



# THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Docteur de l'Université de Strasbourg  
Spécialité : Sciences de l'Ingénieur

par Jean-Luc DREYER

---

LE COMPACTAGE DES MATIERES PLASTIQUES  
EN INJECTION ASSISTEE PAR GAZ

---

Soutenue le 15 mars 2010 devant le jury composé de:

Président  
Rapporteurs

Pr. René MULLER, ECPM Université de Strasbourg  
Pr. Jean-François AGASSANT, MINES ParisTech  
Pr. Didier GRAEBLING, Université de Pau  
et des Pays de l'Adour

Directeur de thèse  
Invités

Pr. Yves REMOND, IMFS Université de Strasbourg  
Pr. Said AHZI, IMFS Université de Strasbourg  
Dipl. Ing. Helmut ECKARDT, Wittmann-Battenfeld

# Préliminaire

Il arrive qu'aux détours d'investigations sur le terrain on obtienne des résultats surprenants voire complètement imprévisibles et surtout, en parfaite contradiction avec les règles habituellement admises comme axiomes.

Dans un premier temps, on observe et on analyse les raisons de ces résultats en considérant que le hasard en a été le grand maître d'œuvre. Lorsque sur un autre projet, ce hasard se renouvelle; on observe sa réapparition comme un bonheur d'autant plus qu'il permet de résoudre une très grosse partie des problèmes en production.

Après avoir eu l'opportunité de mettre en œuvre la méthode sur de nombreuses autres pièces, le résultat put être considéré comme reproductible. A chaque occasion, nous avons observé l'absence totale de déformations des différentes pièces.

## REMERCIEMENTS

Les études des différentes pièces présentées dans ce travail ont été confiées à ma petite société Simplast par des partenaires industriels que je tiens à remercier :

- ROTH FRERES (devenue Johnson Controls) à Strasbourg
- JOHNSON CONTROLS à Creutzwald,
- OMEGAL (devenue Mecaplast) à Ostwald
- GIDI PRODUCTION à Chalon sur Saône
- AI2P à Mourenx
- et d'autres encore mais dont les pièces ne sont pas présentées dans ce document

Au delà du travail facturé, il a fallu un nombre considérable d'heures d'analyses et de vérifications avant d'être convaincu de l'intérêt des phénomènes observés en pratique.

Rédiger une thèse est un exercice long et fastidieux, mais la corriger doit sans aucun doute l'être encore beaucoup plus. C'est pour son opiniâtreté à me voir rédiger un document dans les normes et avec la rigueur scientifique indispensable à un tel document que je tiens particulièrement à remercier Monsieur Jean-François Agassant du Cemef de Mines Paristech. Cela n'a pas dû être évident de convaincre un étudiant un peu moins souple que la moyenne de se remettre en cause.

Lui aussi, a dû faire preuve de patience ! Merci à Didier Graebbling de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour d'avoir consacré de son temps pour m'avoir aidé à formater des idées qui étaient au départ quelque peu dispersées.

Cela m'a fait plaisir de retrouver René Muller aujourd'hui à l'ECPM, avant, à l'Ecole d'Application des Hauts Polymères de Strasbourg, quelques vingt cinq ans après notre dernière rencontre dans la même salle du même bâtiment, mais c'était lui qui était au pupitre à cette époque !

Ensuite, il a fallu le hasard, encore lui, pour que j'ai la chance de rencontrer le Directeur nouvelles technologies de Battfeld, Monsieur Helmut Eckardt. Dans le domaine de l'injection, son nom est synonyme d'innovations et c'est par la multitude de ses articles qu'il a vulgarisé ce procédé et a su mettre en lumière les avantages tant techniques qu'économiques de ce procédé.

Je remercie ensuite Yves Rémond d'avoir bien voulu accepter d'être mon directeur de thèse. Ce fut une chance qu'il accepte de diriger un étudiant aussi atypique et têtu que moi. Je ne fus pas souvent dans son laboratoire, mais celui ci a toujours gardé la porte ouverte.

Merci à mes parents de m'avoir permis de faire des études, même si je n'ai jamais suivi le chemin qu'ils avaient imaginé !

à Nicole, mon épouse  
Lucie, Mathilde et Louise, qu'elles puissent être  
fières de leur papa,

# Sommaire

Introduction générale	7
-----------------------	---

## 1<sup>ère</sup> Partie

<b>1. Présentation de l'injection assistée par gaz</b>	
1.1 Présentation de l'injection des polymères	11
1.2 Présentation du compactage en injection classique	14
1.3 Présentation de l'injection assistée par gaz	18
1.4 Présentation du procédé de remplissage partiel	21
Avantages	26
Inconvénients	27
Préconisations	28
1.5 Présentation des autres procédés d'injection assistée par gaz	30
Technique de remplissage avec utilisation de masselotte	26
Technique de refoulement dans le fourreau	32
Technique de noyau mobile	34
L'injection de gaz « full shot »	35
L'injection externe de gaz	36
L'injection de gaz hyper-refroidi	37

## 2<sup>ème</sup> Partie

<b>2. Etude bibliographique de l'injection assistée par gaz</b>	38
---	----

## 3<sup>ème</sup> Partie

<b>3. Modélisation des procédés</b>	44
3.1 Introduction à l'intérêt de la simulation	44
3.2 Gestion de l'interface en injection assistée par gaz	46
3.3 Approche théorique 3D	47
3.4 Méthodologie d'une étude REM3D	48

## 4<sup>ème</sup> Partie

<b>4. Etude d'un cas simple</b>	50
4.1 Méthodologie d'une étude C-Mold	50
4.2 Etude d'un cas simple avec C-Mold	53
4.3 Analyse	60
4.4 Etude de ce cas simple avec REM3D	61
4.5 Proposition d'explication	63

## 5ème Partie

<b>5.</b>	<b>Etudes de cas complexes</b>	65
5.1	Introduction	65
5.2	Tablette arrière de l'Audi TT	66
	- présentation de la pièce	66
	- approche numérique	70
	- résultats pratiques	75
	- analyse des différents résultats	78
5.3	Insert de pare-soleil BMW	79
	- mise en situation	79
	- analyse rhéologique	82
5.4	Garnissage de toit ouvrant	87
	- mise en situation	87
	- analyse rhéologique	89
	- intérêt économique	93
5.5	Chaise Philippe Starck	94
	- mise en situation	94
	- analyse rhéologique	95
5.6	Coiffe de mixer	96
	- mise en situation	96
	- analyse rhéologique	98
<b>6.</b>	<b>Conclusions</b>	99
<b>Annexe A</b>	<b>Présentation des différents procédés d'injection</b>	100
	L'injection multi-matières	100
	L'injection soufflage	102
	L'injection-compression	103
	L'injection assistée par eau	104
	L'injection MuCell	105
	L'injection avec agents gonflants	106
<b>Annexe B</b>	<b>Quelques brevets en injection assistée par gaz</b>	
<b>Annexe C</b>	<b>Extrait de l'Article des Techniques de l'Ingénieur AM3693</b>	

## Bibliographie

## Introduction générale

Les transformateurs de matières plastiques sont aujourd'hui confrontés, d'une part à leurs donneurs d'ordres qui exigent des réductions de coûts annuels de 5%, et d'autre part à l'augmentation du coût des polymères de plus de 30% depuis 2005. Ces chiffres fluctuent évidemment en fonction de la conjoncture économique mais peuvent être pris comme ordres de grandeurs. Pour survivre et se développer, ils sont obligés de réduire leurs coûts de production, d'améliorer leur productivité et d'augmenter le niveau de qualité.

Différents facteurs de coûts peuvent être mentionnés:

- coût de la main d'œuvre
- prix du moule
- prix de la matière
- coût horaire de la machine

Le coût de la main d'œuvre est un problème connu. Le coût du moule relève des mêmes causes et a donc les mêmes effets. Le prix de la matière est imposé par les fournisseurs. Seule l'utilisation judicieuse de procédés traditionnels mais améliorés ou combinés telle l'injection à basse pression peut faire chuter de façon significative l'influence du coût de la machine sur le coût pièce. L'injection assistée par gaz est l'un de ces procédés.

Pour donner un ordre de grandeur de l'intérêt du procédé, nous avons réalisé des essais en injection classique sur une presse à injecter de 250 tonnes alors qu'en injectant du gaz, nous avons pu verrouiller le moule à 100 tonnes. Il était donc possible de produire deux pièces au lieu d'une sur la même machine; ceci n'est qu'un exemple. Les constructeurs de presses à injecter ont d'ailleurs bien compris l'intérêt du procédé; ils commencent à proposer des machines sous-dimensionnées en verrouillage et surdimensionnées en taille de plateaux et en unité d'injection.

Afin d'optimiser la conception tant de la pièce que de l'outillage devant permettre sa production, les transformateurs n'hésitent plus aujourd'hui à étudier ou à faire étudier le remplissage de la cavité permettant la production de leurs pièces plastiques. Cette étude doit donc être menée de façon très minutieuse et permettre de proposer au transformateur une grille de paramètres de réglages. Des outils comme les plans d'expériences type Taguchi permettent de gagner un temps significatif sur la phase de mise au point d'un outillage. Cependant, il subsistera toujours les trois phases d'un cycle d'injection:

- une injection dynamique avec un remplissage de la cavité compris entre 92% et 98% du volume.
- une phase appelée maintien qui permet de terminer le remplissage mais aussi de compenser les phénomènes de retraits de la matière
- une phase de refroidissement qui n'a d'autre fonction que de solidifier le polymère

En injection classique, c'est la phase de maintien qui conditionne à 80% la qualité de la pièce tant au niveau qualité qu'au niveau dimensionnel. Cette phase est en pratique décomposée en deux étapes:

- injection statique jusqu'au remplissage complet de la cavité
- maintien en pression (typiquement 80% de la pression d'injection) pour compenser les phénomènes de retraits de la matière

Cette phase de compactage est indispensable car elle permet de compenser la très forte variation de volume spécifique des polymères avec la température et la pression.

Après la commutation, le remplissage de la cavité se réalise en général à pression constante. Le niveau de pression est: soit donné par l'expérience, soit donné par une étude rhéologique. En règle générale, la corrélation entre l'expérience et la théorie est acceptable. Ce phénomène de remplissage s'accompagne d'une augmentation importante de la force de fermeture jusqu'au remplissage complet de la cavité. A partir de cet instant, la phase de maintien ne sert qu'à compenser les phénomènes de retraits, la force de fermeture décroissant dès cet instant.

Cette phase de compactage est sans aucun doute la plus compliquée à mettre en œuvre car tous les phénomènes physiques interagissent les uns avec les autres. Toutes les caractéristiques physiques du polymère changent: viscosité, pression, température. Compactier à basse pression risque de provoquer des retassures en fin d'écoulement alors que compactier à haute pression risque d'avoir pour conséquences des déformations de la pièce. En pratique, la durée du compactage est un paramètre supplémentaire à ajouter car la durée de cette phase de compactage influence le temps de cycle et par un retard du dosage et donc de l'homogénéité de la matière.

Autant en injection classique, de nombreux travaux ont traité de l'étude de la phase de compactage, autant en injection assistée par gaz il subsiste encore de nombreuses interrogations. Nous rappellerons brièvement les phénomènes physiques qui interviennent lors de cette phase tant en injection classique qu'en injection assistée par gaz. Tous ceux qui ont travaillé sur ce procédé, ont pu dans certains cas observer des améliorations tant au niveau de la qualité qu'au niveau du dimensionnel. Les transformateurs de leur côté ont ressenti intuitivement que l'injection assistée par gaz devait avoir une influence sur le retrait et sur les déformations. Pour y parvenir, certains ont multiplié les points d'injection du gaz, ont commandé l'injection de gaz de façon séquentielle et à des pressions différentes avec pour conséquence une augmentation de la complexité des outillages et de la durée de mise au point.

Sur ces problèmes techniques, se sont greffés des contraintes juridiques avec une multiplication de demandes de brevets. Plus de 250 brevets co-existent plus ou moins bien aujourd'hui dans le monde. Ces brevets couvrent tant le matériel mis en œuvre que la façon d'injecter le gaz ou de la conception de l'injecteur et même de concept de pièces. Face à ces difficultés, de nombreux transformateurs ont préféré orienter leurs recherches vers d'autres procédés mais avec le même objectif de réduire l'énergie nécessaire à la mise en œuvre.

Cependant, certaines variantes de l'injection assistée par gaz telle le remplissage partiel, présentent des avantages économiques considérables, et qui peuvent s'avérer décisifs pour l'attribution de certains marchés. Nous reviendrons plus loin sur le procédé de remplissage partiel et sur ses particularités ; nous citerons tout de même ses principaux avantages :

- éviter l'augmentation de la force de fermeture en remplaçant la phase de compactage assurée par la presse à injecter, par une injection d'azote sous pression.
- homogénéiser le champ de pression en phase de compactage.

Notre travail a consisté à montrer que certaines géométries particulières permettent d'obtenir des propriétés et des avantages considérables :

- suppression totale des déformations
- diminution du temps de cycle
- retrait parfaitement homogène
- diminution considérable de la force de fermeture



Dans la première partie, nous rappellerons les bases du procédé d'injection des matières thermoplastiques. Mais, nous ferons également un inventaire non exhaustif des différentes variantes de ce procédé. Bien entendu, nous n'entrerons pas dans les détails et les particularités de chacune de ces variantes qui, en plus, peuvent souvent être combinées entre elles. Parmi ces procédés, nous insisterons plus longuement sur le procédé d'injection assistée par gaz. Là aussi, il pourra être décliné en plusieurs variantes pour lesquelles nous présenterons pour chacun d'elles, les avantages et les inconvénients. Pour la suite de notre travail, nous ne reparlerons ensuite que du remplissage partiel en injection assistée par gaz. Dans l'étude bibliographique réalisée, nous avons mis en évidence le nombre important de travaux réalisés au niveau théorique pour reproduire par simulation numérique les résultats pratiques. Nous avons également, dans cette partie, rappelé très brièvement les notions mathématiques qui permettent aux logiciels de reproduire les phénomènes physiques régissant l'écoulement d'un polymère fondu sous pression suivi de l'écoulement d'un gaz sous pression.

Dans la deuxième partie, nous traiterons exclusivement de la phase de compactage du polymère fondu. A partir de courbes caractéristiques, nous montrerons la différence fondamentale entre un compactage effectué en injection classique et un compactage optimisé en injection assistée par gaz.

Dans les bureaux d'études, les concepteurs de pièces plastiques injectées avaient toujours pour consigne d'éloigner les différentes veines les unes des autres et d'éviter une possible inter-connexion entre elles. Ce choix technologique peut ressembler à un axiome. De plus, la littérature préconisait d'éviter ce type de configuration au risque d'obtenir un amas matière entre les deux veines de gaz. Les bureaux d'études ont pendant des années appliqué cette maxime à la lettre. Ce choix n'est pas dû au hasard, lorsque deux bulles se déplacent l'une vers l'autre en repoussant une certaine quantité de polymère, cette matière ne peut évidemment pas disparaître. Voilà le problème principal qui s'est posé à nous ; dans certaines configurations géométriques spéciales, plusieurs veines gaz ont réussi à communiquer entre elles. Notre travail peut se résumer par la question: l'amas de matière entre les veines gaz disparaît, mais où va la matière ? La question suivante qui se posera ensuite : pourquoi la théorie est elle en défaut par rapport à la pratique?

Dans la troisième partie, nous essayerons de répondre à cette question en exposant plusieurs cas industriels concrets de pièces aujourd'hui en production. Mais, pour bien expliquer le phénomène observé, nous avons décortiqué un cas purement théorique très simple qui a permis d'observer une parfaite homogénéité du champ de pressions en phase de compactage.

C'est là le cœur de notre travail. Nous avons observé que ce compactage homogène permet une parfaite compensation des retraits et cela dans toute la pièce ; alors qu'en injection classique subsiste en permanence un gradient de pression conséquence de la perte de charge dans la cavité. Nous avons particulièrement insisté sur les résultats en remplissage et en pression. Nous avons mis en évidence la rapidité de l'homogénéisation du champ de pression dans la cavité. Pour terminer, nous avons également montré que le niveau de pression n'a que très peu d'influence sur le retrait volumique de la matière.

La cinquième partie est exclusivement consacrée à l'étude de différentes pièces industrielles sur lesquelles cette idée avait pu être mise en œuvre. Les résultats pratiques furent spectaculaires ; sur certaines pièces nous avons obtenu des déformations nulles et un dimensionnel à la cote nominale. Ce résultat représente l'objectif idéal de tout transformateur de matières plastiques par injection. Dès à présent, il faudra préciser que la connexion entre les différentes veines de gaz relève plus d'une particularité géométrique que d'une règle généralisable à toute pièce mise en œuvre en injection assistée par gaz.

En Annexe, nous avons donné quelques informations concernant la mise en œuvre du procédé d'injection assistée par gaz, nous parlerons entre autres de source d'azote et de matériels périphériques.

# 1<sup>ère</sup> Partie

## Présentation de l'injection assistée par gaz

### 1.1 Présentation de l'injection des polymères

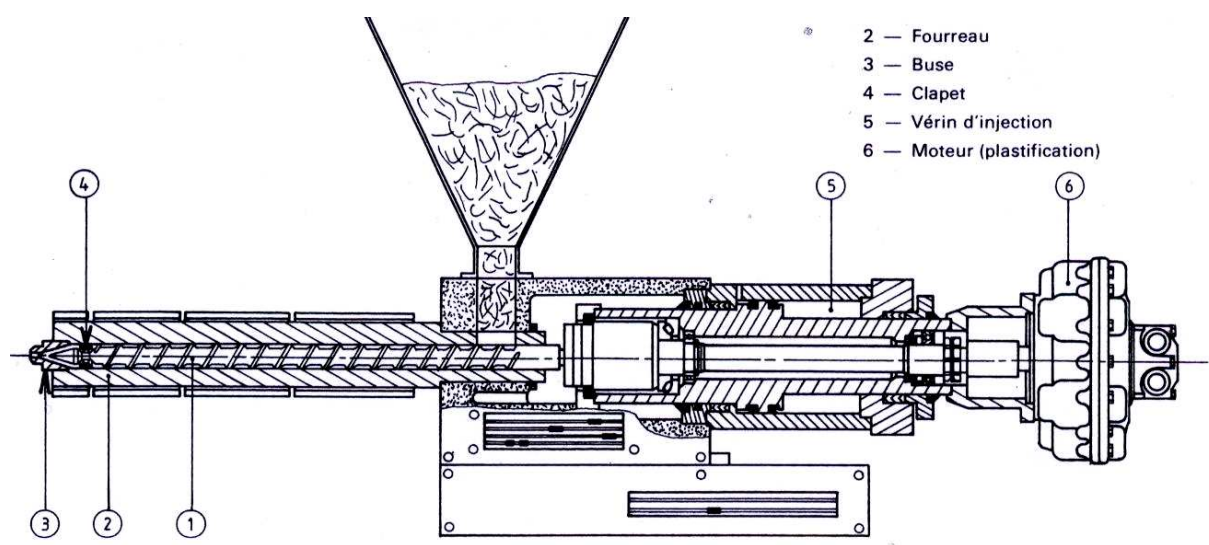
Parmi les procédés de mise en forme des polymères, le procédé d'injection occupe une place prépondérante car permet la réalisation de pièces de géométrie complexe. Ce procédé se rapproche de la coulée des métaux à deux différences essentielles près:

- l'énorme pression qu'il faut exercer sur la matière pour la faire entrer dans le moule.
- les polymères sont de très mauvais conducteurs de chaleur et les refroidir en profondeur est difficile

Ce sont ces deux propriétés particulières (forte viscosité et faible conductivité thermique) qui font la spécificité du procédé d'injection des matières plastiques. Ce sont elles aussi qui sont la cause de toutes les difficultés, l'origine directe ou indirecte de la quasi totalité des défauts des pièces injectées.

Cependant, le procédé est particulièrement adapté à la production de pièces de grande série. La substitution des pièces métalliques par des ensembles complexes de pièces plastiques se poursuit et requiert des matériaux de plus en plus performants, un respect des géométries compatible avec des tolérances serrées, ou un aspect de surface sans marque de retassures.

Le procédé consiste schématiquement à transformer des granulés en masse fondue, puis d'injecter cette masse dans un volume de dimensions finies dans le temps le plus court possible.



**Figure 1:** Schéma de principe d'une presse à injecter [40]

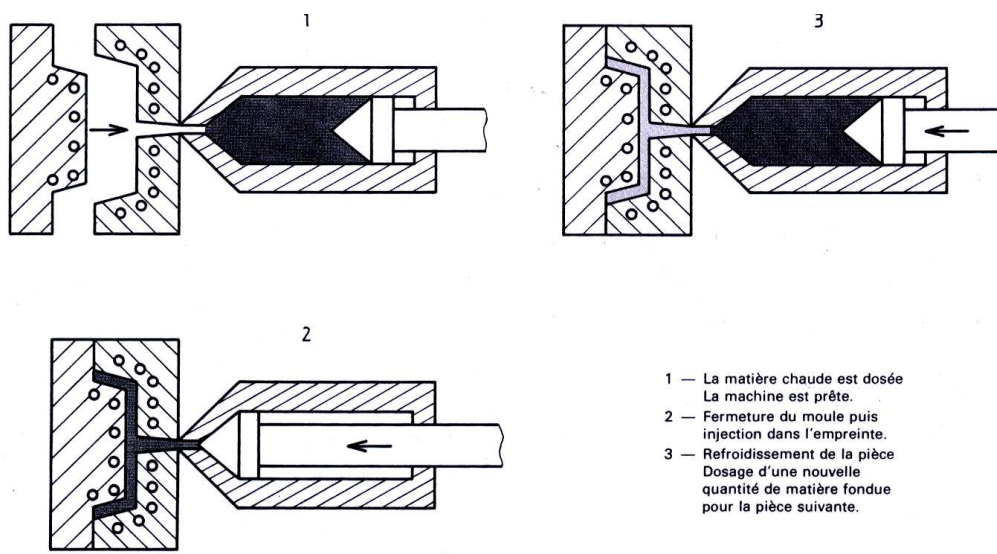
Les pièces devenant de plus en plus complexes, les outillages de production demandent une mise au point qui peut s'avérer longue et extrêmement coûteuse. Cette phase d'essais peut induire des modifications des outillages, elles aussi préjudiciables aux délais de livraison des pièces. Il n'est pas rare de devoir assurer la production des premières pièces avec les outillages prototypes.

Ces exigences, tant en qualité, qu'en coûts et délais ont conduit à étudier les modes d'écoulement de la matière dans les moules et à suivre l'évolution des différents paramètres pendant le cycle d'injection. Parmi ces différents paramètres, il en est un que l'on se doit de suivre particulièrement à savoir la pression réellement appliquée à la matière pendant tout le cycle de mise en forme. Grâce à ces observations, à la connaissance des comportements de la matière, on est en mesure aujourd'hui de décrire avec précision ce qui se passe dans le moule pendant l'injection.

Les outils récents de simulation utilisent des modèles physiques intégrant un certain nombre de caractéristiques de la matière ainsi que les paramètres de mise en œuvre. Il reste cependant des paramètres négligés:

- l'hygrométrie de l'air
- le moule est considéré comme indéformable
- la matière est considérée comme visco-élastique
- l'état de surface du moule
- etc...

Après avoir donné un aperçu succinct d'une presse à injecter, nous allons décomposer un cycle d'injection et en donner les principales caractéristiques.

