'une seule caméra pour plusieurs fenêtres, les résultats sont donc exploités par une estimation partielle en deux dimensions de l'écoulement. Depuis l'année 2004, dernière apparition des articles et les résultats cités précédents, nous ne trouvons pas de nouvelles de ce dispositif. Le design du fourreau, les caractéristiques des caméras, ainsi que les évolutions de cette machine restent confidentielles.

- La VISIOVIS est entièrement transparente, mais il n'est pas réalisé en verre normal, car ce dernier n'est pas adapté aux besoins de l'équipe (bon niveau optique, bonne résistance ...). Il est préférable d'envisager de faire ce type de fourreau en verre spécial (comme par exemple le quartz), mais par manque du temps et de financement, et aussi par la complexité dans un projet dont le défi principal était l'acquisition et la reconstruction des données, l'équipe a choisi de la réaliser en matière plastique (PMMA).

Le PMMA semble une solution peu onéreuse, et il est facile de former un cylindre de diamètre 40mm. La transparence de PMMA permet de travailler avec le système de caméras pour filmer le parcours de la particule. Par contre, la température de transition vitreuse du PMMA est autour de 100°C. Il n'est donc impossible de travailler avec des granulés de différents matériaux demandant une élévation importante de température. Les conditions de travail sont donc limitées à la température ambiante.

En plus, le PMMA est aussi un matériau sensible aux tensio-actifs. Il faut donc faire attention en utilisant des fluides introduits dans l'ensemble du système, ainsi qu'aux solvants de nettoyage. Car certains fluides peuvent contenir des composants chimiques qui peuvent agresser la matière PMMA, et la transparence du fourreau n'est plus assurée.

- Les conditions de travail avec la VISIOVIS sont particulièrement compliquées. M. Moguedet et ses coéquipiers ont dû trouver un fluide avec des propriétés particulières :
 - Macromoléculaire
 - Résistant à l'UV
 - Transparent
 - Inerte et compatible avec PMMA
 - Permettant de travailler à température ambiante.
 - De viscosité très supérieure à l'eau mais sans créer de couple trop important sur le moteur

Depuis ces recherches, les différents tests sont faits avec une huile de silicone polydiméthyl siloxane (PDMS). Cette dernière est un fluide transparent qui répond parfaitement aux conditions attendues par l'équipe. En plus de cela, étant un fluide Newtonien, le PDMS permet de faire différentes expériences avec des vitesses de rotations de la vis très basses, et les résultats ne changent pas quand ces vitesses augmentent. En revanche, les fluides restent des fluides, ils ne peuvent donc pas étudier intégralement la plastification de la matière plastique dans le système vis-fourreau, de l'état solide à l'état fondu.

- L'autre point important est le problème optique rencontré lors de l'expérience avec la Visiovis. L'utilisation d'un fourreau avec deux faces cylindriques augmente les effets optiques de réfraction. Les déformations dues à la réfraction ont posé quelques difficultés pour la reconstruction finale de la trajectoire tridimensionnelle. Ils ont proposé d'utiliser un fourreau transparent, avec des faces externes planes pour diminuer les effets de la réfraction.

Ces deux inventions ont pourtant des résultats très intéressants. Ils nous montrent l'intérêt d'avoir un jour un vrai fourreau "transparent", sur notre presse à injecter. Ce fourreau devrait donc limiter au maximum les points négatifs, afin de pouvoir atteindre notre objectif final, étudier pleinement la plastification du polymère dans l'ensemble de système vis-fourreau industriel.

2.3 Presse à injecter Billion H470 – 200T

Depuis 2005, le site de Plasturgie a investi dans une presse à injecter de la société Billion. Cette dernière nous permet d'effectuer plusieurs projets de recherche au sein du laboratoire du site de plasturgie, essentiellement sur les études de matières plastiques, les défauts de pièces plastiques, différentes surfaces de moule.

Dans le tableau 4, nous retrouvons les caractéristiques principales de la presse Billion H470. Originellement, cette presse est livrée avec un fourreau pour une vis de diamètre 38 mm. Mais sa capacité permet l'utilisation de vis de diamètre 40 mm, au maximum 45 mm. Elle représente une presse à injecter de taille industrielle au sein de notre laboratoire. Après avoir consulté le fournisseur de cette presse, nous décidons de concevoir l'ensemble de notre fourreau à fenêtre pour l'utilisation d'une vis de diamètre 40 mm (référence BILLON). Ce type de vis est très courant, nous pouvons donc réaliser plusieurs tests, et même accepter les tests demandés par les entreprises dans l'avenir.

Notre objectif dans le projet FONCLIMICS est de créer un fourreau transparent, qui va être monté sur la presse à injecter Billion H470 – 200T. Il est donc nécessaire de citer ici quelques points très importants dans le cahier des charges de notre fourreau.

- La presse de taille industrielle avec :
 - La pression maximale atteinte avec cette presse est très importante
 - La température de travail dépend de la matière utilisée (maximum 300°C)
- La géométrie du verre doit permettre d'utiliser une technique de suivi des particules comme la PIV par exemple.
- Les verres doivent être rectangulaires, pour éviter les problèmes de réfraction
- Les verres doivent être démontables, et avoir un excellent niveau optique

Jusqu'à maintenant, il n'y a aucun autre fourreau à fenêtre autre que celui de l'équipe de Gao – Jin. Par contre, aucune information concernant leurs fenêtres en verre n'est communiquée dans la littérature. Nous décidons de consacrer notre temps tout d'abord à l'étude des fenêtres transparentes, car c'est le point principal du projet. Le but est de trouver un type de verre adapté aux besoins, de concevoir sa forme, d'analyser sa résistance aux conditions de travail puis de faire fabriquer ces pièces, afin d'atteindre notre objectif de visualiser l'intérieur de l'ensemble vis-fourreau.



Figure 14: Presse à Injecter Billion H470 – 200T du Site de Plasturgie, Bellignat

Modèle de la machine	Billion H470 - 200T - N° Série 15222	
Poids de la machine	9,3 (Tonnes)	
Course d'ouverture maximum	175 (mm)	
Vitesse maximum d'avance de la vis	380 (mm/s)	
Course de l'unité injection	340 (mm)	
Vitesse max. d'avance de l'unité d'injection	120 (mm/s)	
Vitesse max. de recul de l'unité d'injection	120 (mm/s)	
Force d'appui de la buse	67,2 (kN)	
Moteur électrique	APU160L - 1500 - 18,5kW - 50Hz - 400V	
Pompe Hydraulique + Capacité	TLC.SHW 014 5PO301 MO - 160 bars	
Force de verrouillage maximum	2011 kN	
	Vis ϕ 38 mm	Vis ϕ 40 mm
Rapport L/D	23	23,5
Volume max. théorie déplacé	198 (cm ³)	220 (cm ³)
Pression max. sur la matière	2327 (bars)	2100 (bars)
Débit maximum d'injection	430 (cm ³ /s)	475 (cm ³ /s)
Vitesse max. de rotation vis	300 (tr/min)	300 (tr/min)
Vitesse max. de rotation vis continue	210 (tr/min)	210 (tr/min)
Débit théorique par tour	4,9 (cm ³)	5,9 (cm ³)
Couple max. d'entraînement vis	45,7 (m.daN)	58,5 (m.daN)

Tableau 4: Propriétés principales de la presse à injecter Billion H470 – 200T