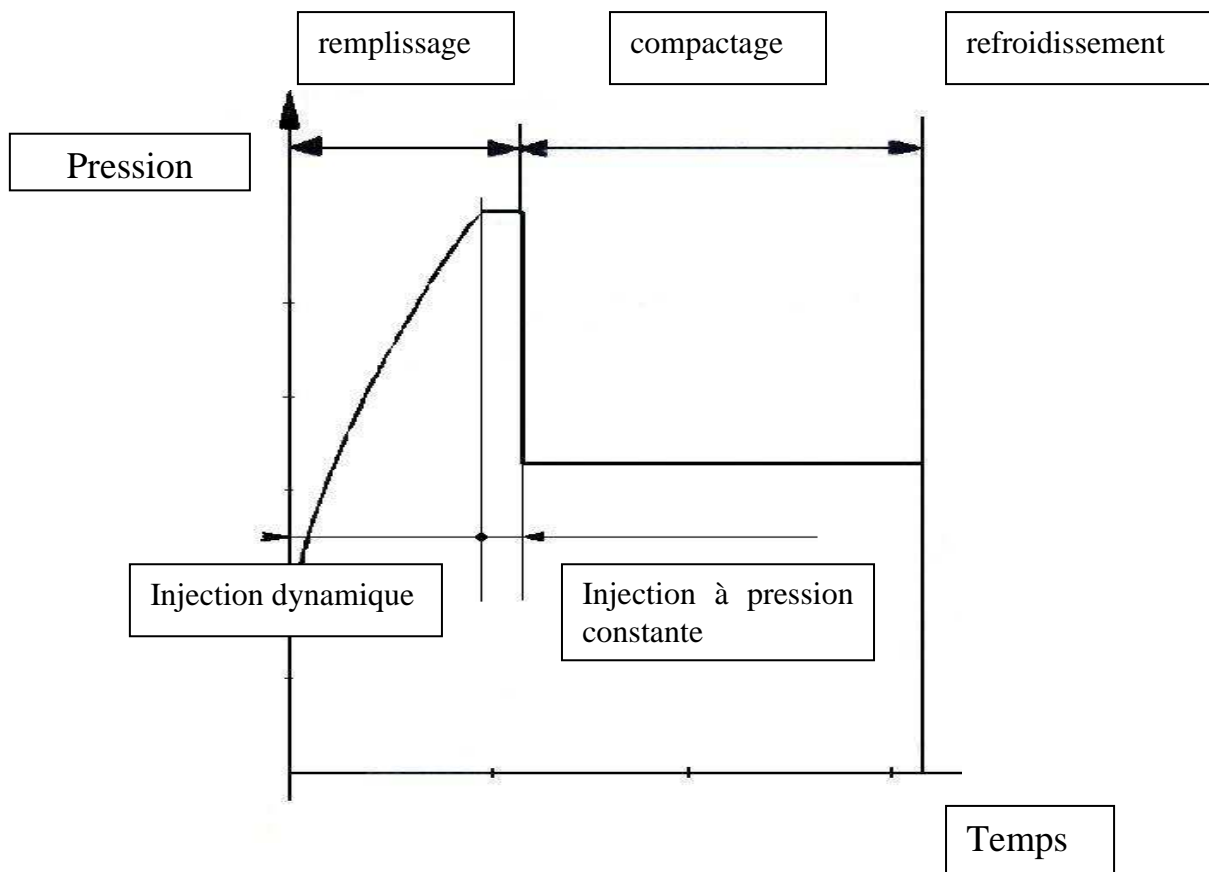


**Figure 2:** Schémas de décomposition d'un cycle d'injection [40]

1. Le moule est en cours de fermeture, la presse à injecter a terminé le dosage de la matière, c'est la première étape d'un cycle d'injection. On observera que les deux parties du moule sont percées d'une multitude de canaux de refroidissement. Les moules sont toujours régulés en température de façon à refroidir au mieux la matière et ainsi pouvoir minimiser les temps de production. Le fluide caloporteur habituellement utilisé est un mélange d'eau et de glycol à 15%, le glycol permettant de limiter la corrosion du moule.

2. Le remplissage de la cavité se réalise au cours de l'étape 2. La vis avance à vitesse constante en un ou plusieurs paliers jusqu'au remplissage presque complet de la cavité. On observe sur le schéma que la vis est en butée dans le fourreau ; en pratique, il subsiste à l'avant de la vis une certaine quantité de matière qui aura deux fonctions : terminer le remplissage en phase de maintien et éviter que la vis ne heurte brutalement le fourreau. Même si la vis est parfaitement pilotée en vitesse, il est préférable de conserver un matelas de matière ayant ce rôle d'amortisseur.

3. La troisième étape doit être décomposée en deux phases distinctes : le compactage du polymère et le refroidissement de la matière. Le compactage débute pratiquement entre 94% et 98% du remplissage volumique de la cavité de la pièce. Après un remplissage dynamique à vitesse constante, le mode de pilotage de la presse à injecter impose alors une fin de remplissage à pression constante. Ce compactage permet de compenser les phénomènes de retrait, le polymère à l'état fondu occupant plus de place à l'état fondu qu'à l'état solide. Un ou plusieurs paliers de pression sont appliqués jusqu'à complète solidification du seuil. Une fois le seuil solidifié, il est impossible de nourrir la pièce en matière et la phase de refroidissement peut alors commencer. L'optimisation de ces deux phases permettra d'atteindre le niveau de qualité requis. C'est aussi la phase la plus critique dans la mesure où une pression trop importante engendre des déformations, et une pression trop basse a pour conséquences des retassures. Nous reviendrons sur cette étape de compactage ultérieurement.



**Figure 3:** Evolution de la pression d'injection au seuil

Sur cette figure, nous avons transcrit l'évolution de la pression en fonction du temps en reproduisant le procédé décrit en Figure 2. Cette courbe est représentative d'une évolution de la pression près du point d'injection. Pages suivantes, nous déclinerons ce graphique en fonction de la position dans la cavité.

## 1.2 Présentation du compactage en injection classique

Tout transformateur de matières plastiques par injection sait qu'il doit trouver un compromis entre retassures et déformations. La phase de compactage peut être considérée comme la principale cause des déformations d'une pièce injectée, néanmoins il en existe d'autres :

- retrait différentiel dus souvent à des variations d'épaisseurs
- échanges thermiques déséquilibrés entre partie fixe et partie mobile du moule
- orientation des fibres de verre sous cisaillement

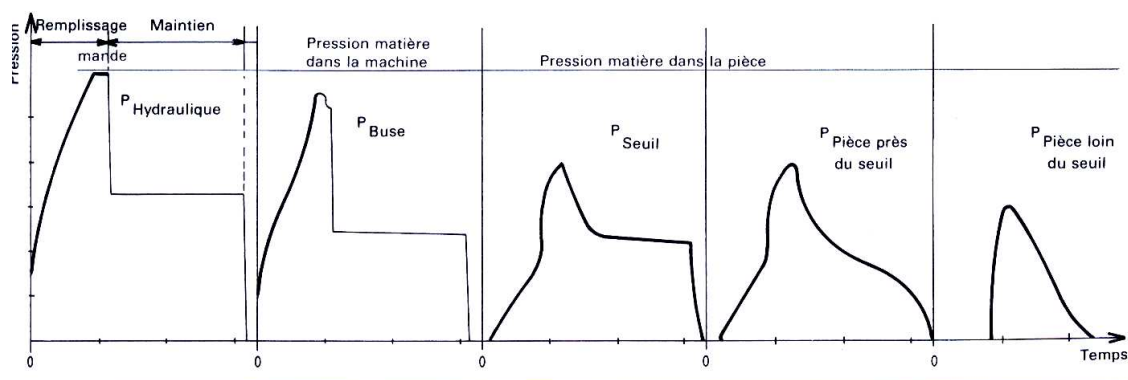


**Figure 4:** Coiffe du Mixer Rondo SEB pour AI2P

Lors de la phase d'injection dynamique, la pression d'injection augmente proportionnellement à la longueur d'écoulement. Au niveau de l'entrée du moule, la pression exercée est donc extrêmement importante, pour certaines matières très visqueuses comme des alliages PPE-PS-PA, on peut atteindre sans problème des pressions supérieures à 2000 bar alors que la pièce a une longueur d'écoulement de 20 cm mais un entrefer de 1.25 mm. Cette valeur a été mesurée sur un séparateur de tube cathodique réalisé en Noryl. Néanmoins, cette phase est une phase dynamique pendant laquelle la vis sans fin de la presse à injecter est en mouvement rapide.

Lorsque 90% à 98% du volume de la cavité est rempli, le mode de remplissage change et l'on passe à un remplissage statique à pression constante. Non seulement on termine le remplissage de la cavité mais en plus on continue à nourrir la pièce avec du polymère fondu de façon à compenser les phénomènes de retrait de la matière. On maintient donc un gradient de pression important dans la matière alors que celle-ci commence à se refroidir, très schématiquement ; on « stocke » des contraintes qui se transformeront dès l'ouverture du moule en déformations.

Nous avons visualisé ci-dessous les courbes de pression dans le moule depuis les consignes d'entrées depuis la presse à injecter jusqu'au dernier point rempli au niveau de la cavité.



Courbe 1 Courbe 2 Courbe 3 Courbe 4 Courbe 5  
**Figure 5:** Courbes de pression du polymère durant l'injection [41]

La **courbe 1** montre l'évolution de la pression de consigne, le premier tronçon fortement croissant montre la phase d'injection dynamique, phase pendant laquelle le polymère est poussé à vitesse contrôlée dans la cavité. Cette rapide montée en pression traduit la faible compressibilité de la matière. Très peu de temps avant la fin du remplissage de la cavité, le mode de pilotage de la vis de la presse passe d'un contrôle en vitesse à un contrôle en pression. Le remplissage de la cavité se poursuit alors à pression constante. Cette pression peut varier entre 50% et 80% de la pression maximum d'injection. La durée du maintien est donnée en pratique par la mesure du poids pièce.

La **courbe 2** est la courbe réelle observée au niveau de la buse d'injection. On remarquera la perte de charge dans la machine lors de la phase de maintien.

Au niveau du seuil, **courbe 3**, le profil observé en pratique commence à différer sensiblement par rapport à la consigne. Nous avons déjà intégré les pertes de charge dans le système d'alimentation.

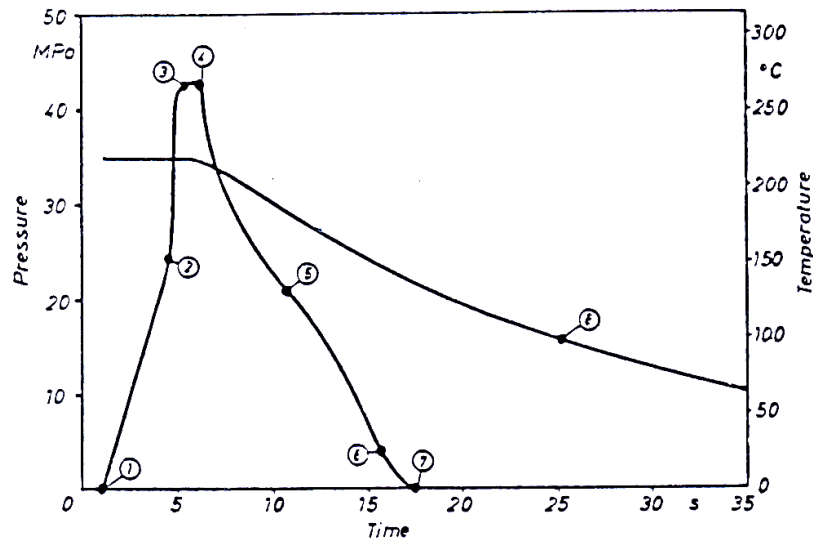
Autant la phase d'injection dynamique avec la courbe précédente est similaire, autant la phase de maintien diffère. La **courbe 4** montre ainsi qu'une pression de consigne ne se retrouve pas forcément appliquée sur la matière d'où la difficulté à compenser parfaitement les phénomènes de retraits.

La **courbe 5** montre que la matière chaude arrivant tardivement dans la cavité a également besoin d'être compactée correctement. Malheureusement, se trouvant loin du point d'injection, la pression qui est appliquée est très éloignée de la consigne. Ce phénomène est dû à la perte de charge sur le parcours de la matière.

A l'état fondu, le polymère occupe un volume supérieur que celui qu'il occupe à l'état solide. De plus, cette variation de volume est étroitement fonction de la pression. Cette variation de volume spécifique est décrite par les courbes PVT et souvent modélisée par la loi de Tait.

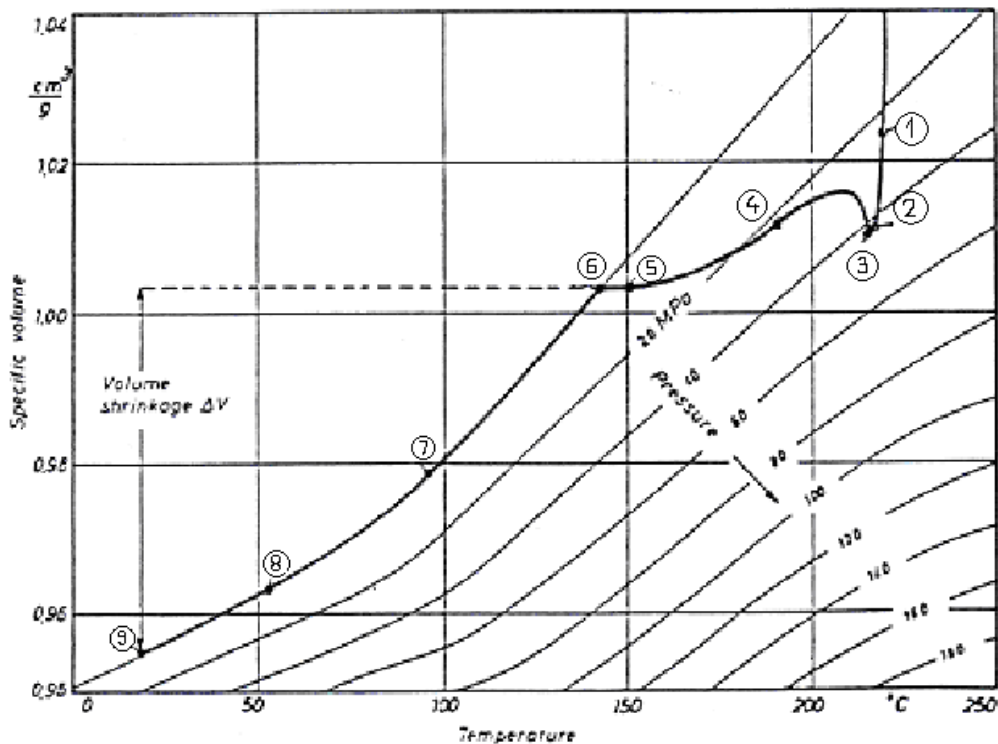
Pour avoir une pièce conforme au dimensionnel demandé, il est indispensable d'appliquer une pression importante sur la matière chaude de façon à compenser son retrait volumique. Cette pression va introduire dans la cavité une quantité additionnelle de matière.

En reprenant une courbe de pression, nous allons lier cette pression aux caractéristiques intrinsèques de la matière à partir des courbes PVT. On pourra ainsi commencer à relier les phénomènes physiques aux équations régissant le comportement des polymères.



**Figure 6:** Courbe de pression et de température en phase d'injection [41]

On suivra la montée en pression lors de la phase d'injection dynamique et cela jusqu'au point 3. Le remplissage se poursuit alors sur une courbe isobare jusqu'au remplissage complet de la cavité. La machine pousse à pression contrôlée sur la matière pendant une dizaine de secondes typiquement, pendant lesquelles on introduit de 5% à 15% de matière additionnelle dans le moule. C'est la compressibilité de la matière qui permet d'ajouter une telle quantité de matière.



**Figure 7:** Diagramme PVT du PS et diminution de la pression dans la cavité [41]



Schématiquement, on pourra donc décrire le procédé d'injection de la façon suivante :

- une injection dynamique avec un écoulement isotherme ou mieux adiabatique
- une fin de remplissage à pression constante
- un maintien en pression correspondant à un refroidissement à densité constante
- et enfin d'une phase de refroidissement à masse constante

Pour être parfaitement rigoureux, il faut tenir compte du réchauffement de la matière au seuil puis du refroidissement du front matière pendant la phase d'injection dynamique. Aujourd'hui, tous les logiciels intègrent plus ou moins bien ces phénomènes. Lors de cette phase de maintien, on observe en pratique une homogénéisation du champ de pression dans les zones où subsiste encore du polymère fondu. Plus on s'éloigne du seuil plus il est difficile de compenser les phénomènes de retraits. Lorsque la pression est devenue homogène, on constate qu'il n'y a plus d'écoulement dans le direction du flux, mais il peut subsister des mouvements de matière dans les directions perpendiculaires.

A partir du point 4, le refroidissement du polymère se poursuit; le volume spécifique ainsi que la pression évoluent du point 4 vers le point 7. On pourra observer que cette variation est quasiment isochore. Lors de cette phase, la chute de température a pour conséquence une augmentation de la viscosité. Pour les polymères semi-cristallins, c'est la phase pendant laquelle la cristallisation se réalise.

Enfin, à partir du point 7, basse température et pression appliquée nulle empêchent tout mouvement de matière dans la cavité. Les phénomènes de retraits dus au seul refroidissement se poursuivent alors sur une isobare.

Remarques:

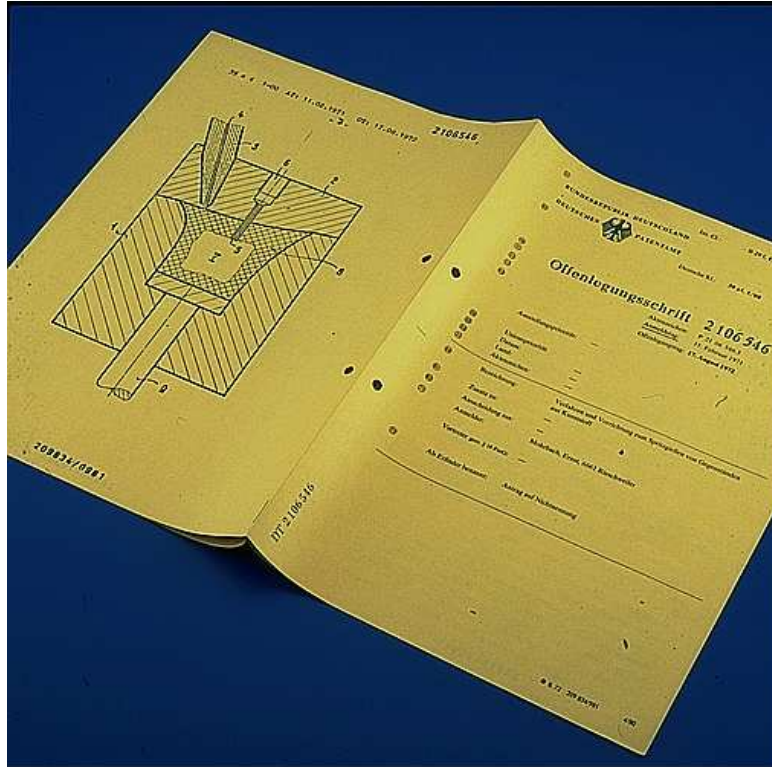
Typiquement, 100 bars compensent un accroissement du volume par élévation de température de l'ordre de 20°C tant que le polymère se trouve à l'état fondu, soit au dessus de la température de transition vitreuse pour les polymères amorphes soit au dessus de la température de solidification pour les polymères semi-cristallins.

Par contre, le changement de volume quasi isotherme des matières semi-cristallines n'est pas compensable par une augmentation de pression au voisinage de la température de fusion où -10°C correspondent à +500 bars.

De très nombreux travaux, de thèses en particulier, [2], [4], [22] ont permis aux logiciels aujourd'hui sur le marché de traiter convenablement cette phase de compactage.

### 1.3 Présentation de l'injection assistée par gaz

Ce procédé a été développé en laboratoire à partir de 1971, date du dépôt de la première demande de brevet. Ce brevet avait pour objet l'injection d'un gaz dans un talon de chaussure de femme.

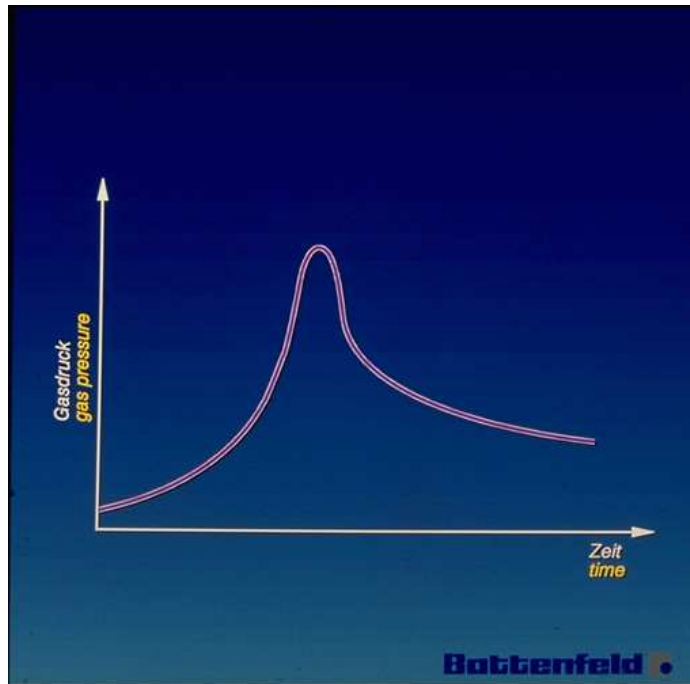


**Figure 8:** Extrait de la demande de brevet de 1971 (document Battenfeld)

Le but premier était d'économiser de la matière et de produire des pièces plus légères. Ce fut le point de départ à une course au brevet et l'on peut trouver plus de 200 brevets traitant aujourd'hui du sujet. Outre les sociétés Cinpres et Battenfeld, on pourra encore citer les sociétés Rohm et Haas, Gain Technologies, Klöckner Ferromatik. A elles seules, ces sociétés représentent plus de 90% des brevets déposés sur le sujet. Dans ce catalogue on trouvera des brevets relatifs au matériel, au procédé lui-même, aux injecteurs, et même aux applications.

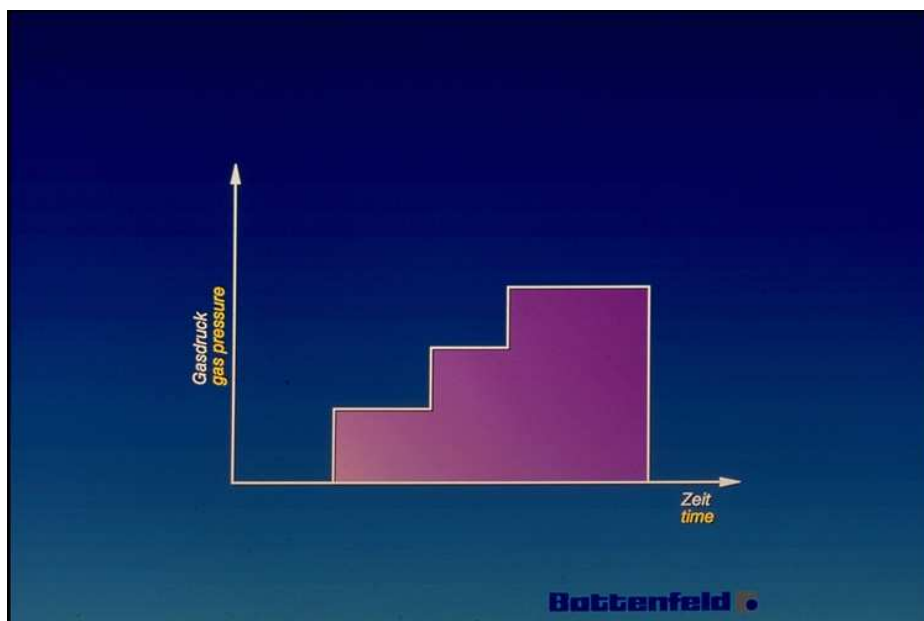
Ce procédé consiste à injecter du gaz dans le polymère dans le but d'obtenir une pièce creuse permettant ainsi de substantielles économies de matière. C'était le but premier de l'injection assistée par gaz.

De nombreuses recherches ont été réalisées à partir de cette base et l'on pourra mentionner la société Cinpres en Grande-Bretagne qui dans un premier temps proposait de contrôler le volume de gaz injecté. Ce principe était relativement simple à mettre en œuvre, il suffisait de piloter le déplacement du piston du vérin d'injection du gaz. Dans ce procédé, la pression d'injection du gaz devenait une conséquence de l'injection du gaz. Plus l'injection du gaz était rapide plus la pression d'injection du gaz était importante. Mais l'inconvénient majeur était la très rapide chute de la pression du gaz une fois dans la pièce.



**Figure 9:** Principe Cinpres (document Battenfeld)

Très rapidement, il était devenu évident que la pression du gaz était un paramètre important pour l'obtention de pièce de haute qualité. La société Battenfeld a développé le système Air mould, système qui permet de piloter la pression d'injection du gaz. Le principe de pilotage de la pression est aujourd'hui devenu un standard quel que soit le constructeur de périphérique.



**Figure 10:** Principe Battenfeld (document Battenfeld)

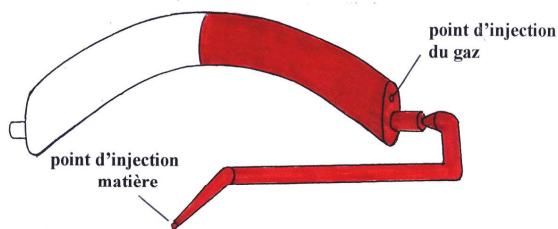
Développer aujourd'hui un produit en injection assistée par gaz demande non seulement des connaissances techniques mais également du contexte juridique qui change assez régulièrement. Cependant, la situation s'est très nettement éclaircie depuis que les sociétés Cinpres et Battenfeld ont conclu un accord de réciprocité permettant aux transformateurs d'utiliser librement le procédé de remplissage partiel en pilotant la pression d'injection du gaz.

Utiliser tout autre procédé ou paramètre de mise en œuvre c'est s'exposer à des risques juridiques importants surtout aux Etats-Unis où les procédures de protection sont beaucoup plus obscures.

Le principe de cette technique est très simple: la cavité est partiellement remplie lors de la phase d'injection dynamique, le gaz sous pression termine le remplissage en repoussant la matière encore fondue au cœur de la veine. (figure 4)

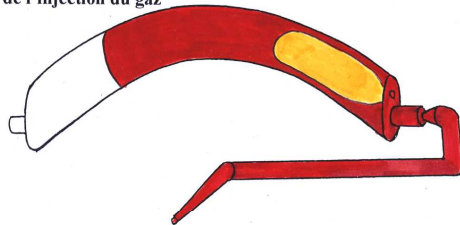
### TECHNIQUE D'INJECTION REPLISSAGE PARTIEL

remplissage partiel de l'empreinte



La phase d'injection dynamique se déroule de façon tout à fait analogue qu'en injection classique. La différence principale réside dans un sous dosage ; c'est-à-dire que l'on provoque une injection incomplète.

arrêt de l'injection matière  
début de l'injection du gaz



Simultanément à l'arrêt de l'injection matière, une injection d'azote sous pression est réalisée. Le gaz se dirige alors dans les zones de plus faible pression et de plus haute température créant ainsi une cavité en repoussant le polymère encore fluide.

fin du remplissage de l'empreinte  
compactage de la matière par le gaz

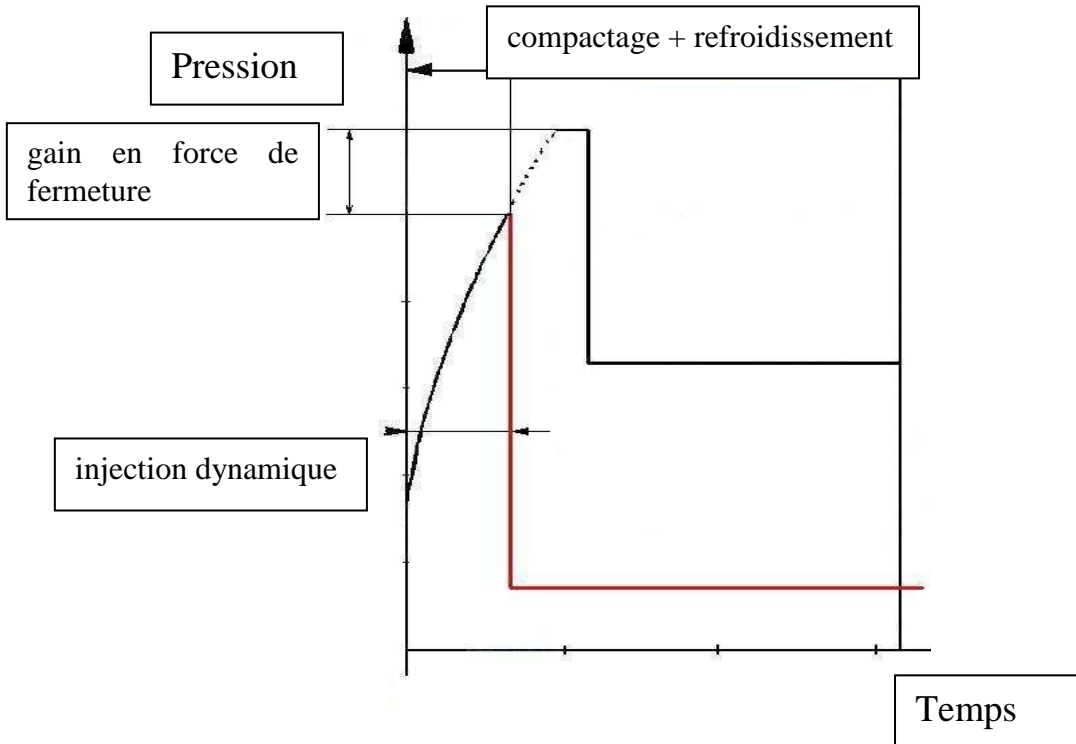


La difficulté majeure de ce procédé est de maîtriser la transition entre la fin de l'injection dynamique et le début de l'injection du gaz. Il est indispensable d'éviter toute chute de pression car cela aurait pour conséquence l'arrêt immédiat du front matière.

Figure 11

## 1.4 Présentation du procédé de remplissage partiel

Afin de bien voir l'intérêt de l'injection assistée par gaz lors de la phase de compactage, nous allons reprendre comme base la figure 1. Nous y avons ajouté un palier de compactage assuré par une pression de gaz constante. Nous pouvons déjà signaler qu'en pratique cette pression de gaz est maintenue jusqu'à la fin de la phase de refroidissement ; la pression de gaz n'étant relâchée que quelques secondes avant l'ouverture du moule.



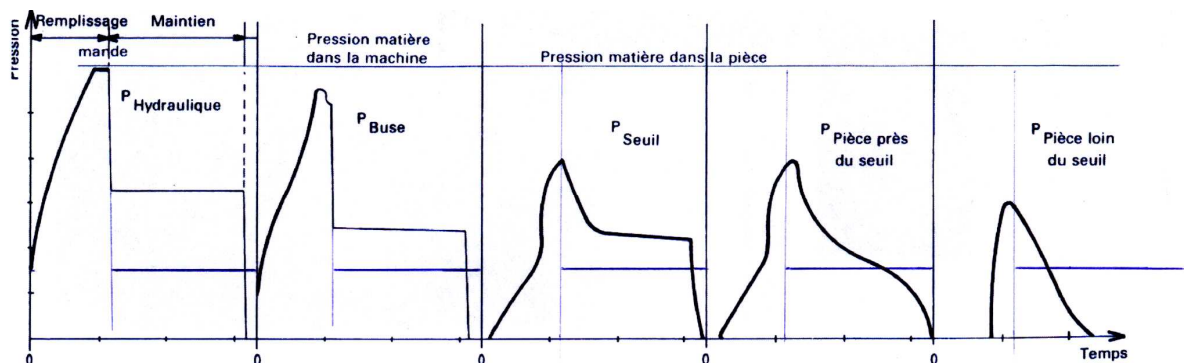
**Figure 12:** Evolution de la pression d'injection  
- en noir, en injection classique  
- en rouge, en injection assistée par gaz

La réduction de volume d'injection matière s'accompagne d'une très forte réduction de la pression d'injection et par conséquent de la force de fermeture. C'est sans doute l'avantage le plus significatif du procédé car il dimensionne les moyens de production et donc les coûts.

Pour avoir un ordre de grandeur, l'injection des cinq derniers pourcents a pour conséquence une augmentation de la force de fermeture de l'ordre de 30%. L'injection assistée par gaz en remplissage partiel, permet sans la moindre difficulté d'en faire l'économie.

Par ailleurs, on observe en règle générale, que la pression d'injection du gaz en phase de compactage est très faible comparativement à la pression de compactage qu'il est indispensable d'appliquer en injection classique. La différence vient du fait que la pression du gaz n'est appliquée que sur le polymère à l'état fluide se trouvant dans la veine gaz générée alors qu'en injection classique la pression est appliquée depuis le seuil.

De plus, cette injection de gaz est maintenue pendant toute la durée de la phase de refroidissement permettant ainsi la compensation de tous les phénomènes de retrait. Tant qu'il subsiste du polymère à l'état fondu, la veine gaz pourra avancer et ainsi propager le champ de pression jusqu'à l'extrémité de la pièce.



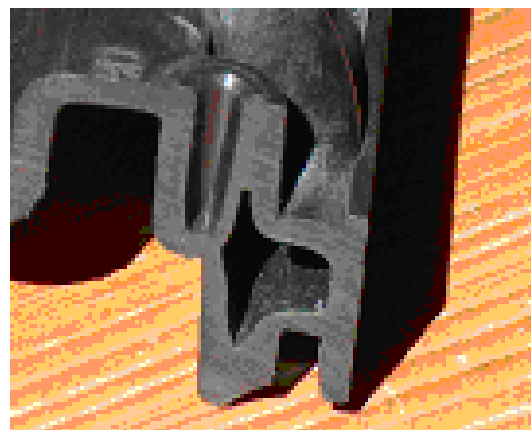
**Figure 13:** Courbes d'injection avec palier gaz

Ces courbes montrent la difficulté de compenser les phénomènes de retrait en extrémité de pièce d'où les risques de retassures. C'est là, la principale difficulté du procédé d'injection, une pression trop importante provoquant des déformations, et une pression trop faible des retassures.

Par opposition, lorsque la pression de compactage est relâchée trop tôt, le polymère fondu se trouvant en fin d'écoulement ne sera pas compacté et l'on observera alors des phénomènes de retassures.

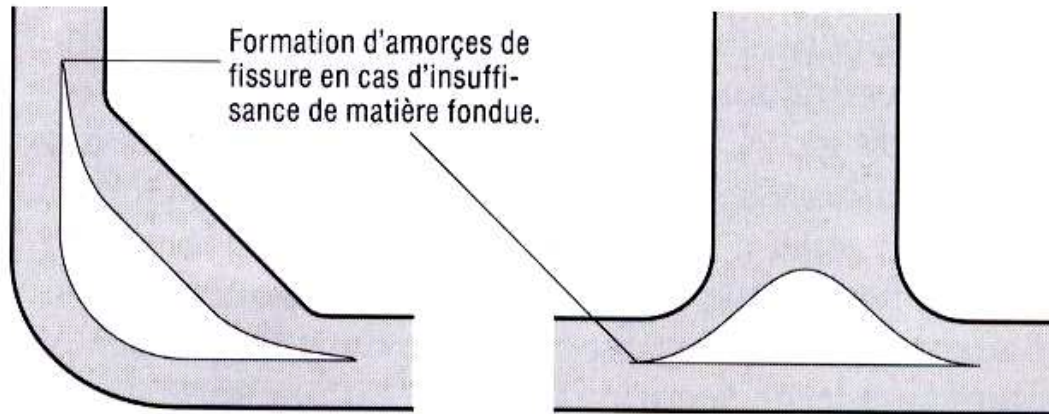
C'est là le principal intérêt de l'injection assistée par gaz, homogénéiser le champ de pression dans la pièce et ainsi supprimer le gradient de pression entre le point d'injection du gaz et le dernier point rempli. Ce résultat est obtenu au fur et à mesure de l'avancée de la veine gaz dans le canal. Lorsque le rapport entre la section du canal et l'épaisseur générale de la pièce est trop faible, le gaz aura tendance à se répandre hors du canal provoquant un débordement hors de la veine.

**Figure 14 :** Débordement du gaz hors de la section.



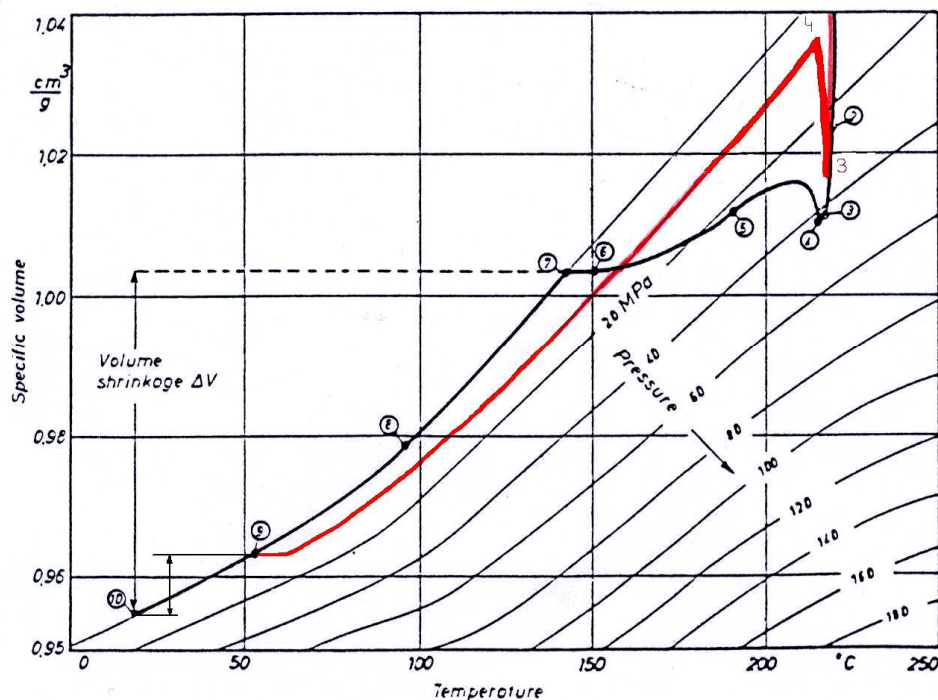
Ce phénomène appelé inflorescence est évitable en augmentant ce rapport et en adaptant le niveau de pression d'injection du gaz. Lorsque le gaz est injecté, celui-ci se concentre au centre de la veine repoussant le polymère fondu à l'avant. Dès la fin du remplissage, la pression de gaz étant maintenue, celui-ci se dirigera dans toutes les zones les plus chaudes et à faible pression. Si dans les zones de faible épaisseur il subsiste du polymère fondu, le gaz s'y dirigera de façon aléatoire. Augmenter le diamètre du canal est la solution la plus simple à mettre en œuvre.

Il faut toutefois remarquer qu'il n'existe pas de règle générale, tout au plus des ordres de grandeur par famille de polymères. Il semblerait que pour les polymères amorphes un rapport de 3 est acceptable alors que pour les polymères cristallins il est préférable d'opter pour un rapport de 5. De plus, il faut prendre en compte la géométrie de la pièce.



**Figure 15 :** Pénétrations de gaz dans les zones de faible épaisseur

Il faut noter que ce phénomène n'apparaît que lorsque le rapport entre la section de la surépaisseur et l'épaisseur générale de la pièce est inadapté et/ou que la pression d'injection du gaz est trop importante. Ce phénomène appelé inflorescences est particulièrement bien mis en évidence sur cette table de jardin ci-dessous.



**Figure 16:** Comparaison entre injection classique et injection assistée par gaz

injection classique                      courbe noire  
 injection assistée par gaz              courbe rouge

Le remplissage partiel de la cavité induit une réduction de la pression d'injection par diminution de la longueur d'écoulement. Au point 3' le gaz est injecté ici à une pression de 10 MPa.

En injection classique, les phénomènes de retraits commencent dès le relâchement de la pression de maintien (point 7) jusqu'au démoulage (point 9). En injection assistée par gaz, la pression du gaz n'est relâchée que quelques secondes avant l'ouverture du moule. Le retrait de la matière est donc ainsi retardé de façon considérable. Seules les zones encore chaudes risqueront de présenter des phénomènes de retassures.

Tant que la pression d'injection du gaz est maintenue, le volume de la bulle de gaz pourra augmenter tant qu'il subsiste du polymère fondu. Par opposition, le volume occupé par la matière diminue (la densité augmente), phénomène dû à la compressibilité du polymère.

On sait que ce gradient de pression induit des contraintes qui auront pour conséquences des déformations. Pour éviter d'engendrer des contraintes dans la matière, de nombreux procédés ont été testés en pratique:

- injection compression
- injection avec agents gonflants
- injection assistée par fluides
- injection MuCell

Dans l'étude que nous présentons ici, nous nous attacherons à expliquer qu'en injection assistée par gaz et pour certaines pièces il est possible d'annuler le gradient de pression en fin d'injection dynamique et pendant toute la phase d'injection statique. Pour obtenir ce résultat, nous avons provoqué l'interconnexion des différentes veines gaz de façon à avoir dans la totalité de la pièce la pression d'injection du gaz. Toutes les pièces présentant une forme de boucle fermée devraient pouvoir permettre l'observation de cette inter-connexion.

Dans les pièces que nous avons eu l'opportunité d'étudier, nous avons toujours veillé à homogénéiser le champ de pression dès la commutation en gaz effectuée. C'est à dire, que nous avons fait évoluer la géométrie de la pièce, quand cela était possible, de façon à obtenir une connexion entre les différentes veines gaz.

C'est le hasard qui nous a permis de constater que l'interconnexion entre différentes bulles avait pour conséquence une suppression totale des déformations. La première pièce sur laquelle ce phénomène a été observé est la tablette arrière de l'AUDI TT. Nous avons ensuite pu valider les observations faites sur plusieurs autres pièces de géométrie et de taille complètement différentes. Nous allons détailler les études effectuées sur les pièces suivantes et mettre en exergue les avantages que cela a permis d'obtenir:

- tablette arrière
- insert de pare-soleil
- cadre de toit ouvrant
- chaise
- capot de mixer



Les études effectuées tant sur des matières amorphes que cristallines, chargées ou non, ont montré l'intérêt de cette interconnexion entre les différentes veines gaz. Le comparatif par rapport à une pièce sans gaz n'a pu être fait que sur le cadre de toit ouvrant. D'une part, nous avons travaillé en injection classique sur le cadre X84 et en injection assistée par gaz sur le cadre J84 d'autre part.

Dans toutes ces études, nous montrerons de façon systématique les résultats en pression, température et retraits calculés, en reprenant les courbes de pression d'injection en différents points.

Cette étude a permis d'ouvrir un champ d'investigation extrêmement large en soulevant de nombreuses questions:

- ce résultat est-il reproductible ?
- peut-on le valider sur des géométries plus complexes?
- quel en est l'intérêt majeur ?

Lors d'études suivantes et lorsque cela était envisageable, nous avons essayé de reproduire sur d'autres géométries l'interconnexion entre les différentes bulles. A chaque fois que nous avons obtenu cette particularité, la géométrie des pièces était de bien meilleure qualité. En fait, la bulle de gaz formant ainsi une boucle, permet de bloquer la géométrie dans une configuration choisie en fonction de la pression d'injection du gaz.

### 1.4.1 Avantages

Le procédé de remplissage partiel est le procédé le plus économique car il permet :

- une réduction du poids de la pièce jusqu'à 45%
- une réduction de la force de fermeture jusqu'à 30%
- d'injecter le gaz à faible pression (20 bar – 60 bar)
- une réduction du temps de cycle dans certains cas
- la possibilité de réaliser des moules multi-empreintes (jusqu'à 16 empreintes)
- d'avoir un outillage très simple à réaliser
- de ne pas avoir de licence à payer

La réduction du poids pièce est toujours le facteur décisif car le transformateur paye directement la matière. Sur un manche de pinceau, la masse a été réduite de 6 g, mais comme la société fabriquait 200000 pinceaux par mois, l'économie matière représentait à elle seule 1,2 tonne à 1 €/kg soit 1200 € d'économie matière.

Le gain en force de fermeture n'est pas anodin et très facile à obtenir. Nous avons travaillé sur une pièce dont le moule était monté sur une presse de 200 t, force de fermeture nécessaire à la production en injection classique. En injectant du gaz au moment de la commutation, nous avons supprimé le maintien classique et l'avons remplacé par une injection de gaz, nous avons pu verrouiller le moule à 90 tonnes. Très concrètement, sur la même presse, le transformateur pouvait produire deux pièces au lieu d'une dans le même temps de cycle. Avec l'économie matière, le gain devient considérable.

Sauf cas exceptionnel, le remplissage partiel autorise l'injection de l'azote à faible pression. La pression d'injection du gaz a une incidence directe sur le coût du gaz, injecter le gaz à 200 bars coûte dix fois plus cher que de l'injecter à 20 bars. Il y a donc tout intérêt à soigneusement étudier le moule de façon à réduire la pression d'injection du gaz. C'est un des résultats que l'on peut obtenir avec une étude rhéologique bien menée.

Réduire le temps de cycle est évidemment l'objectif de tout transformateur. Mais en injection assistée par gaz, il convient d'être prudent. En effet, le gaz n'ayant aucune capacité calorifique, sera dans l'incapacité d'évacuer des calories. Des essais sont cependant en cours en Allemagne et en particulier dans la société Hüf pour étudier l'intérêt d'évacuer le gaz le plus vite possible et ainsi provoquer une dépression rapide dans la pièce, dépression qui s'accompagnerait d'une baisse considérable de la température. Ce sujet est en cours d'étude avec nos partenaires d'Air Liquide.

Équilibrer un moule multi-empreintes n'est pas chose aisée en injection classique, il l'est encore moins en injection assistée par gaz en remplissage partiel. L'équilibrage est le point critique, il est indispensable de limiter à moins de 1% l'écart en masse entre les différentes cavités. Tout écart supérieur provoquera une modification de l'écoulement du gaz qui choisira le chemin préférentiel, celui où la résistance à l'avancement est la plus faible. Bien entendu, il faut prendre en compte le cahier des charges de la pièce au niveau de l'aspect. Une poignée de porte automobile demandera des exigences plus sévères qu'un pinceau qui peut être considéré comme une pièce « consommable ». Pour les poignées automobiles, la limite semble être des moules 4 empreintes alors que pour des pinceaux, il a été possible de monter à 16 cavités.

Intégrer l'injection de gaz dans un moule ne demande que très peu de travail supplémentaire, seuls quelques perçages et taraudages sont nécessaires pour intégrer des injecteurs gaz du commerce. Le marché des injecteurs gaz s'est aujourd'hui bien clarifié, alors qu'à une époque chaque transformateur pensait détenir l'injecteur gaz révolutionnaire qu'il avait bricolé dans son atelier. Aujourd'hui, ne subsistent qu'une petite dizaine de fournisseurs qui sont capable de garantir des sections de passage et une durée de vie minimum dans des conditions normales d'utilisation.

Mais l'avantage principal du remplissage partiel est qu'il est presque libre de tout brevet. Il est nécessaire de nuancer car aujourd'hui, il est lié à l'accord entre Cinpres et Battenfeld. Tout transformateur qui produit une pièce en remplissage partiel en pilotant la pression paye directement ou indirectement des royalties à l'une des deux sociétés.

La somme de ces avantages en fait le procédé d'injection assistée par gaz le plus économique en production. Une étude réalisée par Thomson à Angers avait montré, chiffres à l'appui, une réduction de coûts de production de l'ordre de 35%.

#### 1.4.2 Inconvénients

Cependant, toute médaille a son revers, et comme tous procédés, le remplissage partiel a également ses inconvénients:

- forte sensibilité de la qualité aux conditions de mise en oeuvre
- trace de l'injecteur gaz, orifice de diamètre 3 mm minimum
- nécessité d'optimiser toutes les phases du procédé, pièce, moule, presse, matière

La critique la plus répandue est la difficulté d'obtenir des pièces d'aspect de surface compatible avec un cahier des charges automobile. Cela est particulièrement vrai pour les matières cristallines et en particulier les polyamides chargés fibres de verre. Il n'était pas rare de voir à la surface de la pièce une zone transitoire qui présentait soit une ligne d'arrêt soit une brillance ; cette zone correspond en général à l'instant de la commutation entre la fin de l'injection dynamique et le début de l'injection du gaz. Ce problème peut être considéré comme réglé par les avancées des fournisseurs matières qui ont modifié leurs résines en diminuant la température de cristallisation.

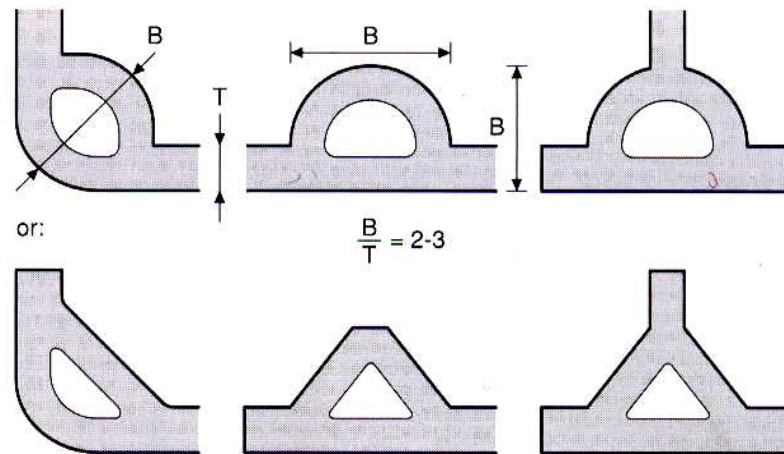
Un autre inconvénient, et non des moindres, est la trace laissée par l'injecteur gaz qui noyé dans la matière provoque une séparation de flux qui se rejoignent ensuite en laissant une ligne de recollement. La simulation 3D permet de parfaitement visualiser les écoulements de la matière autour de l'injecteur et donc de prédire avec une remarquable fiabilité la position de ces lignes en surface.

### 1.4.3 Préconisations

Pour développer une pièce en injection assistée par gaz, il est important que tous les points critiques soient abordés, dans la conception de la pièce, du moule, dans le choix de la matière et des différents périphériques qu'il faudra mettre en œuvre. Si toutes les précautions sont prises, étude de simulation 2D1/2 ou 3D, choix d'un mouliste expérimenté, choix d'un fournisseur matière connaissant le procédé, il n'y a aucune raison pour qu'une pièce ne puisse pas être produite dans les mêmes conditions qu'une pièce en injection classique. Il n'y a rien d'anormal ni de surprenant à produire avec un taux de rebut inférieur à 1%.

Concernant la conception de la pièce, il est difficile d'édicter des règles générales dans la mesure où chaque pièce a ses spécificités. Cependant, certains points peuvent être considérés comme communs à toutes pièces à réaliser en injection assistée par gaz :

- éviter les variations brutales d'épaisseurs
- sur une pièce plane, faire passer les canaux gaz au pied des nervures
- respecter un rapport de 4-5 entre épaisseur et diamètre du canal.



**Figure 17:** Rapport section/épaisseur

Le rapport indiqué ci dessus pourra varier en fonction du polymère, pour les polymères tels que les styréniques, la valeur de 3 est optimale, on choisira une valeur de 4 à 5 pour les polyoléfinés.

Concernant le choix du point d'injection matière, il doit se trouver dans une zone de faible épaisseur, le plus éloigné possible de la surépaisseur formant le canal gaz. La matière optant toujours pour la voie la plus simple, avancera à grande vitesse dans la surépaisseur et ralentira voire s'arrêtera dans les zones de faible épaisseur. Si la pression d'injection de la matière est de 800 bar ; il est illusoire d'imaginer que le gaz injecté même à 300 bar pourra repousser un polymère fondu mais très visqueux dans un entrefer de 2 mm. La difficulté est de trouver la position idéale du (ou des) point(s) d'injection matière. Là encore, les outils de simulation permettront d'obtenir le bon résultat dans 90% des cas.

La position du ou des points d'injection gaz n'est que la conséquence du remplissage matière. L'injecteur gaz doit se trouver dans le canal gaz, à l'endroit même où la matière entre dans ce canal. Mais il faudra d'abord s'assurer que toutes les zones de faible épaisseur sont parfaitement remplies. Aller à l'encontre de cette règle, c'est s'exposer à de multiples défauts comme les inflorescences que l'on peut parfois observer. Ce phénomène peut également être causé par un rapport inadapté entre l'épaisseur générale de la pièce et la section du canal gaz, mais aussi par une pression d'injection du gaz trop haute. La première raison reste le choix de la position de l'injecteur gaz.

## 1.5 Présentation des autres procédés d'injection assistée par gaz

### 1.5.1 Technique de remplissage avec utilisation de masselotte(s)

Ce procédé, sans aucun doute le plus simple théoriquement à être mis en œuvre, peut être décomposé suivant les séquences ci-dessous:

- remplissage complet de la cavité de la pièce
- compactage plus ou moins long de la matière
- injection du gaz par un injecteur situé à l'extrémité de la veine gaz
- ouverture d'un ou plusieurs obturateur(s) libérant le passage vers une masselotte

#### TECHNIQUE D'INJECTION REPLISSAGE AVEC MASSELOTTE

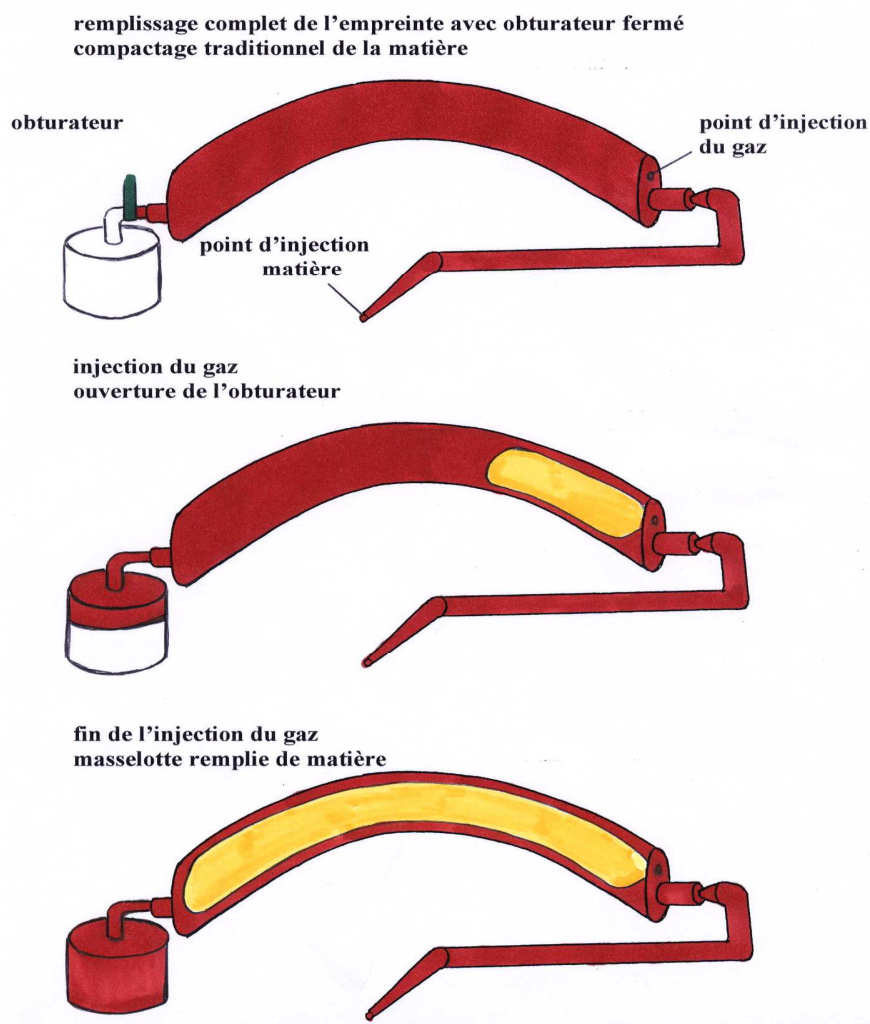


Figure 18

Avec ce procédé, le volume de la bulle est défini par le volume de la masselotte. Très souvent, on préfère amener le gaz jusque dans la masselotte pour être sûr de correctement évider la pièce.

## Avantages

- réduction du poids pièce jusqu'à 45%
- possibilité de réaliser des moules multi-empreintes (4 empreintes)
- possibilité d'innovations au niveau du design
- réduction du temps de cycle

## Inconvénients

- force de fermeture inchangée par rapport à l'injection classique
- pression d'injection de gaz souvent supérieure à 75 bar
- intégration du mécanisme de commande de masselotte dans l'outillage
- phénomène de brillance au niveau de la veine pour les polyoléfinés
- trace de l'injecteur gaz, orifice de diamètre 3 mm minimum
- nécessité de rebroyer les masselottes

## Mise en oeuvre

La mise en œuvre de ce procédé est réputée très simple. Cependant, non seulement il faut optimiser à 100% la phase d'injection du polymère, mais en plus il est indispensable d'optimiser toute la partie évacuation vers la masselotte. Le seuil de sortie et le canal d'évacuation doivent avoir une section suffisante pour éviter une solidification prématurée du polymère. De plus, il faut prévoir un obturateur de ce canal, obturateur ne s'ouvrant qu'à la fin de la phase de compactage et ne se refermant qu'à partir du moment où la masselotte est pleine. Aujourd'hui, on se rend compte que la forme et la section des masselottes ont également une importance dans le résultat. Dans la mesure du possible, il faut éviter les masselottes massives. Il y a deux raisons à cela:

- une section trop importante laisse au gaz un passage suffisamment important pour qu'il s'y engouffre et renvoie du polymère dans la pièce.
- une section trop importante forme un véritable radiateur dans le moule, le temps de cycle est alors conditionné non pas par la pièce, mais par la masselotte

Lorsque le gaz est injecté dans le polymère fondu, celui-ci accélère alors très brutalement. En concevant des masselottes longues et de faible section, on oppose à l'avancée du gaz une perte de charge qui ralentira la progression du polymère fondu dans cette cavité. Dans tous les cas, il faut éviter le phénomène de jet libre dans la masselotte de façon à canaliser et contrôler le gaz jusqu'à son avancée maximale. Par ailleurs, diminuer la section des masselottes et augmenter leur longueur permet de créer une perte de charge ralentissant l'écoulement de la matière et donc de la bulle de gaz.

Optimiser les masselottes, est-ce vraiment le but de l'injection assistée par gaz?

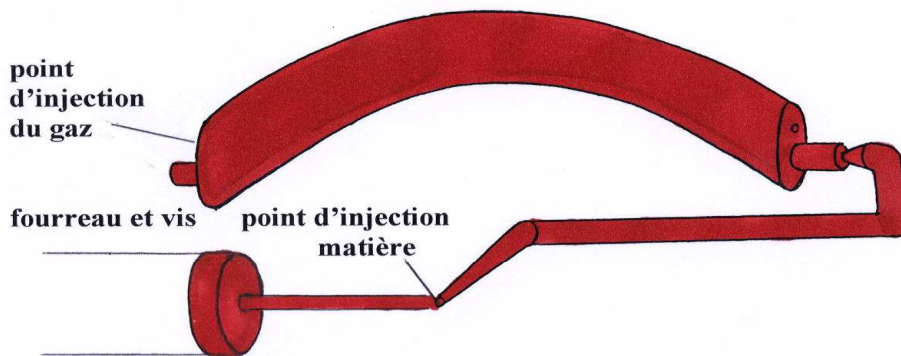
## 1.5.2 Technique de refoulement dans le fourreau

Ce procédé se rapproche assez du précédent, mais au lieu de repousser la matière dans un volume de trop plein, la matière est repoussée dans le fourreau. Le cycle peut être alors décomposé de la façon suivante:

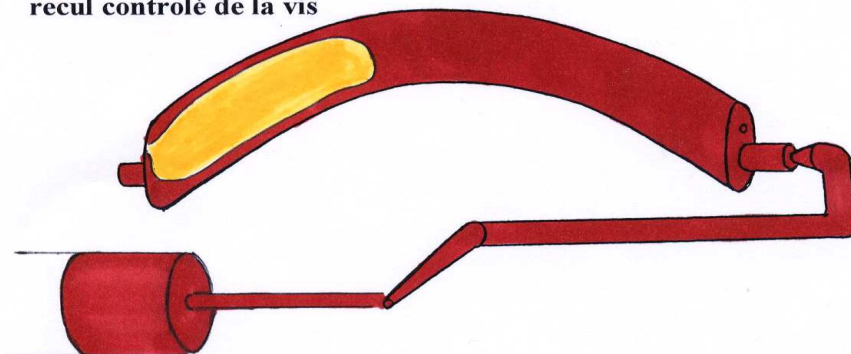
- remplissage complet de la cavité de la pièce
- compactage plus ou moins long de la matière
- injection du gaz dans une zone remplie dans les derniers instants de remplissage
- la matière est alors repoussée à travers le seuil vers le fourreau

### TECHNIQUE D'INJECTION REFOULEMENT DANS LE FOURREAU

remplissage complet de l'empreinte  
compactage traditionnel de la matière



injection du gaz  
recul contrôlé de la vis



blocage de la vis

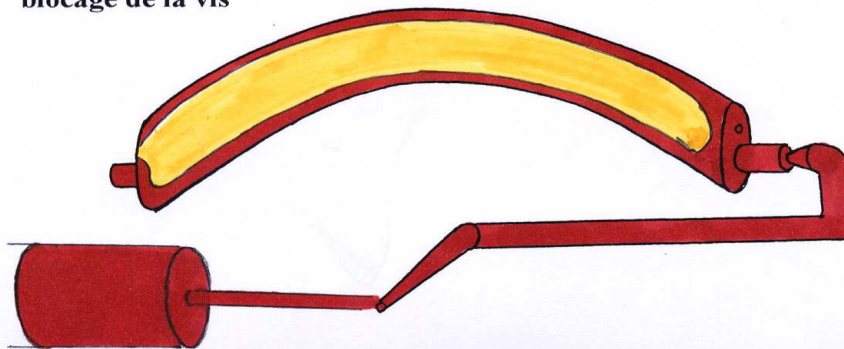


Figure 19



## Avantages

- réduction du poids pièce
- possibilité de réaliser des moules multi-empreintes (4 empreintes)
- possibilité d'innovations au niveau du design

## Inconvénients

- force de fermeture inchangée par rapport à l'injection classique
- pression d'injection de gaz supérieure à 100 bar
- phénomène de brillance au niveau de la veine pour les polyoléfinés
- trace de l'injecteur gaz, orifice de diamètre 3 mm minimum

## Mise en oeuvre

La principale difficulté de mise en œuvre de ce procédé est d'éviter que le gaz ne remonte dans le fourreau en tête de vis. Lorsque ce phénomène se produit, l'injection suivante aura pour conséquence une pièce de mauvaise qualité avec l'injection de matière de type mousse. Il faudra en outre prendre la précaution de surdimensionner le seuil pour que le polymère puisse faire le chemin de retour vers le fourreau. C'est pour cette raison que la pression d'injection de gaz est beaucoup plus élevée que pour le remplissage partiel.

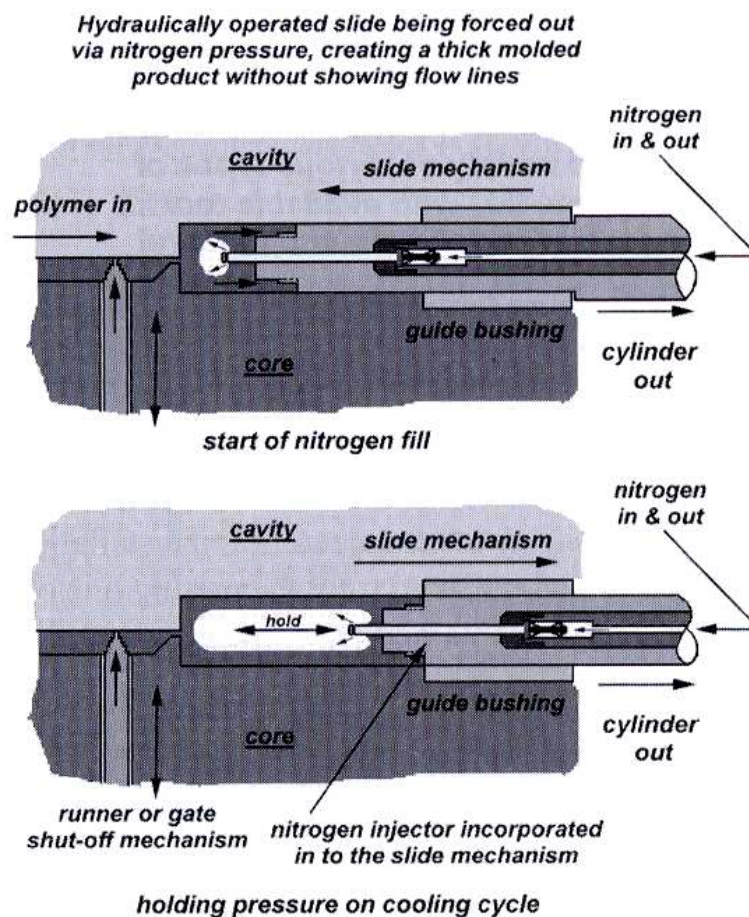
La précaution à prendre est d'équiper la vis avec un boisseau commandé depuis l'interface utilisateur de la presse à injecter. On laissera le boisseau ouvert lors de la phase de refoulement du polymère fondu et on le refermera lorsque l'on aura atteint le volume souhaité. De cette façon, le gaz sera alors emprisonné dans la pièce et assurera une phase de compactage complémentaire.

Comme pour le procédé faisant appel aux masselottes, le risque d'observer des phénomènes de brillance en surface pour les matières type polyoléfinés est important.

### 1.5.3 Technique de noyau amovible

Parmi tous les procédés déjà mentionnés, la technique de noyau amovible est sans nul doute la moins utilisée. Le principe consiste à guider la bulle de gaz à l'aide d'un noyau mobile (figure 21). La section de la veine gaz est donnée par le déplacement du noyau mobile. L'injecteur gaz est positionné dans le noyau mobile et lors de l'injection dynamique est noyé dans le polymère fondu. Au déclenchement de l'injection du gaz, le noyau mobile est repoussé en arrière par la formation de la bulle de gaz. Une butée permet ensuite d'arrêter la course du noyau, le gaz injecté à partir de cet instant ne servant qu'à compacter la matière.

L'application typique de cette technique est la caisse plastique de bouteilles. Toutes les parties de préhension de cette caisse plastique étant évidées à l'aide de noyaux. Bien évidemment, le coût d'un tel moule est bien supérieur à un moule dans lequel on met en œuvre le remplissage partiel.



**Figure 20:** Principe de l'injection en noyau mobile [14]

#### Mise en œuvre

Ce procédé est mis en œuvre dans des cas tout à fait particuliers lorsque aucun des autres procédés déjà cités ne fonctionne. On peut mentionner que ce procédé ne laisse pas apparaître de traces du point d'injection du gaz.

#### 1.5.4 L'injection de gaz « full shot »

Il arrive que pour certaines pièces, le volume de gaz injecté corresponde au volume de matière que l'on injecte lors de la phase de compactage. Le gaz injecté de cette façon ne fera donc que compenser le retrait de la matière. L'intérêt de ce procédé se limite à la suppression des déformations par homogénéisation du champ de pression en phase de compactage. On verra plus loin que compacter la matière sans gradient de pression en tous points de la pièce est une solution aux problèmes de retassures et déformations.

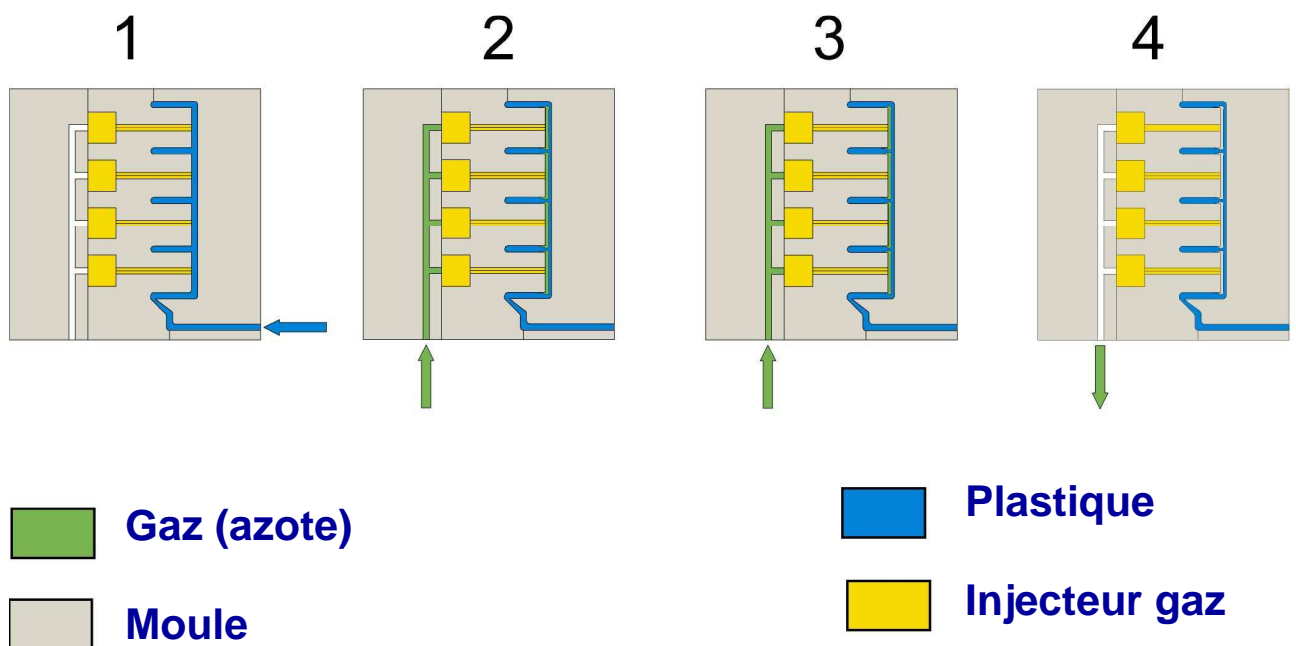
Dans ce procédé, l'injection dynamique est réalisée de façon tout à fait traditionnelle. Le seul changement en pratique, est la suppression des paliers de maintien ; cela a pour conséquence un gain en temps de cycle étant donné que la presse pourra doser la matière plus tôt.

L'azote sous pression se dirigera automatiquement vers les zones non encore remplies de polymère. Chemin faisant, le gaz repoussera de la matière fondue qui se trouvera encore à cœur. Bien évidemment, le gaz choisira les zones les plus chaudes où la matière plastique est encore la plus fluide. Et ce n'est que dans les zones de forte épaisseur que l'on trouvera les zones les plus chaudes.

Cependant, il est indispensable de soigneusement étudier le système d'injection de façon à pouvoir guider le gaz jusqu'aux extrémités de la pièce.

### 1.5.5 L'injection externe de gaz

Cette technique est réservée aux pièces d'aspect présentant des variations d'épaisseurs et où l'encombrement des injecteurs interdit de les positionner dans la pièce (Figure 22). Le gaz est injecté en général coté poinçon directement entre la paroi du moule et la matière. Le gaz sous pression pourra alors assurer un compactage homogène sur toute la surface de la pièce. Cette technologie pourra aisément être mise en œuvre dans des moules simples sans mouvements. Par contre, pour des moules plus compliqués avec tiroirs ou cales, cela sera déjà beaucoup plus compliqué. En effet, il faut assurer une étanchéité correcte pour que le gaz sous pression assure sa fonction et ne s'échappe pas à travers les plans de joints.



**Figure 21:** Principe de l'injection externe de gaz (document Battenfeld)

Ci dessous un exemple de pièce traitée avec ce procédé.



**Figure 22:** Couvercle (document Battenfeld)

### 1.5.6 L'injection de gaz hyper-refroidi

Ce procédé consiste à injecter dans le polymère de l'azote hyper-refroidi, l'azote est injecté à  $-150^{\circ}\text{C}$ . Le but est de réduire le temps de cycle de production d'une pièce plastique. Tout gaz a des propriétés d'échanges thermiques calamiteuses ; par voie de conséquence, il est impossible de refroidir une pièce plastique avec un gaz. Pourtant, des industriels ont soutenu le programme de recherche du Warwick Manufacturing Group du professeur Gordon Smith pour étudier l'intérêt qu'il pourrait y avoir à injecter un gaz à très basse température.

Avec les propriétés d'échanges thermiques des gaz, le gaz injecté passe très rapidement de  $-150^{\circ}\text{C}$  à une température proche de la température ambiante. La pièce possédait un injecteur à chacune des extrémités de la veine gaz et une circulation forcée de gaz permettait un échange par convection forcée. Le gaz étant souvent injecté à très haute pression et très haut débit, le volume de gaz ainsi consommé a augmenté de façon exponentielle rendant ce procédé économiquement peu rentable.



**Figure 23:** Bonbonne cryogénique installée sur presse à coté d'une électrovanne (document Battenfeld)

## 2<sup>ème</sup> Partie

### Etude bibliographique de l'injection assistée par gaz

Dans toute notre étude, nous avons mis en œuvre uniquement le procédé de remplissage partiel. C'est pour cette raison que nous avons fait un tri parmi toute la littérature qui a pu paraître. Nous avons exclu de cette bibliographie la collection de brevets ou demandes de brevets qui ont été déposés depuis 30 ans. Dans une récente étude faite par l'ADIT, il existait en 2006 plus de 250 brevets relatifs à l'injection assistée par gaz. Très schématiquement, il est indispensable de différencier les brevets procédés des brevets matériels. En Annexe C, nous avons donné une liste non-exhaustive de quelques brevets.

Le procédé de remplissage partiel a été breveté par la société Cinpres (brevet européen n°0127961) en 1983.

Le but premier de ce procédé était d'économiser de la matière tout en produisant des pièces de forte section.

Les seuls travaux publiés avant 1990 ont été à l'origine du logiciel Gas-Assist d'AC Technology devenu ensuite C-Mold Gas. [28] et du développement du matériel ad hoc [29] et [30].

A partir de 1995, les travaux réalisés avaient pour but de valider les résultats obtenus avec C-Mold en différenciant la phase de remplissage et la phase de compactage aussi appelée pénétration secondaire du gaz. [5], [6], [13], [15], [16] et [34].

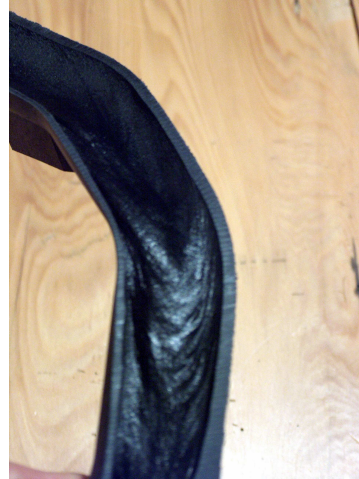
D'autres travaux théoriques focalisés sur le traitement numérique des équations ont également été réalisés pendant cette même période. On pourra citer les travaux de Khayat, Derdouri et Hebert [9].

Lors de la phase de remplissage assurée par le gaz, il subsiste autour de la bulle de gaz une couche de polymère à l'état fondu. De nombreux travaux ont été réalisés pour déterminer cette épaisseur de matière. On pourra citer les travaux de Fairbrother et Strubbs d'une part puis ceux de Taylor [19], Cox [17], Kolb et Cerro [18], Halpern et Gaver [20] et Poslinski [21].

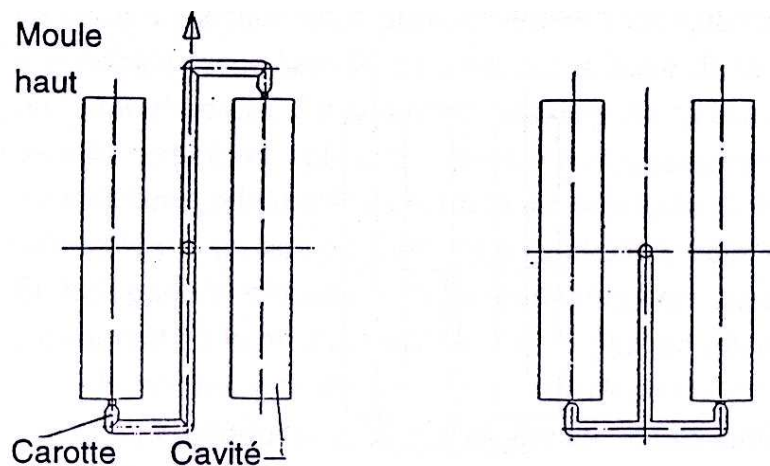
Dans le cas d'une conduite hydraulique de 40 mm de diamètre, l'épaisseur de paroi résiduelle était suffisamment importante pour empêcher le refroidissement de la matière à l'intérieur de la veine gaz. Le polymère fluide qui avait été repoussé par la bulle de gaz peut, en fonction de la position de la pièce dans le moule, s'écouler le long de la paroi interne de la tubulure (figure 24).

**Figure 24:**

Coulure dans une conduite hydraulique de diamètre 40 mm.



Ce phénomène n'est pas encore parfaitement pris en compte dans les logiciels actuellement sur le marché et c'est la raison pour laquelle il est extrêmement hasardeux de garantir un poids pièce. Dans de telles situations, il est clair que le couplage entre traitement mécanique, thermique et thermodynamique doit parfaitement être pris en compte. Les récents travaux des équipes des universités chinoises de Zhengzhou [31] et [32] et de Changchun [33] ont porté essentiellement sur les problèmes récurrents de calcul de la gaine solide et de l'orientation des fibres avec ce procédé. Ce phénomène complique encore le procédé et ne sera pas abordé dans notre travail.



**Figure 25:** Position de la pièce dans le moule (document GE Plastics)

En Europe, l'Université de Swansea au Pays de Galles a également travaillé sur le problème des échanges thermiques lors de la phase d'injection du gaz [35-38]. Aujourd'hui c'est sans aucun doute le point le plus critique pour pouvoir donner avec précision les épaisseurs de parois.

Y.K. Shen [26] et H. Zhou et D. Li [27] ont récemment travaillé sur les échanges thermiques intervenant lors de la phase de création de bulle de gaz et de son développement le long du canal.

En étudiant les géométries sur lesquelles ont travaillé toutes ces équipes, on ne pouvait qu'obtenir les défauts observés à savoir les inflorescences. Aujourd'hui, on sait que d'une pièce à l'autre, il est impossible de reproduire avec exactitude ce phénomène. La viscosité du gaz étant tellement faible qu'il est impossible de contrôler son flux à moins de le canaliser

soigneusement. La cause principale de ce défaut est dans la majorité des cas l'inadéquation entre la section de la veine et la pression d'injection du gaz. Ce problème peut être aisément résolu en modifiant la géométrie de la pièce.

Par rapport à notre travail, nous ne mentionnerons qu'un défaut observable lors de la phase de compactage, à savoir les pénétrations de gaz hors des canaux prévus pour le guider.

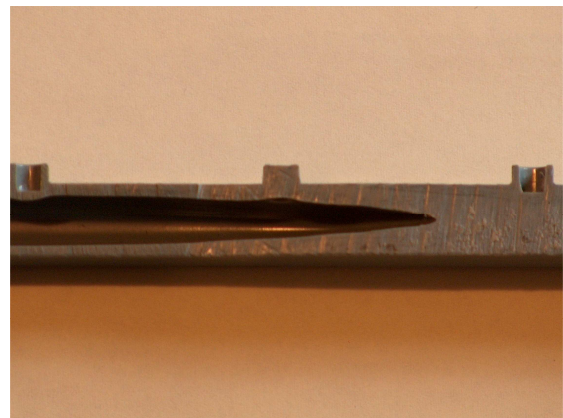


**Figure 26:** Pénétrations de gaz sur une table de jardin.  
(document Battenfeld)

Pendant la phase de compactage ou de pénétration secondaire de gaz, la matière se solidifie alors que le volume de la bulle générée continue à augmenter par compensation des phénomènes de retraits.



**Figure 27:**  
Phase de remplissage  
Forme arrondie du front de gaz



**Figure 28:**  
Phase de compactage  
Forme biseautée lors de la compensation  
des retraits

Pour introduire notre travail, et à partir de quelques figures de base, nous allons rappeler les critères qui peuvent conduire au choix du procédé de remplissage partiel tant au niveau économique que technique.

Au niveau économique:

- réduction de la force de fermeture permettant de réduire les coûts de production.
- réduction de la quantité de polymère injecté
- réduction de l'énergie nécessaire au refroidissement

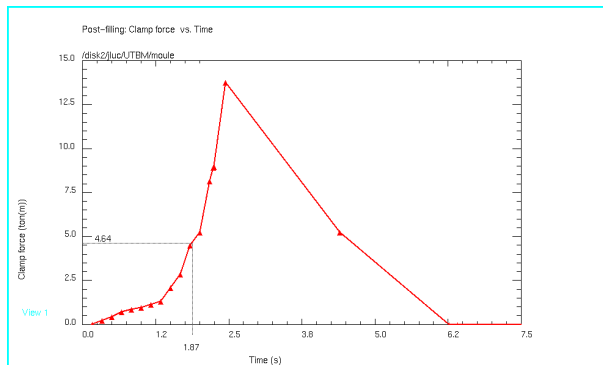


Au niveau technique :

Nous n'allons pas développer ici tous ces avantages mais nous ne traiterons que ceux liés directement à la phase de compactage à savoir:

- le gain en force de fermeture
- la suppression des retassures
- la diminution des déformations

Le gain en force de fermeture est directement lié à la quantité de matière injectée dans la cavité. En injection classique, la force de fermeture est donnée par la pression d'injection dont le maximum se situe au moment de la fin du remplissage de la cavité. Du rapport pression/force de fermeture dépend la taille de la presse à injecter à utiliser.



**Figure 29:**  
Remplissage dynamique en 2.5 secondes pour 100% du volume de la cavité.

A 1.875 secondes, soit un remplissage à 75% de la cavité, la force de fermeture est réduite de plus de 50%.

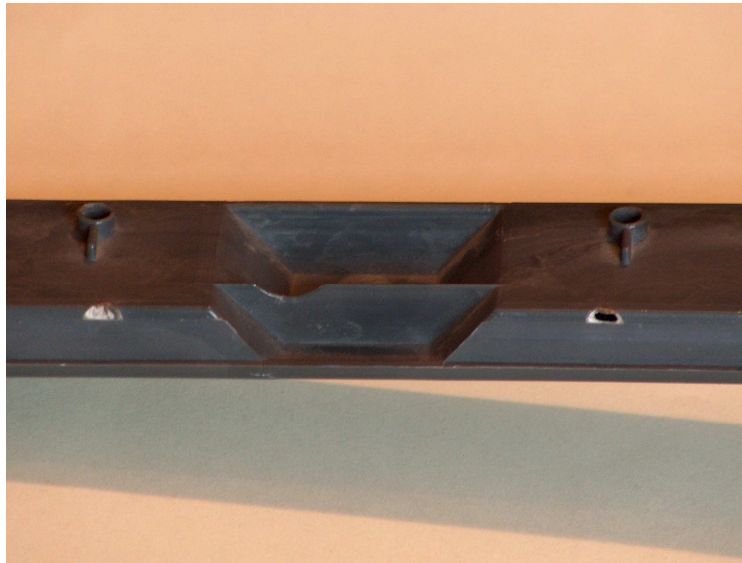
A épaisseur constante, toute diminution du volume injecté entraîne donc une diminution significative de l'effort à fournir par la machine pour maintenir le moule fermé. En injection classique, la pression de compactage doit être suffisamment importante pour pouvoir compenser la perte de charge due à la forte viscosité des polymères fondus et donc assurer son rôle de compensation des phénomènes de retrait. En injection assistée par gaz, ce rôle est dévolu exclusivement au gaz. La perte de charge entre le point d'injection du gaz et l'extrémité de la bulle peut être considérée comme nulle vu la viscosité très faible du gaz.

Il n'existe aucune relation entre la pression d'injection matière et la pression d'injection du gaz. Celle-ci n'est donnée que par la longueur d'écoulement à parcourir et la résistance de la matière à avancer. Ainsi, pour une pièce de 2,60 m et un diamètre de 45 mm, il n'a fallu que 2 MPa pour repousser le polymère fondu.

la qualité du compactage peut être assurée dans la majorité des cas par une pression de gaz de 2 MPa. En dessous de cette valeur, ce sont les systèmes de pilotage qui ne peuvent plus assurer avec précision le pilotage de cette pression.

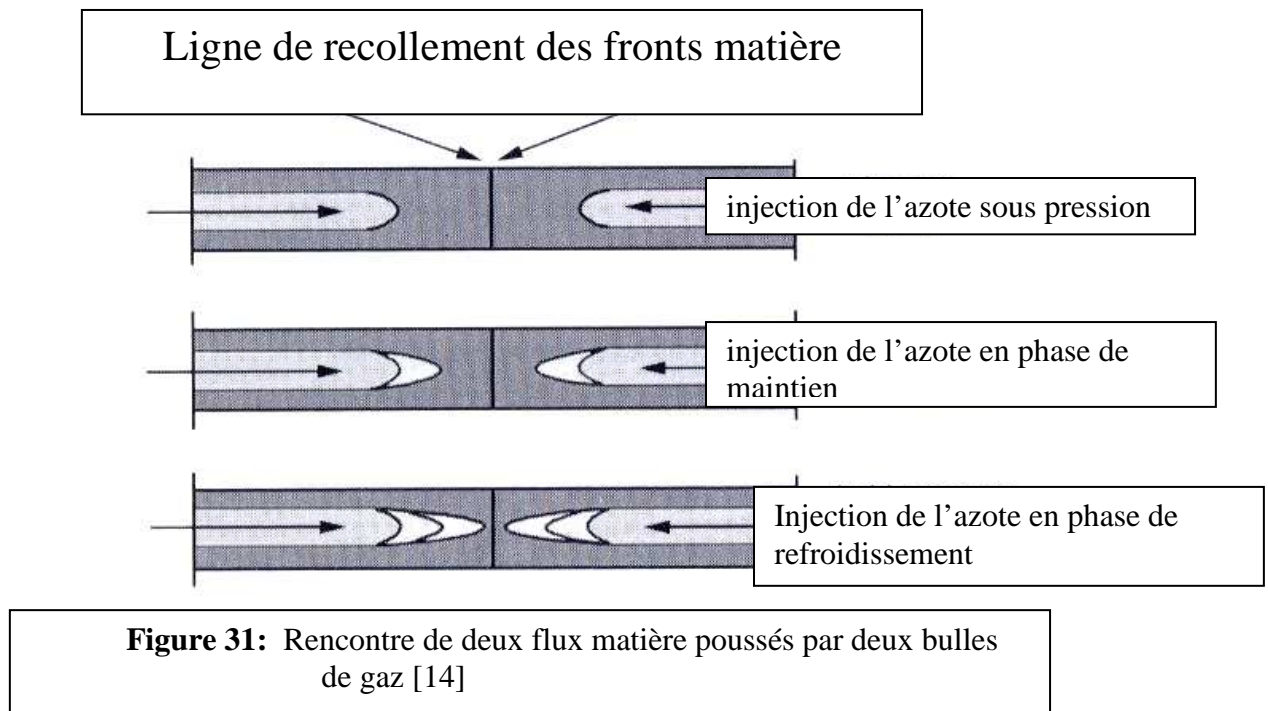
En injection classique, certaines parties de la pièce refroidissent plus vite que d'autres et à des pressions différentes. On obtient alors des densités différentes dans la pièce et par conséquent des contraintes résiduelles hétérogènes. L'avantage de l'injection assistée par gaz est là encore indéniable étant donné que le compactage se réalise à pression constante donnant comme résultat une densité constante dans la pièce.

Chaque pièce présente des particularités géométriques intrinsèques. Lorsqu'une pièce présente des canaux qui sont amenés à se rencontrer, il a toujours été recommandé de les séparer par une restriction d'épaisseur et d'évacuer le trop plein de matière dans des masselottes.



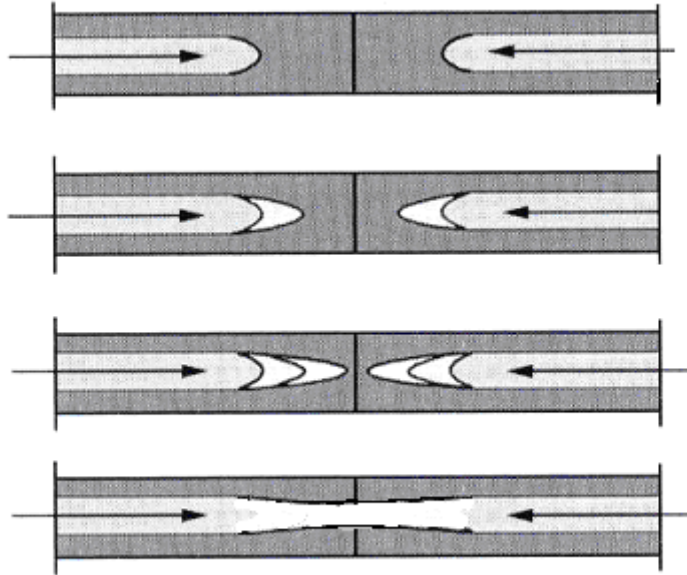
**Figure 30:** Tablette arrière de l'Audi TT avant modifications, deux masselottes dont on ne voit que les orifices.

Le risque mentionné par Avery [14] est de provoquer un amas de matière préjudiciable à la qualité de la pièce.



**Figure 31:** Rencontre de deux flux matière poussés par deux bulles de gaz [14]

On retrouve cette figure dans tous les documents traitant de l'injection assistée par gaz. Pourtant, dans certains cas particuliers, nous avons imaginé une quatrième figure où ne subsiste aucun amas matière entre les deux bulles.



**Figure 32:** Rencontre des bulles

Autant dans les trois premières figures le champ de pression est propre à chaque canal, autant dans la quatrième figure, le champ de pression devient parfaitement homogène, tout point de la pièce pourra alors être compacté à la même pression.

### Conclusions

Ce phénomène de connexion entre les différentes bulles est aisément reproductible à condition que le moule ait été étudié et optimisé pour atteindre le but recherché. Dans quelques cas, il subsiste un voile plus ou moins épais et localement percé. Dans les parties suivantes, nous essayerons de comprendre comment cela est possible et éventuellement d'en trouver une explication.

## 3<sup>ème</sup> Partie

### La modélisation des procédés

#### 3.1 Introduction à l'intérêt de la simulation

La durée moyenne d'utilisation d'un véhicule diminuant, il est impératif pour les constructeurs automobiles d'amortir les investissements sur une plus faible quantité de pièces produites par les outillages. Pour conserver les ratios financiers habituels, il faut bien évidemment diminuer les coûts de développement. Il y a une dizaine d'années, les moules prototypes étaient encore légions alors qu'aujourd'hui, cela devient l'exception. Cette mutation n'a été possible qu'avec les progrès des outils de simulation tant en rhéologie qu'en calculs de structures et autres phénomènes modélisables. Cette situation dans le domaine automobile a ensuite été étendue à tous les domaines : électroménager, ameublement, jouet.

Aujourd'hui, bon nombre de contraintes peuvent être reproduites virtuellement avec une corrélation tout à fait correcte par rapport à la pratique. Bien entendu, certains phénomènes physiques sont plus compliqués que d'autres à reproduire; par bonheur les polymères répondent en première approximation assez fidèlement à des lois d'écoulement connues. Dès lors, il était possible de modéliser mathématiquement ces phénomènes et ainsi prédire ce qui peut se produire dans la cavité.

Il y a une vingtaine d'années, seule la phase d'injection dynamique pouvait être reproduite en écoulement newtonien. Aujourd'hui, avec l'évolution des moyens de calculs, les connaissances sur la rhéologie des polymères et les logiciels se sont perfectionnés et l'on peut simuler toutes sortes de procédés exotiques, il suffit d'avoir le calculateur adapté.

Par ailleurs, les logiciels ont suivi ce développement et peuvent intégrer toutes les propriétés physiques des polymères. Cependant, caractériser un polymère demande beaucoup de temps et cette opération a un coût non négligeable. Pour cette raison, les logiciels sont dotés d'une base de données régulièrement mise à jour et alimentée par les fournisseurs matières.

Même si sur le marché on ne trouve plus guère de diversité dans le choix des logiciels, il y avait dans les années 90 plusieurs logiciels qui avaient chacun leurs particularités :

- Ideas Plastics de SDRC
- Moldflow de Moldflow Corporation, Autodesk aujourd'hui
- C-Mold de AC Technology

pour ne citer que les trois principaux.

Ideas Plastics avait la particularité d'avoir une base de données parfaitement ouverte et transparente. On pouvait créer sa propre matière et entrer les données matières sous forme soit de loi, soit de valeurs tabulaires mesurées. Ainsi, il était nécessaire d'alimenter la base de données matière avec les courbes de relaxation des polymères, de l'orientation préférentielle des charges, etc...C'était de loin le logiciel le plus précis et le plus fiable. Malheureusement, son développement commercial n'a pas été à la hauteur de ses qualités technologiques et SDRC a abandonné son développement en 1995.

Moldflow, à l'opposé, fonctionnait avec une base de données fermée dans la mesure où il était impossible de consulter les valeurs tabulaires qui s'y trouvaient. Cette base de données avait été élaborée à partir de mesures physiques réalisées par la société Moldflow. Très rapidement, face aux questions de ses clients, Moldflow a ouvert sa base de données et intégré les caractéristiques physiques fournies par les fournisseurs matières. Ces données n'étaient pas forcément très fiables car certaines propriétés étaient extrapolées à partir de données mesurées sur un polymère de la même famille. Ainsi, les courbes PVT d'un polyamide chargé de fibres de verre à 30%, étaient obtenues par extrapolation depuis un polyamide non chargé beaucoup plus facile à mesurer. Aujourd'hui, Moldflow a racheté son principal concurrent et a intégré tous les algorithmes de calculs de C-Mold.

C-Mold, logiciel développé par AC Technology était le logiciel concurrent de Moldflow. Ce logiciel avait la même base qu'Ideas Plastics mais avait intégré des algorithmes de calculs plus performants. Après Ideas Plastics, c'était le logiciel de référence que tous les laboratoires de calculs testaient en permanence. Ainsi, le laboratoire de PSA à la Garenne Colombe avait réalisé une comparaison entre différents logiciels sur la planche de bord PH7. Les résultats en pression donnés par C-Mold s'étaient avérés de loin les plus précis par rapport aux deux autres logiciels testés. Ce logiciel avait de plus la particularité de pouvoir reproduire d'autres procédés que l'injection et en particulier : le thermoformage, l'injection-compression, l'injection des thermodurcissables, et bien évidemment l'injection assistée par gaz.

C'est après de multiples contacts avec le laboratoire de PSA et en particulier avec Monsieur Claude Courmier, que j'ai décidé d'acquérir une licence de C-Mold Gas Assist à la création de Simplast. Ce module Gas Assist avait été testé par ce laboratoire sur de nombreuses pièces et permettait de donner des résultats très proches de la réalité avec dans la majorité des cas moins de 10% d'écart en pression entre théorie et pratique.

Ces trois logiciels proposaient une modélisation par éléments finis sur la surface moyenne de la pièce. Cette modélisation présente bien évidemment des inconvénients en particulier lors de variations brutales d'épaisseur, ce qui est très courant en injection assistée par gaz. Différents artifices ont permis de limiter les défauts engendrés, mais cela restait une modélisation 2D1/2. Cette notion de 2D1/2 correspond à un maillage surfacique en définissant une épaisseur en chaque point de la surface. Tant que celle-ci était constante, les hypothèses de base type Hele-Shaw étaient parfaitement acceptables dans 90% des cas traités mais dès que des variations brutales étaient intégrées au modèle, on voyait immédiatement les limites de ce traitement. Le résultat le plus significativement faux était la position des lignes de soudure. En effet, la composante de vitesse perpendiculaire au plan médian de la pièce était ignorée d'où un décalage conséquent des zones de recollement.

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux laboratoires universitaires ont largement développé la simulation en prenant la géométrie exacte de la pièce. Un maillage surfacique est d'abord généré sur la peau de la pièce et raffiné dans les zones critiques comme au seuil ou au niveau de l'injecteur gaz. Cette opération réalisée, il est alors possible de produire un maillage volumique. Bien entendu, cela n'a pu être possible qu'avec les progrès en parallèle des capacités de traitement des ordinateurs. Ainsi, on pourra citer les travaux des universités d'Aachen en Allemagne (IKV avec Sigma3D), de Taïpei à Taïwan (Moldex3D) et du CEMEF de Mines Paristech à Sophia-Antipolis (REM3D).

Dans les années 1990, un logiciel de simulation avait été élaboré avec entre autres les grands constructeurs automobiles français, ce logiciel avait pour nom CLIP et était un logiciel 2D1/2. De nombreux laboratoires universitaires avaient travaillé sur ce sujet et en particulier le CEMEF. Un autre logiciel (volumique) était développé en parallèle et une version commerciale appelée REM3D a été proposée sur le marché début des années 2000. L'industrialisation et la commercialisation de ce logiciel est aujourd'hui assurée par la société Transvalor. Ce logiciel permet la simulation numérique de la plupart des procédés de transformation des matières plastiques et en particulier les procédés d'injection assistée par fluides. Afin de valider des modules de ce programme, il est indispensable de comparer théorie et pratique. En collaboration étroite avec Transvalor, nous faisons bénéficier REM3D de notre expérience pratique en particulier pour les modules d'injection assistée par fluides. Cette collaboration a ainsi pu mettre en évidence un écart significatif dans les épaisseurs de parois résiduelles entre théorie et pratique.

La principale difficulté est de pouvoir maîtriser les épaisseurs résiduelles après avoir injecté du gaz. Dans les différents cas traités pour l'instant, ce point s'avère être le plus critique et sans aucun doute le plus compliqué à résoudre au niveau numérique. Le logiciel REM3D permet par contre de valider avec une très bonne précision la position des surfaces de recollement de différents flux matière. Dans le but d'être très réactif, nous réalisons toujours une étude avec C-Mold 2001, soit une étude en 2D 1/2, cela pour «dégrossir» les paramètres d'injection. Dans les cas critiques, et pour valider des points sensibles, nous faisons, mais pas systématiquement, une étude REM3D en utilisant bien évidemment les résultats de C-Mold.

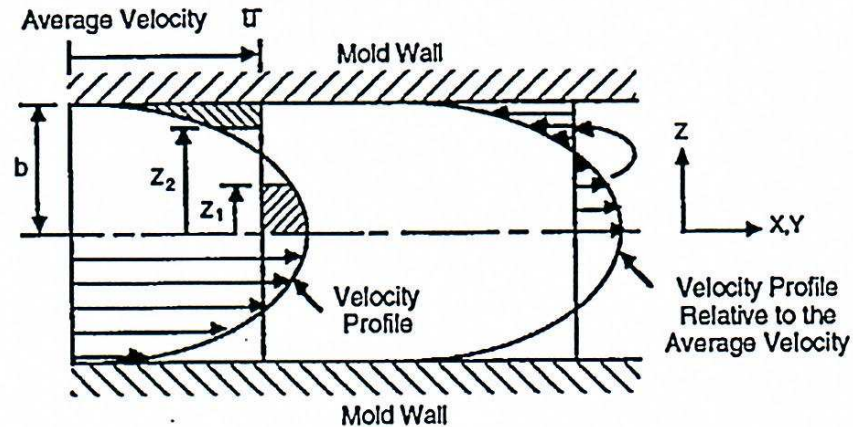
La totalité des travaux présentés ici ont été effectués avec le logiciel C-Mold version 2001.

### 3.2 Gestion de l'interface en injection assistée par gaz

Dans les différents modèles testés numériquement, le gaz a été traité de deux façons différentes. La première hypothèse - considérer que l'ensemble de la bulle de gaz se trouve à pression constante - a pu être vérifiée dans des cas simples. Cette méthode est implémentée dans C-Mold [42] qui considère toutes les propriétés du gaz comme constantes, les variations étant bien plus faibles que celles entre le polymère et le gaz.

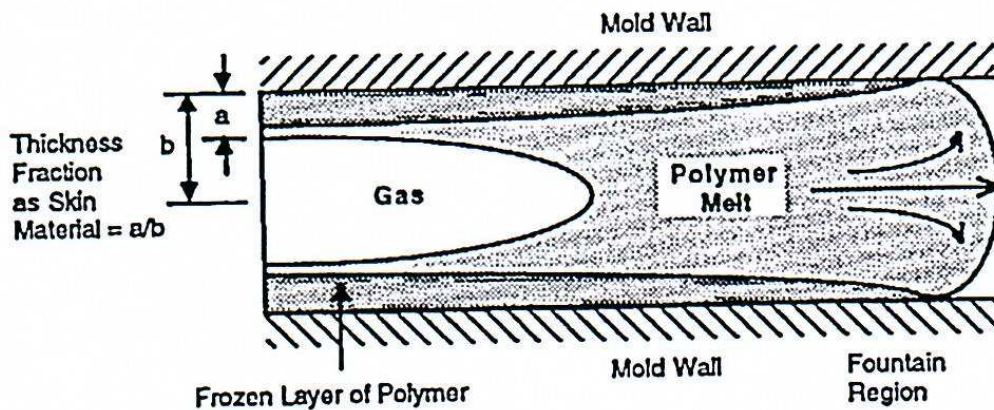
Une seconde hypothèse était de considérer le gaz comme un fluide de très faible viscosité. Cette hypothèse pouvant être intéressante s'est avérée réductrice car le calcul du champ de vitesse dans du gaz par la résolution des équations de Stokes n'est pas appropriée. Par expérience, on observe que le gaz se déplace à très grande vitesse dans le polymère et que des phénomènes d'accélération du front matière devraient être prises en compte. Ce phénomène peut aisément être mis en évidence en pratique, car cette accélération peut provoquer un formidable étirement du front matière pouvant aller jusqu'au décollement de la matière de la paroi du moule.

La difficulté réside alors dans le calcul de l'épaisseur de la veine fluide dans laquelle va se propager la bulle de gaz.



**Figure 33 :** Profil de vitesses dans un écoulement

Cette figure montre que la matière arrivant à la cote  $z_1$  se retrouvera à la cote  $z_2$  l'instant suivant.



**Figure 34 :** Profil de vitesse en injection assistée par gaz

Le calcul de cette fraction est fondé sur une méthode de résolution hybride éléments finis/différences finies/volume de contrôle. Ainsi les axes de coordonnées  $x$  et  $y$  sont décrits par des éléments finis avec volume de contrôle pour reproduire l'avancement du front matière et du gaz alors que la fraction polymère/gaz est obtenue à partir de différences finies.

### 3.3 Approche théorique type 3D

Une description très complète des hypothèses et des méthodes de résolution se trouve aisément. Elle est parfaitement décrite, notamment dans les thèses de David Daboussy [2], et de Luisa Rocha Da Silva [43].

Dans le cas de résolution 3D, ces auteurs présentent une utilisation de la méthode des éléments finis 3D pour simuler l'injection assistée par gaz. Cette méthode de résolution des problèmes d'équations aux dérivées partielles repose sur l'utilisation du théorème de Green pour transformer un problème 3D en une formulation sur sa frontière 2D. Cette diminution du degré du problème apporte un gain important en terme de temps de calcul.

Cette méthode a ses limites, et des difficultés apparaissent dès lors qu'il y a des singularités d'écoulement et que le polymère n'est plus un fluide newtonien. Il devient alors nécessaire d'effectuer des calculs dans tout le volume de l'écoulement.

La méthode utilisée consiste à partir d'un maillage tétraédrique et à suivre la progression du gaz à l'aide de marqueurs volumiques sur ce maillage. Les auteurs définissent la frontière du domaine comme l'ensemble des triangles extérieurs aux tétraèdres complètement occupés par le fluide. Ils obtiennent ainsi une discrétisation de la surface libre, de l'interface polymère/gaz et de la partie des parois de la cavité en contact avec le polymère. Ils appliquent sur cette discrétisation les conditions aux limites dans chaque partie, notamment une pression constante sur l'interface avec le gaz. Cette méthode ne donne de bons résultats que dans des cas simples.

Dans le cas de l'écoulement d'un polymère, fluide typiquement non-newtonien, le problème devient immédiatement plus complexe et les équations de Stokes deviennent non-linéaires. Cette non-linéarité empêche de formuler le problème uniquement sur la frontière. L'idée est d'utiliser une méthode qui consiste à résoudre un problème linéaire et de l'étendre au volume complet par itérations successives jusqu'à atteindre une convergence. Pour ce faire est utilisé un maillage Lagrangien 2D qui se déforme avec le domaine occupé. Des précautions sont nécessaires pour atteindre la convergence.

Le traitement numérique de ces points est largement expliqué et détaillé dans la thèse de David Daboussy [2].

### 3.4 Méthodologie d'une étude REM3D

A partir du fichier géométrique de la pièce, nous réalisons un maillage éléments finis sur la surface de la pièce. Il faut ajouter à ce modèle, le système d'alimentation ainsi que la géométrie de l'injecteur gaz. Cette phase de maillage est réalisée avec un outil spécifique de maillage tel qu'Ideas, Ansa, Hypermesh ou autre.

Le modèle peut alors être importé dans le pré-processeur de REM3D appelé GLPRE. Cet outil permet de contrôler la qualité du maillage puis de l'améliorer pour le rendre compatible avec REM3D. Pour obtenir des résultats précis, il est indispensable de raffiner le maillage en différents points :

- à l'entrée de la carotte d'alimentation
- au niveau du seuil
- au niveau de tous les accidents de géométries

Mais surtout, il faut raffiner le maillage dans l'épaisseur de façon à pouvoir reproduire avec exactitude les phénomènes observés en pratique. En particulier en injection assistée par fluides, l'intérêt de ce type de simulation est de pouvoir prédire avec précision les épaisseurs de parois résiduelles. Sur certaines pièces telles que des conduites hydrauliques, une épaisseur minimale de 2.2 mm est imposée. Pouvoir prédire les zones critiques permet d'apporter les modifications nécessaires avant d'avoir réalisé le moule.



Une fois ce maillage surfacique optimisé, nous pouvons générer le maillage volumique en plusieurs itérations en activant une option appelée GCM qui permet de déplacer le raffinement en peau et d'augmenter la taille des éléments à cœur, éléments qui seront amenés à se déplacer avec l'avancée de la bulle.

Cette étude 3D n'est effectuée qu'après avoir réalisé l'étude avec C-Mold et dans le seul but de gagner du temps. En effet, les modèles C-Mold sont environ 30 fois plus petits que les modèles REM3D et même avec de gros calculateurs, les délais des transformateurs sont souvent incompatibles avec un nombre de calculs souvent supérieur à 10. Nous réalisons donc l'optimisation avec C-Mold puis reportons les conditions aux limites dans REM3D. Le traitement numérique des différentes hypothèses prises en compte est largement développé dans la thèse de David Daboussy [2]. Nous n'avons aucunement travaillé sur cette partie numérique, mais on trouvera dans le document de Monsieur Daboussy toutes les hypothèses posées et intégrées au logiciel REM3D.

Ce travail complémentaire permet de valider tous les points impossibles à analyser avec C-Mold à savoir tous les phénomènes qui se produisent à la surface de la pièce. Cette étude REM3D permet de valider les épaisseurs de paroi résiduelle après l'injection du gaz.

Nous avons essayé de reproduire les phénomènes de perforation observés en pratique mais des critères de calculs, en particulier de rupture, ne sont a priori pas implémentés dans REM3D. En effet, cette configuration de rencontre entre deux bulles de gaz est un cas particulier où l'on observe une diminution progressive de l'amas matière entre les deux bulles. Au fur et à mesure de la diminution de cet amas, il arrive un instant où le voile résiduel est si fin qu'il cède. A cet instant, n'existe plus qu'une seule bulle, repoussant le polymère résiduel de l'amas contre les parois faisant ainsi disparaître toute trace de recollement.

En collaboration avec la société Transvalor, nous avons essayé un nombre conséquent d'options de calculs à partir d'autant de maillages.

Dans un premier temps, nous avons réalisé le maillage de la pièce complète sous Ideas et avons effectué différents raffinements dans GLPre. Nous avons de plus différencié maillage symétrique et non-symétrique.

Quelle que soit l'option retenue, nous avons observé, tout comme Transvalor que le flux matière devenait très rapidement asymétrique. La bulle générée ensuite dans la pièce ne pouvait évidemment pas permettre de rattraper cette divergence.

Nous essayerons plus loin de proposer une explication à cet écart.

## 4<sup>ème</sup> Partie

### Etude d'un cas théorique simple

#### 4.1 Méthodologie d'une étude C-Mold

Différents cas peuvent se présenter, soit nous avons la possibilité de participer au développement soit il nous est simplement demandé les paramètres de cycle d'injection à appliquer. Nous n'aborderons pas ici cette dernière situation qui ne demande guère de compétences particulières sauf celles de connaître l'outil logiciel.

En règle générale, nous récupérons la géométrie de la pièce à étudier sous forme de fichier soit IGES, soit STEP, soit encore au format Catia V4. Ensuite, il est indispensable de retravailler la géométrie et en particulier de lier ou coudre toutes les surfaces pour que le logiciel de maillage puisse générer un maillage homogène sur la totalité de la pièce. C'est l'opération la plus fastidieuse et inintéressante d'une étude.

L'étape suivante est la définition de la position du ou des points d'injection matière. Cette opération est réalisée en prenant en compte le cahier des charges du client et en particulier sa contrainte en force de fermeture. Différentes itérations de calculs de remplissage sont nécessaires pour obtenir la position idéale de ces points. En injection assistée par gaz, il est indispensable de conserver des zones **non-remplies** au moment de la commutation de façon à attirer la bulle de gaz. Dans tous les cas, le point d'injection sera positionné de façon à remplir au plus tôt les zones de faible épaisseur.

Ensuite, nous positionnons la ou les veines gaz en fonction des résultats de remplissage et proposons la position des injecteurs gaz. Avec C-Mold, la veine gaz est modélisée soit en coques minces « épaisses » soit en éléments poutres à deux nœuds. La raison de ce choix est d'abord numérique car des problèmes de convergence de calculs de remplissage en particulier posaient problèmes. [44] Ces nœuds sont alors raccordés au maillage surfacique par des éléments appelés connecteurs qui permettent simplement de transmettre les informations de pression, viscosité et température d'un nœud à l'autre. Ces éléments sont utilisés pour éviter d'avoir de la matière en double au niveau de ces poutres. Ces informations transmises au client sont alors validées au niveau mécanique pour vérifier la tenue mécanique de la pièce ainsi renforcée par effet tube. Ce bouclage permet d'optimiser la conception de la pièce sans avoir à réaliser le moindre copeau.

Nous pouvons alors procéder à l'optimisation des paramètres d'injection. Avec C-Mold, nous avons la possibilité d'imposer un débit ou une durée d'injection matière. Cette option permet de réaliser le remplissage à vitesse constante et la pression d'injection du gaz devient alors un résultat de calcul. Cette option permet de supprimer les problèmes au moment de la commutation entre la fin de l'injection dynamique et le début de l'injection du gaz.

Les problèmes de commutation se caractérisent par soit un effet de peau d'orange soit par une ligne d'arrêt du front matière. Le phénomène de peau d'orange s'observe en pratique lorsque la matière subit une forte accélération et se décolle de la paroi du moule. Puis, avec la

pression de gaz à l'intérieur de la cavité, la matière reprend contact avec la paroi du moule mais en ayant emprisonné de l'air provoquant ainsi des cloques en surface. Le phénomène de ligne d'arrêt est provoqué par l'arrêt du front matière au moment de la commutation. A cet instant, toute pression appliquée à la matière cesse et, lorsque la vitesse d'injection est importante, le phénomène d'inertie permet à la matière de continuer à avancer. Par contre, lorsque la vitesse d'injection était trop faible, le front matière s'arrête et a le temps de refroidir. Lorsque la pression du gaz commence à se faire sentir, le front redémarre et colle en surface une trace de cet arrêt sous l'aspect d'un cheveu collé sur la surface.

Pour remédier au premier défaut dû à l'emprisonnement d'air à l'avant du front matière, il faut diminuer la pression ; et pour remédier au second, il faut injecter le gaz plus tôt. Ainsi, à partir de la courbe de pression obtenue en imposant une vitesse d'avancée du front matière constante, il est possible d'appliquer un ou plusieurs paliers de pression en respectant au mieux cette courbe de pression. En règle générale, les paliers proposés permettent de supprimer en pratique les éventuels défauts. Après avoir optimisé la pression d'injection du gaz, il est indispensable d'optimiser la longueur de la veine gaz. Pour cela, il suffit de réduire le dosage pour obtenir une veine gaz jusqu'à l'extrémité de la pièce. Ces opérations d'optimisation du dosage peuvent demander plusieurs itérations de calculs. Il arrive que pour obtenir ce résultat il soit nécessaire de modifier la position de l'injecteur gaz voire plus rarement le point d'injection matière.

Outre la géométrie modélisée en éléments coques minces, il est nécessaire d'appliquer des paramètres d'injection. Ainsi, au point d'injection matière, on imposera les conditions de procédé débit, pression et température. De la même façon, on pourra choisir dans la base de données toutes les caractéristiques de la matière retenue. Les propriétés que l'on trouve en règle générale sont:

- viscosité Cross, Carreau,...pour différentes températures
- PVT (loi de Tait)
- Conductivité thermique pour 1 pression et 1 température donnée (état solide)
- Capacité calorifique

De la même façon, on indique les caractéristiques de la matière du moule: conductivité thermique et capacité calorifique et masse volumique et les propriétés de la presse à injecter. Il est nécessaire de procéder à de multiples itérations, une vingtaine en moyenne pour obtenir des résultats optimisés.

Systématiquement, on présentera les résultats suivants:

- isochrones
- la forme de la bulle
- isobares
- isothermes
- cisaillement
- retraits
- force de fermeture calculée
- fraction solide
- pourcentage de gaz
- poids pièces
- lignes de soudure

Les isochrones nous permettent de valider la phase d'injection dynamique jusqu'au complet remplissage de la cavité. On veillera en particulier à ce que les isochrones (les courbes montrant la position du front matière dans le temps) soient espacées de façon régulière quelle que soit l'étape de remplissage.

La forme de la bulle est importante car elle permet de diagnostiquer les pénétrations de gaz appelées inflorescences hors de la veine. Ces inflorescences sont préjudiciables à la tenue mécanique de la pièce. Pour les éviter, il est important de respecter le rapport entre épaisseur de la pièce et diamètre de la veine gaz. Suivant la matière, on optera pour des valeurs comprises entre 3 pour les styréniques et 5 pour les polyoléfinés.

Les isothermes déterminent et valident les conditions de refroidissement imposées et donc le temps de cycle.

Visualiser le taux de cisaillement ne sert qu'à contrôler l'auto-échauffement de la matière au niveau du seuil. Un cisaillement trop important a pour conséquence une augmentation de la température de la matière et une chute brutale de la viscosité.

Les retraits sont donnés en retraits volumiques et non dans les différentes directions. Nous reviendrons également plus loin sur ce point particulier.

C-Mold donne avec une bonne précision la force de fermeture calculée. Ce résultat permet de valider le système d'injection proposé et sa compatibilité avec la presse à injecter retenue.

Suivre la fraction solide permet de visualiser très rapidement le refroidissement du polymère en particulier dans la veine gaz. En effet, cela permet de diagnostiquer tout amas de matière ou toute surépaisseur résultant de la phase de soufflage par le gaz.

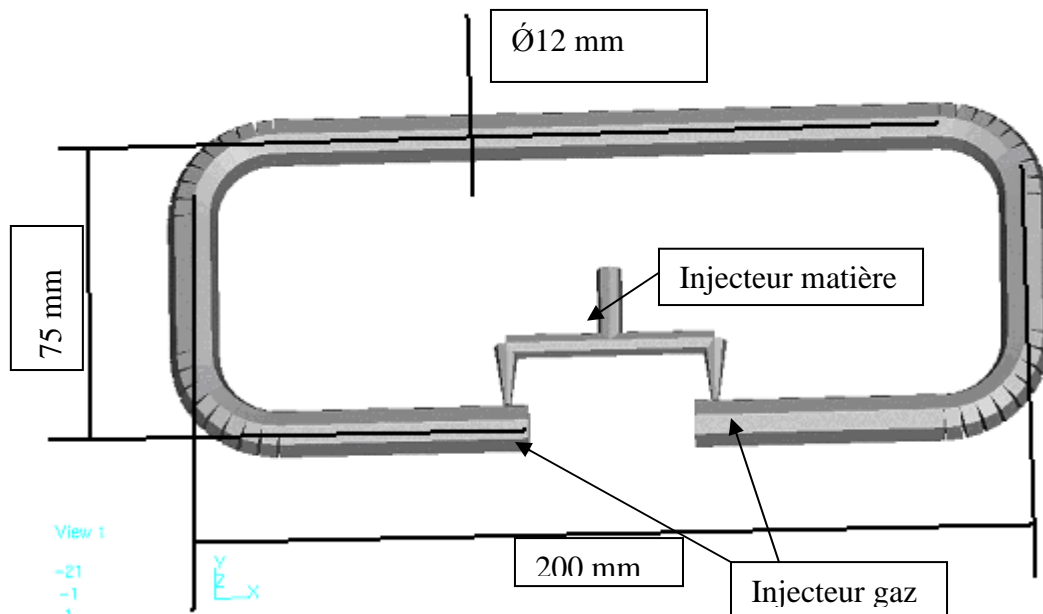
Afin de pouvoir quantifier le volume de gaz et donc la consommation par pièce, il est important pour le client de connaître cette valeur.

Le résultat du poids pièce complète le précédent pour obtenir le chiffrage de la pièce.

Il est enfin possible de retrouver la position des zones de recollement. Ce résultat est à utiliser avec précautions vu les réserves que nous avons mentionnées plus haut.

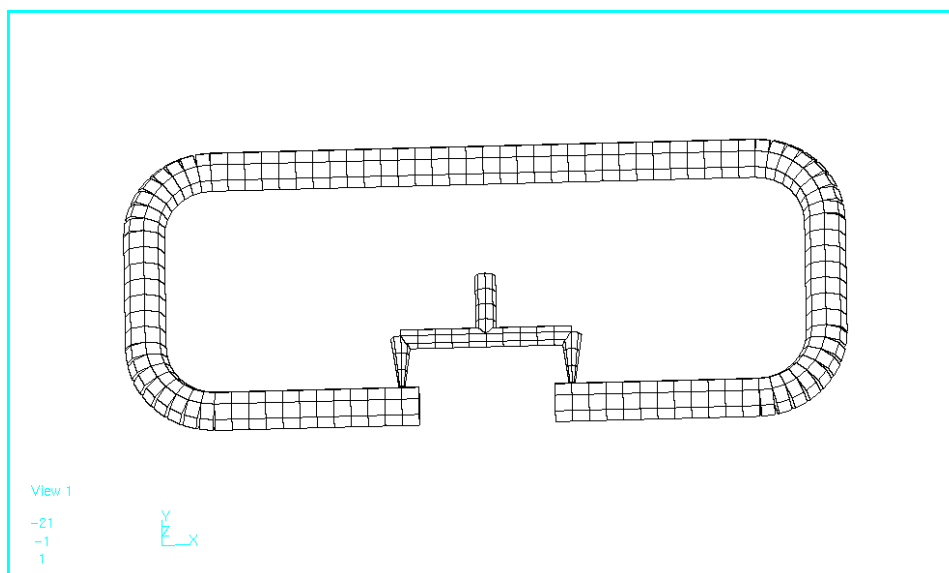
## 4.2 Etude d'un cas simple avec C-Mold

Afin de bien montrer l'intérêt de cette interconnexion entre plusieurs bulles, nous présentons ci dessous le principe sur un cas simple : une injection matière en deux seuils et une injection de gaz par deux injecteurs.



**Figure 35:** Vue ombrée de la géométrie

Cette géométrie tubulaire de diamètre 12 mm a une longueur de 200 mm et une largeur de 75 mm entre axes longitudinaux de la pièce.



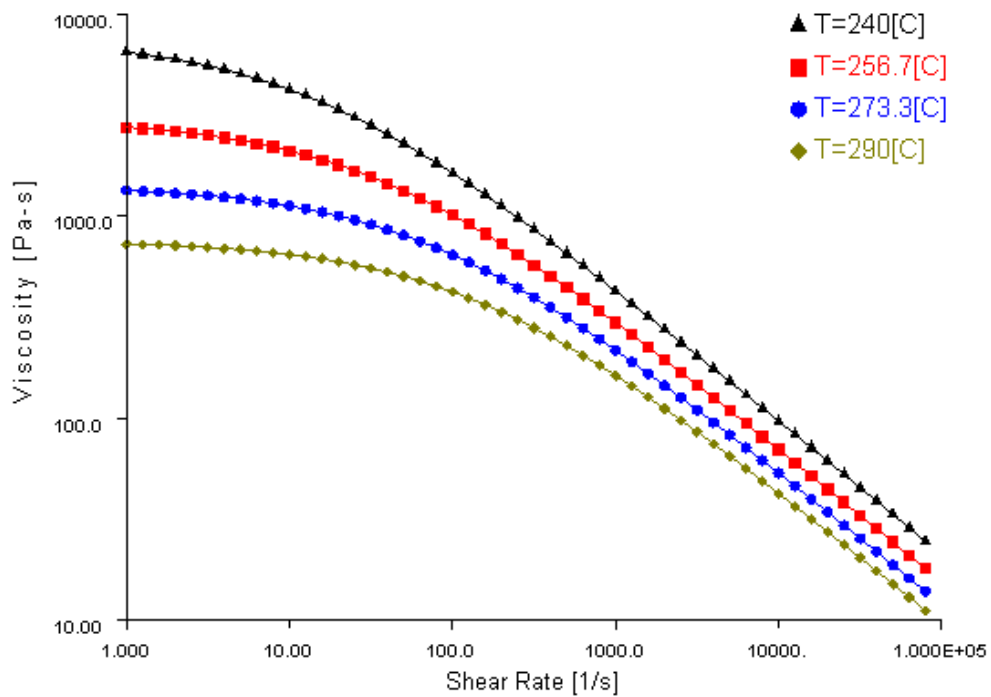
**Figure 36:** Vue du maillage en éléments poutres uniquement

Nous avons testé quelques couples de paramètres et avons retenu les paramètres de mise en oeuvre suivants :

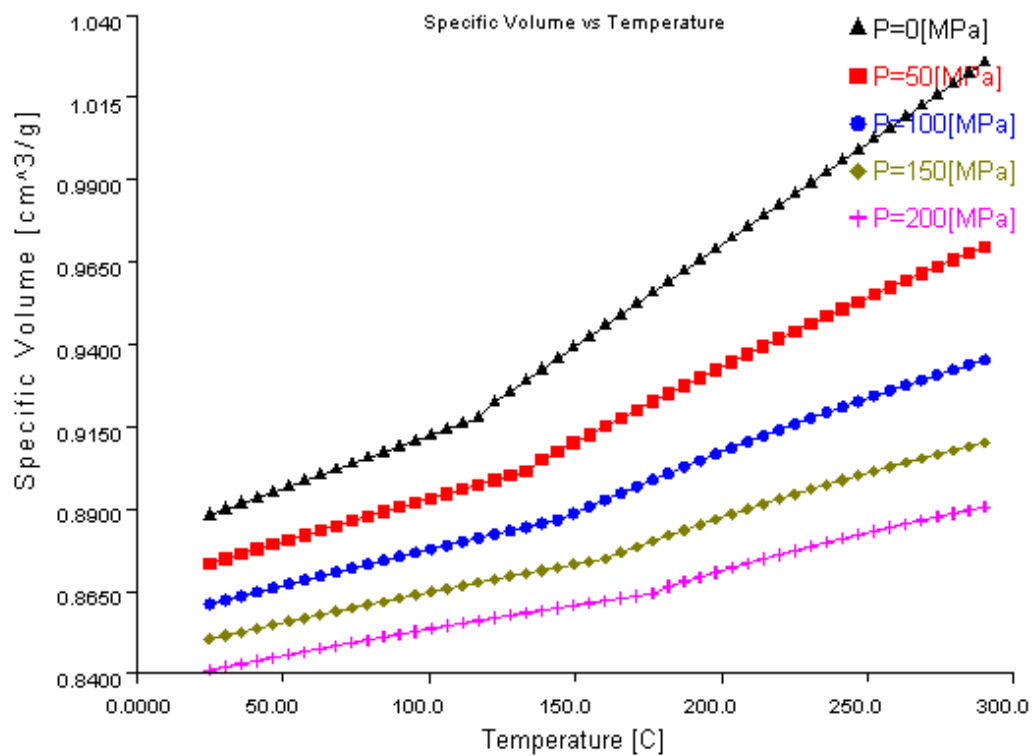
- remplissage à 100% 2 s
- injection dynamique 1.56 s
- durée de l'injection du gaz 35 s
- temps de cycle 40 s
- matière Bayblend T85MN
- température matière 270°C
- température moule 70°C
- pression d'injection du gaz 25 bar et 50 bar

Sur les figures suivantes, nous indiquons les données matière issues de la base de données de Moldflow.

### Courbes de viscosité



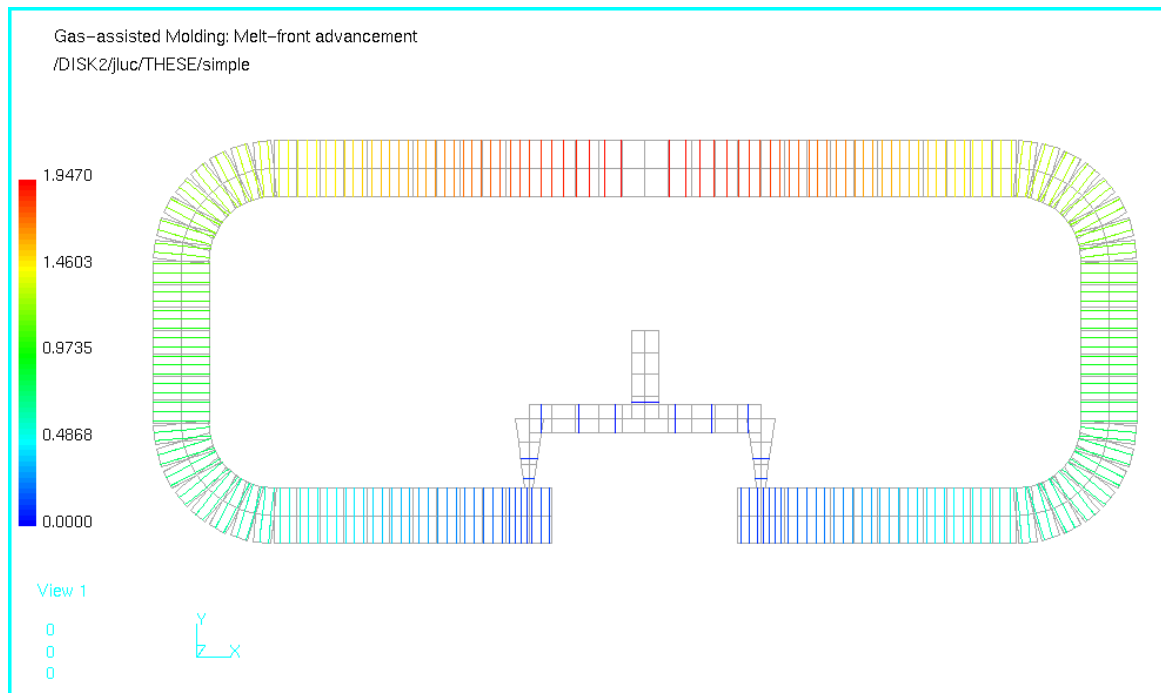
**Figure 37:** Courbes de viscosité issues de la base de données de Moldflow



**Figure 38:** Courbes PVT issues de la base de données de Moldflow

Température de transition	119°C
Capacité calorifique	1730 J/kg.C° à 260°C
Conductivité thermique	0.16 W/m.C°

## Isochrones de remplissage



**Figure 39:** Isochrones

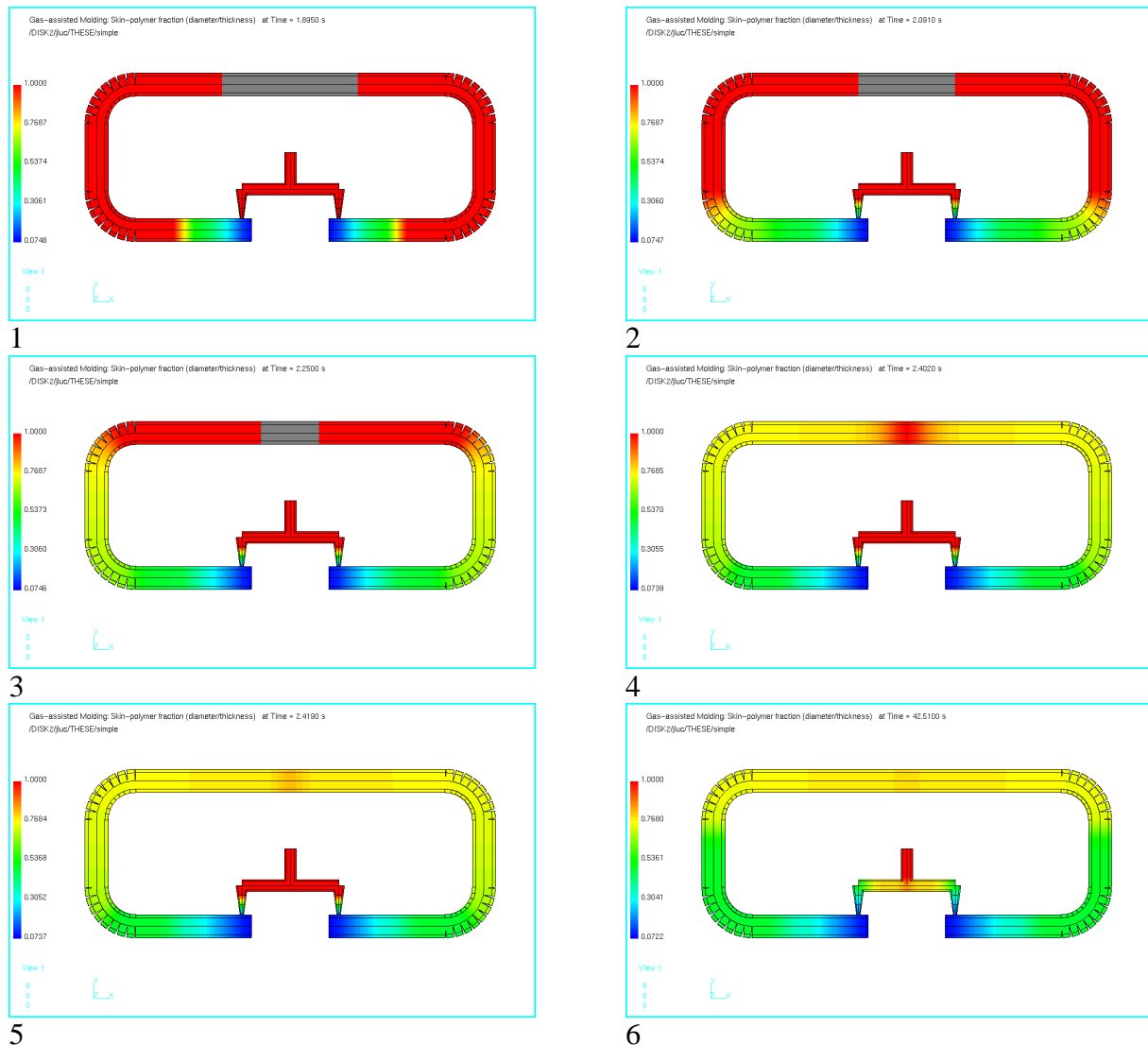
Cette figure présente les positions successives du front matière dans le temps en intégrant la phase d'injection dynamique et la phase d'injection du gaz. Pour éviter des défauts de surface telles que lignes d'arrêt ou boursouflures en surface, il faut veiller à un espacement identique des isochrones pendant toute la durée du remplissage de la cavité. Dans la configuration présentée, nous avons obtenu un résultat tout à fait acceptable.

Une ligne d'arrêt s'observe par un empilage de ces isochrones au moment de la commutation en gaz donc au moment où l'on commence à injecter le gaz dans le polymère. Comme celui-ci se déplace très rapidement dans le polymère fondu, il faut essayer de réduire l'écart de vitesse pouvant exister entre ces deux phases d'injection, matière d'abord puis gaz dans un deuxième temps. Pour y remédier, il faut augmenter la vitesse d'injection dynamique, en pratique on se situe souvent proche des capacités maximales des machines, et injecter le gaz plus tôt. Augmenter la pression d'injection du gaz n'a pour seule conséquence qu'une augmentation de l'écart entre vitesse d'injection dynamique et vitesse d'avancée donnée par la pression de gaz.

Les boursouflures en surface ont pour cause un décollement de la matière de la paroi du moule, phénomène théoriquement impossible pour les logiciels. Ce décollement est provoqué par un très fort étirement du front matière dû à une pression de gaz trop élevée. Réduire la pression suffit en règle générale à pallier à ce défaut.

Afin de montrer le phénomène d'interconnexion des deux bulles, nous avons visualisé ce résultat à différents pas de temps. On visualise la fraction de polymère par rapport au gaz.





**Figure 40:** Décomposition du remplissage

Dans ces différents résultats, la couleur rouge montre la présence de polymère, les autres donnant une indication du pourcentage de gaz (définition fig. 37).

Sur l'image 1, l'injection dynamique vient de se terminer et le gaz commence à être injecter par les deux injecteurs. A chacun des injecteurs gaz, nous avons affecté exactement les mêmes paramètres, instant du déclenchement, pression et durée.

Sur l'image 2, les deux bulles avancent de façon symétrique. On observera que les deux fronts matière n'ont pas beaucoup avancé et cela est parfaitement logique. La bulle de gaz n'occupe que la zone où le polymère était encore à l'état fondu, de l'ordre de 6 mm de diamètre, alors que la matière au front doit occuper une diamètre de 12 mm. On pourrait donc imaginer que le front matière ralentisse, il n'en est rien. En effet, le gaz n'ayant aucune viscosité et ne poussant que le polymère fondu se propagera très rapidement dans la cavité et en pratique, on observera une très forte accélération du front matière.

Sur l'image 3, le remplissage se termine et les bulles occupent déjà plus de la moitié de la longueur de la pièce.

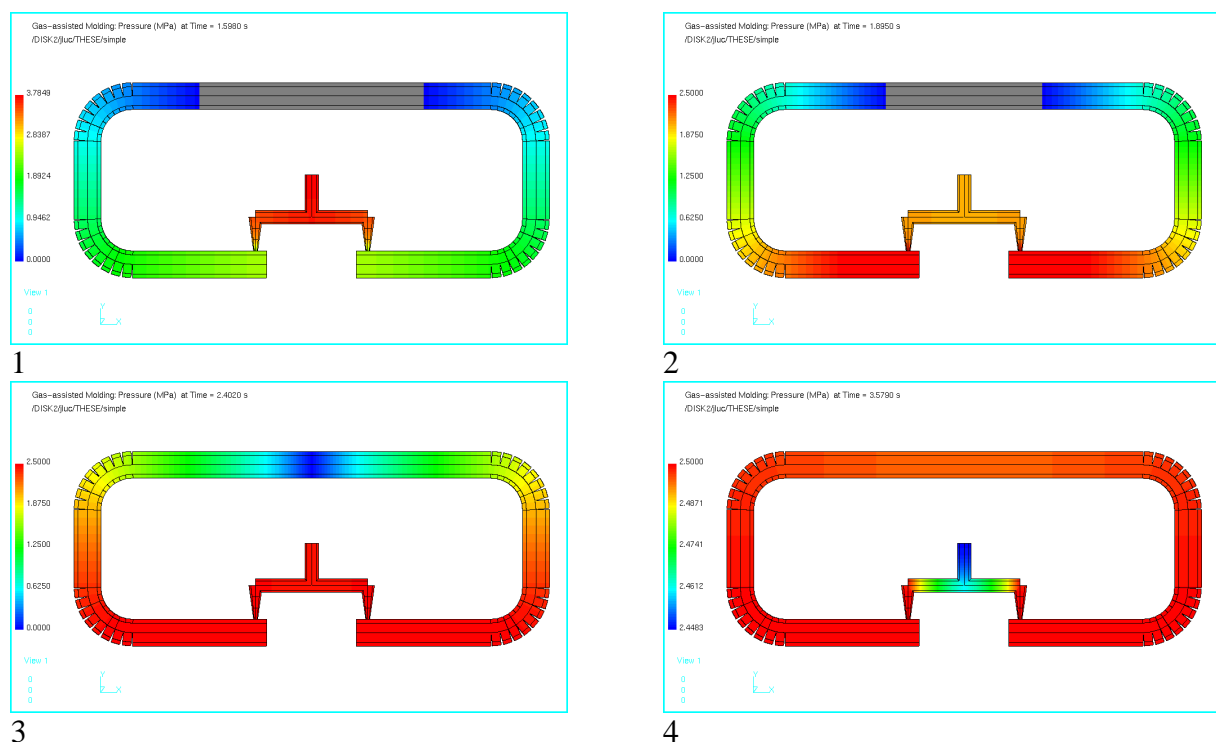
Sur l'image 4, le remplissage vient de se terminer et il subsiste un très faible amas de matière entre les deux bulles.

Sur l'image 5, la connexion s'est réalisée et la phase de compactage a commencé. Les critères de calculs de C-Mold permettent de « voir » cette inter-connexion. Bien évidemment, ne pouvant entrer dans le code, il m'est difficile de donner une explication théorique.

Sur l'image 6, l'épaisseur de paroi a sensiblement diminué, preuve de l'efficacité du compactage

## Visualisation des isobares

La visualisation des champs de pression nous permet de reproduire parfaitement ce qui se passe sur la figure 44.



**Figure 41:** Evolution de la pression dans le temps

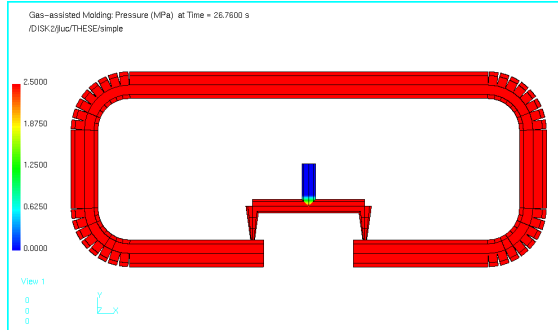
Sur cette géométrie, nous souhaitons d'abord montrer le principe avant de traiter les valeurs numériques qui dans ce cas ne présentent guère d'intérêt.

La figure 1 montre la phase d'injection dynamique et une pression d'injection très faible vu la géométrie de la pièce.

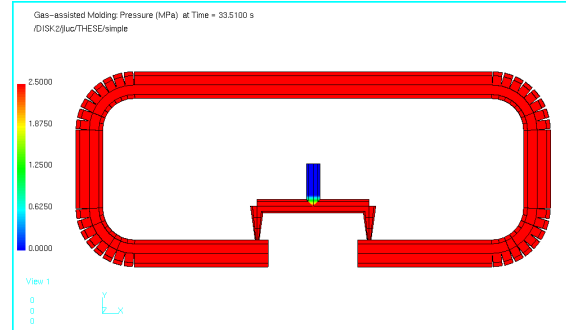
Sur la figure 2, la pression d'injection du gaz a pris le relais de l'injection dynamique pour assurer la fin du remplissage. Très logiquement, la pression d'injection du gaz est beaucoup plus faible que la pression appliquée à la matière par la presse à injecter. C'est là un des intérêts de ce procédé, de faire avancer un polymère fondu à basse pression. Les

points d'injection gaz se trouvant aux deux extrémités de la pièce, celles-ci seront très rapidement sous pression et parfaitement compactées.

Le remplissage de la cavité est réalisé sur la figure 3, on remarquera que l'influence de la pression du gaz aura progressé dans la direction du flux.



5

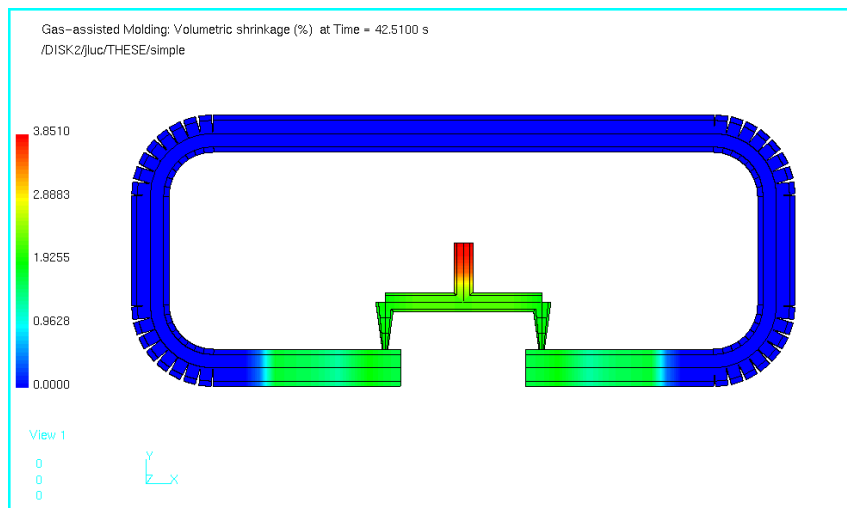


6

Dès la connexion des bulles, le gradient de pression disparaît complètement et la matière sera alors compactée de façon parfaitement homogène. Cela aura pour conséquence une absence totale de contraintes dues aux écoulements.

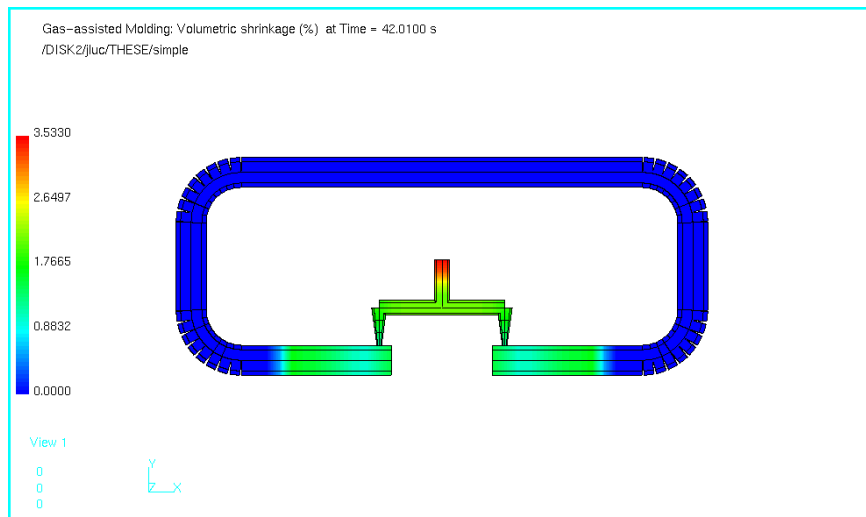
Figures 5 et 6, le champ de pression à différents pas de temps, la figure 6 étant la visualisation quelques secondes avant l'ouverture du moule.

## Retraits volumiques



**Figure 42:** Compactage avec 25 bar

Visualisation du retrait volumique avec une pression constante de compactage de 25 bar. Le retrait le plus important se trouve dans la carotte ; dans la pièce, le retrait est quasi nul.



**Figure 43:** Compactage avec 50 bar

Visualisation du retrait volumique avec une pression constante de compactage de 50 bar. Le retrait le plus important se trouve là aussi dans la carotte ; dans la pièce, le retrait est quasi identique qu'avec une pression de 25 bar.

### 4.3 Analyse

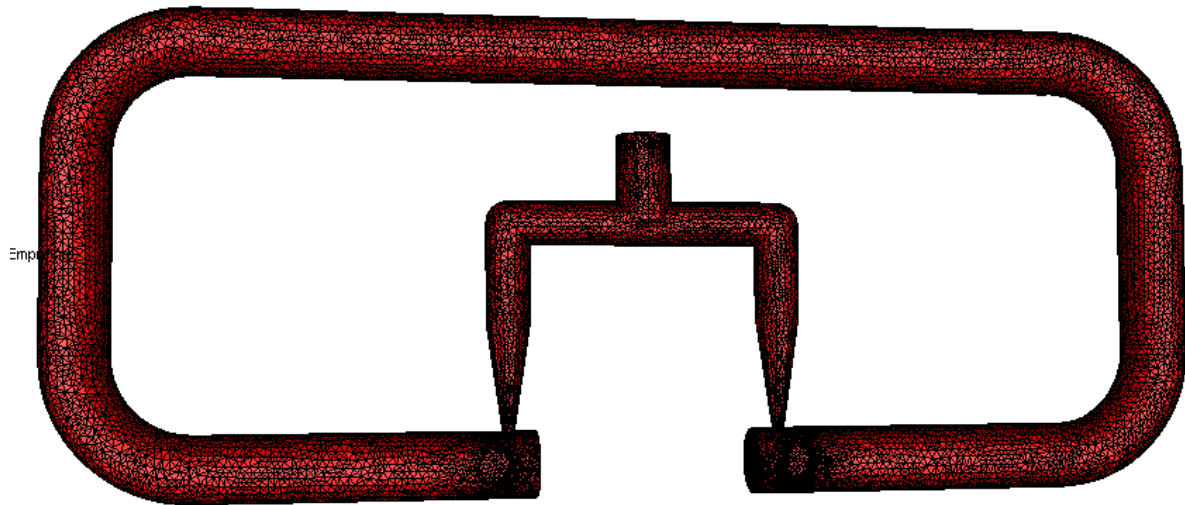
Sur ce cas très simple, nous avons essayé d'expliquer le principe du procédé mis en œuvre. Le procédé retenu est le remplissage partiel, c'est donc la pression de gaz qui repoussera le polymère fondu pour terminer le remplissage de la cavité.

Avec une pression de 25 bar, nous observons que les isochrones sont régulièrement espacées et que le front matière ne subit aucune accélération. Toute modification de la vitesse d'avancée du front matière a pour conséquence une modification de l'état de surface de la pièce. Les phénomènes d'arrêt du front matière et de peau d'orange sont largement décrits dans l'Article des Techniques de l'Ingénieur.

Au vu de ce premier cas d'application, on observe sur les résultats de retrait volumique que le niveau de pression d'injection du gaz n'a que très peu d'influence. Si l'on rapproche ce résultat des courbes PVT, il n'y a rien de surprenant tant que la durée de maintien ne varie pas.

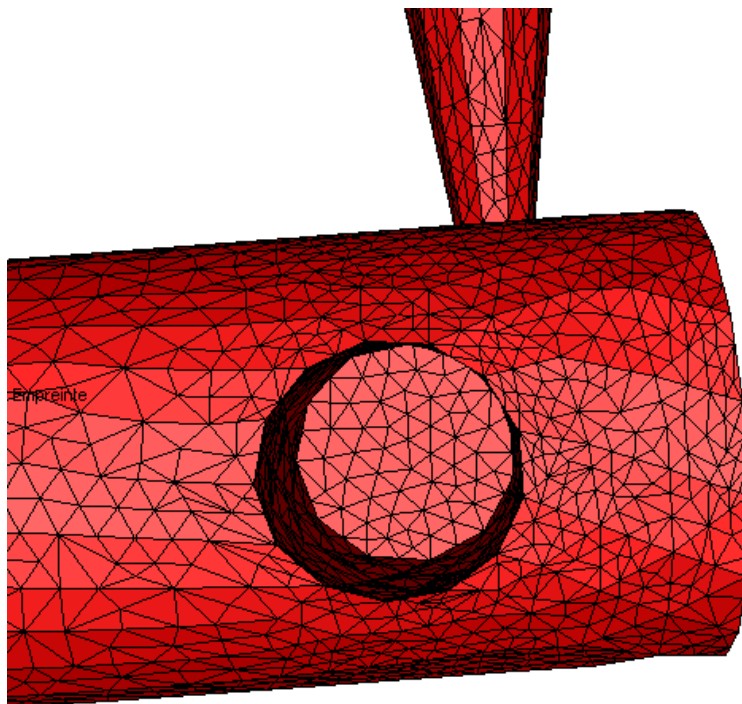
La durée du compactage assuré par le gaz a plus d'influence sur le retrait que son niveau de pression. Le résultat qui nous permet d'affirmer cela est la visualisation de la fraction solide variant avec le temps. En phase de refroidissement, le polymère se solidifie lentement jusqu'à atteindre l'état solide. Suivre ce résultat permet d'approcher une idée du temps de cycle final. Maintenir la pression de gaz dans la pièce pendant la phase de refroidissement permet de s'assurer que tous les phénomènes de retraits sont compensés. Cependant, une évacuation de gaz trop tardive a comme conséquence l'éclatement de la pièce à l'ouverture du moule.

#### 4.4 Etude de ce cas simple avec REM3D



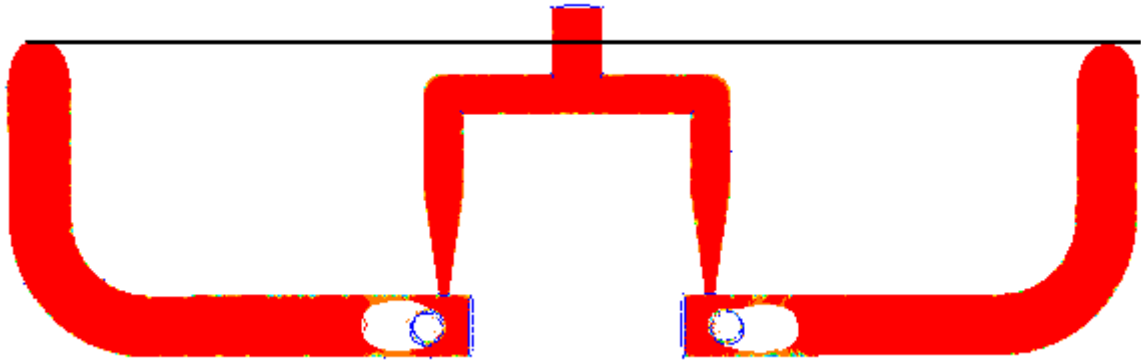
**Figure 44:** Maillage 3D sous GLPRE

Le maillage a été réalisé avec le logiciel Ideas, transféré et amélioré dans GLPre. Nous avons en particulier raffiné les seuils d'injection ainsi que les zones où le gaz était injecté.



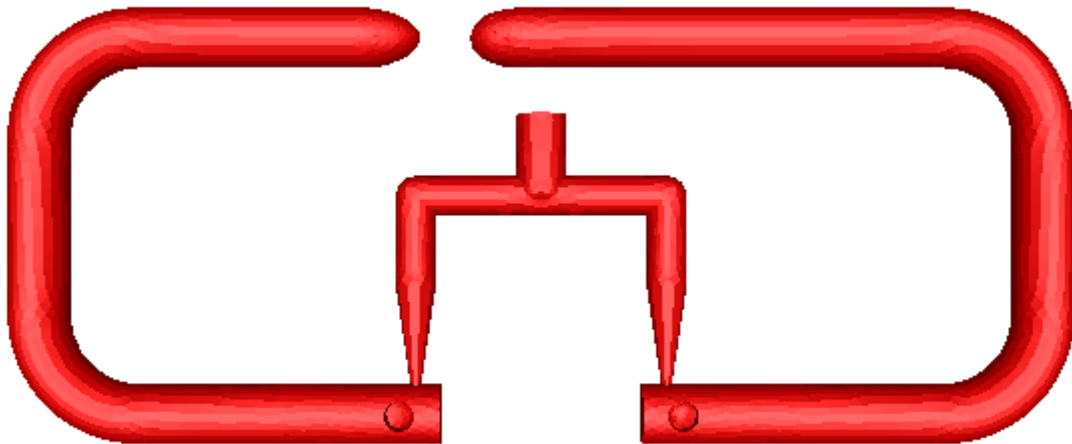
**Figure 45:** Détail du maillage 3D

Pour obtenir ce maillage raffiné, nous avons utilisé GCM, outil qui permet d'augmenter le nombre de couches d'éléments au niveau de la peau de façon à s'affranchir des problèmes de visualisation de la bulle de gaz en fin de cycle.



**Figure 46:** Remplissage en début d'injection du gaz

La phase d'injection dynamique vient de se terminer, le gaz ayant pris le relais de la presse à injecter pour faire avancer le front matière. Dans cette section, on observe que, dès le début de l'injection du gaz, la forme des deux bulles diffère alors que le maillage est raffiné conformément aux préconisations.



**Figure 47:** Remplissage matière

Sur la figure ci-dessus, nous avons visualisé l'état de remplissage après le début de l'injection du gaz. On observera l'importante dissymétrie entre les deux branches de l'anneau, alors que le maillage avait été fortement raffiné mais sans être symétrique. On observe exactement le même phénomène avec un maillage réalisé sur une demi-pièce et symétrisé après raffinement dans GLPre.



**Figure 48:** Avancement de la bulle

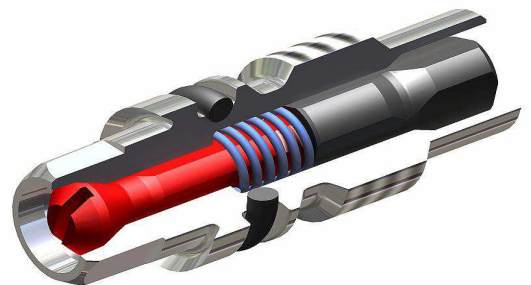
Ci dessus, nous avons uniquement visualisé la bulle de gaz au même pas de temps que l'état de remplissage de la figure 42. L'écart déjà observé sur la figure 41 n'a fait que s'accroître et va bien évidemment déséquilibrer entièrement le remplissage. Dès que la quantité de polymère se trouvant devant la bulle de gaz diffère, ce qui est le cas en pratique, il faudrait en théorie appliquer des pressions de gaz différentes pour conserver une même vitesse d'avancée du front matière. Encore une fois, en pratique, même avec un écart au niveau de la matière, il devient possible de provoquer la rencontre des deux bulles.

L'observation en théorie du phénomène de connexion que nous souhaitons visualiser devient ici impossible.

#### 4.5 Proposition d'explication

Pour pouvoir donner une explication théorique, nous allons repartir de la technologie des injecteurs.

Un injecteur gaz n'est ni plus ni moins qu'un cylindre dans lequel se trouve ajusté un piston. Ci-dessous, nous avons reproduit des photos d'un injecteur gaz Herzog AG (Suisse)



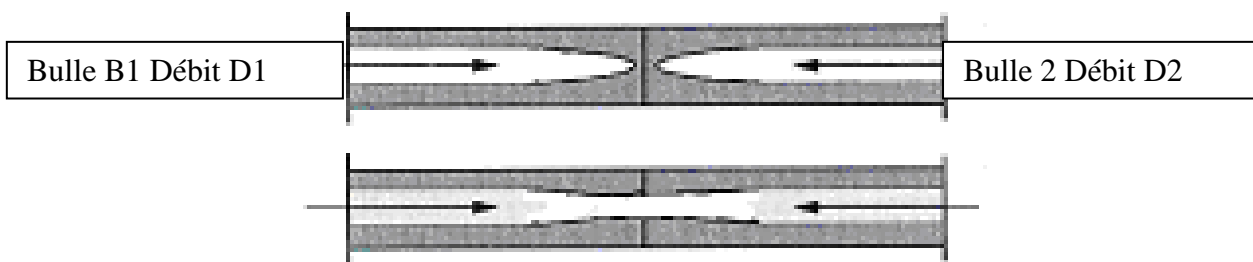
**Figure 48 :** Injecteur gaz Herzog

**Figure 49 :** Injecteur gaz Herzog en coupe

Le jeu entre le cylindre et le piston est un ajustement type H7g6 ou H6g6 ; le jeu est de l'ordre de 0.01 à 0.02 mm.

Malgré toutes les précautions d'usinage que l'on peut apporter, il est quasiment impossible d'obtenir exactement la même section de passage du gaz entre ce cylindre et ce piston. Dès lors que la section de passage diffère un tant soit peu, il y a de fortes présomptions de croire que la perte de charge va également différer.

Lorsque cette perte de charge diffère, la vitesse d'avancée de la bulle de gaz va également différer. Cependant, comme nous avons appliqué exactement la même pression à chaque injecteur, il n'y a que l'écart de perte de charge dans l'injecteur qui puisse expliquer le fait que la pression dans une bulle puisse devenir très légèrement supérieure à l'autre. Cet écart ne va pas fondamentalement changer le remplissage mais va permettre à une des bulles de repousser par différence de débit l'amas matière en retapissant l'intérieur de la bulle jusqu'à disparition complète de celui-ci.



**Figure 50 :** Principe de la connexion

Lorsque le débit  $D1$  est supérieure à  $D2$ , la bulle  $B1$  va repousser l'amas matière subsistant entre  $B1$  et  $B2$  et retapissera la paroi avec le résidu de polymère fondu formant l'amas jusqu'à perforation de celui. D'ailleurs, la connexion peut se retrouver décalée par rapport à l'axe de la pièce ; ce décalage pourrait nous inciter à croire que le débit semble plus influent que la pression.

Au niveau théorique, le problème est beaucoup plus compliqué à résoudre car il faut intégrer un critère supplémentaire qui pourrait permettre de reproduire ce phénomène.

Il semblerait que C-Mold ait intégré un critère de ce type.



## 5<sup>ème</sup> Partie

### Etudes de cas complexes

#### 5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré tout l'intérêt d'assurer le compactage de la matière par une injection de gaz. Sur un cas théorique très simple, nous avons observé qu'il est possible de considérablement réduire les phénomènes de retrait en provoquant la connexion entre les bulles de gaz.

Sur plusieurs cas industriels pratiques, il a été possible de mettre en œuvre cette particularité géométrique. Dans les exemples suivants, nous avons essayé d'analyser le plus finement possible les résultats de calculs puis avons validé ces résultats dans la pratique. Dans une première étape, nous n'avons provoqué la rencontre que de deux bulles. Les résultats pratiques ont été spectaculaires. Dans une deuxième étape, nous avons testé cette opportunité en provoquant la connexion de sept bulles de gaz. Là aussi, les résultats furent spectaculaires.

Nous avons alors décidé de provoquer cette connexion dès lors que la géométrie pouvait s'y prêter. Les résultats ont toujours été à la hauteur de nos espérances. A chaque fois que la connexion était réalisée, le niveau de qualité dimensionnelle des pièces obtenues était exceptionnel.

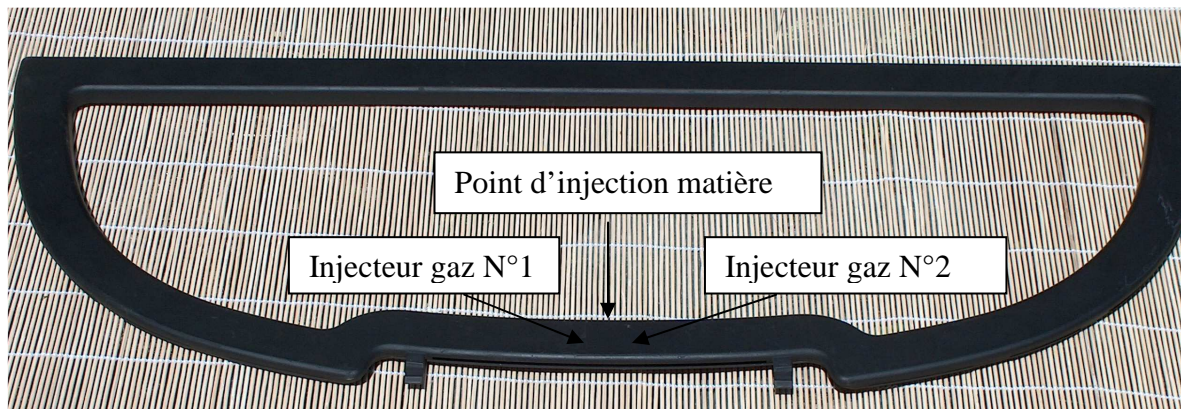
Pour illustrer notre travail, nous avons décidé de retenir quatre pièces qui sont autant de cas d'application sur lesquels nous avons pu travailler tant en rhéologie qu'en pratique sur presse à injecter.

- tablette arrière
- cadre de toit ouvrant
- insert de pare-soleil
- chaise

D'autres exemples de réalisation de pièces en injection assistée par gaz avec connexion de bulles sont présentés en annexe.

## 5.2 Tablette arrière de l'Audi TT

### 5.2.1 Présentation de la pièce



**Figure 51:** Tablette arrière de l'AUDI TT

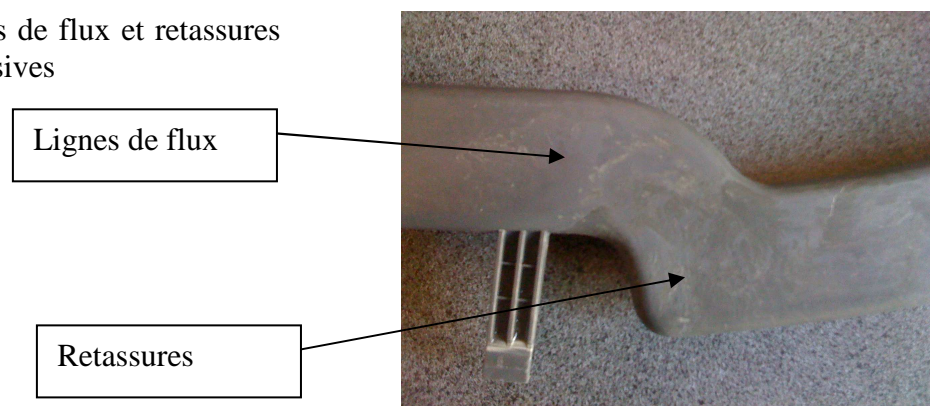
Notre travail a débuté alors que le moule prototype existant équipé de masselottes ne permettait pas de produire de pièces conformes au cahier des charges. Tant l'aspect de surface que la tenue mécanique étaient des plus déplorables. Ces pièces étaient refusées par le Service Qualité AUDI avec une mise en demeure de présenter des pièces conformes dans un délai de 2 mois.

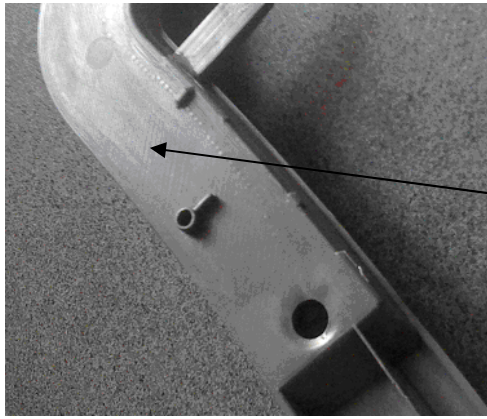
Le moule prototype est en aluminium et est régulé en température avec de l'huile depuis des réchauffeurs. La presse à injecter est du type Battenfeld de 350 tonnes de force de fermeture et pour la partie injection gaz est équipée d'une électrovanne commandée à partir d'un Monomodul Battenfeld. La matière est le Bayblend T85MN de Bayer aujourd'hui Lanxess et utilisé dans le cas de calcul précédent. Le Bayblend est un mélange de 85% de polycarbonate et de 15% d'acrylonitrile-butadiène-styrène. Les données matières se trouvent en annexe.

La pièce présente les défauts suivants:

- des défauts d'aspect, lignes de flux et lignes de recollement
- des traces blanchâtres en surface
- faible rigidité.
- retassures localisées dans les zones d'amas matière

**Figure 52 :** Lignes de flux et retassures dans les zones massives





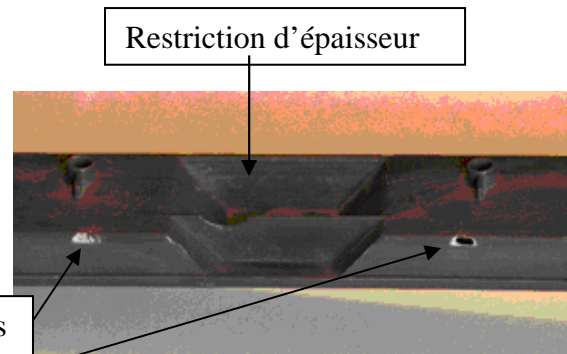
**Figure 53 :** Traces blanchâtres dues aux fuites de gaz au niveau de l'injecteur.

Fuites de gaz

Dans un premier temps notre travail d'expertise a consisté à rechercher les causes des défauts observés. Pour la partie aspect et qualité de surface, un travail en injection dynamique a permis d'améliorer sensiblement les résultats simplement en modifiant les paliers de vitesse d'injection. La matière plastique fondue injectée par un seuil en nappe de 15 mm x 1.2 mm arrivait dans une cavité de 15 mm d'épaisseur. Il en résultait un phénomène de jet libre qu'il a été possible de supprimer en diminuant les premiers paliers de vitesse d'injection.

**Figure 54:**

Les deux canaux sont séparés par une restriction et le polymère est repoussé dans deux masselottes dont on voit ici les orifices.



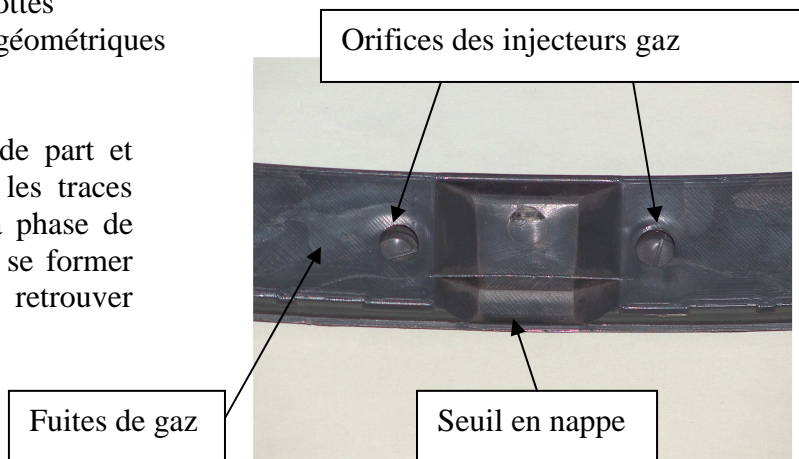
Trace du canal d'alimentation des masselottes

L'analyse des défauts nous a permis de faire très rapidement des propositions d'améliorations.

- modification des conditions d'injection dynamique
- suppression des fuites de gaz autour des injecteurs
- suppression de la restriction entre les deux masselottes
- suppression des masselottes
- diverses modifications géométriques

**Figure 55:**

Les deux orifices circulaires de part et d'autre de la restriction sont les traces des injecteurs gaz. Lors de la phase de remplissage, deux bulles vont se former de façon symétrique pour se retrouver face à face du côté opposé.



Pour la partie tenue mécanique, nous avons opté pour une série de modifications de la géométrie en supprimant les masselottes. Cela a permis d'obtenir une section constante pour la totalité de la pièce, tout en conservant le principe d'injection du gaz. Le gaz est injecté dans le polymère fondu par l'intermédiaire de deux injecteurs situés à proximité du seuil d'injection matière.

### **Justification des modifications**

Les défauts d'aspect proches du point d'injection ne peuvent mettre en cause le choix du procédé d'injection assistée par gaz. Seules les conditions d'injection dynamique ont fait l'objet de modifications.

Les traces blanchâtres en surface proviennent toujours de fuites de gaz autour de l'injecteur. Il a suffi de modifier l'implantation des injecteurs gaz et les noyer un peu plus dans l'épaisseur en faisant une collerette pour remédier au problème observé. La restriction entre les deux masselottes (fig. 58) a été supprimée pour pouvoir augmenter la rigidité de la pièce quitte à prendre le risque de laisser un amas matière entre les deux bulles.

Les retassures observées localement ont été supprimées en positionnant des petits pavés dans les différentes zones considérées.

Très rapidement, nous avons réussi à obtenir des pièces présentables mais qui se sont avérées beaucoup trop courtes, il manquait plus de 2.5 mm par rapport à la cote nominale. Nous avons alors cherché à savoir quelles étaient les causes et quels pouvaient être les remèdes à une telle situation. Nous avons mené une campagne de mesures systématiques de toutes les pièces et avons ainsi pu suivre les phénomènes de retraits et cela bien évidemment en faisant varier les paramètres d'injection.

C'est lors de l'une de ces campagnes de mesures que nous avons obtenu un résultat spectaculaire, certaines pièces présentaient des caractéristiques d'aspect et de géométrie pratiquement parfaites. Nous avons alors découpé ces pièces et avons observé qu'à partir de deux injecteurs gaz reliés à la même entrée, nous avons obtenu l'interconnexion entre les deux bulles, ne formant plus qu'une bulle unique. Le compactage de la matière se faisait à pression parfaitement homogène dans la totalité de la pièce et cela dans toutes les directions. Nous avons réussi à supprimer le gradient de pression du compactage, gradient qui provoquait les déformations.

Il est à noter que nous avons changé de procédé d'injection assistée par gaz, d'un procédé masselottes vers un remplissage partiel. Par contre, nous avons conservé toutes les conditions d'injection dynamique. Seuls le dernier palier de vitesse et la phase de compactage ont été supprimés.

Nous avons alors commencé à travailler sur le dimensionnel de la pièce et avons observé que certains paramètres n'avaient réellement aucune influence sur la géométrie. Nous avons ainsi montré que le premier palier de pression de gaz a une influence directe sur les dimensions finales de la pièce. Cela revient à dire que le gaz sous pression étire plus ou moins les chaînes moléculaires du polymère qui sont ensuite bloquées lors de la phase de refroidissement. Ainsi, nous avons pu obtenir des pièces dans un intervalle de tolérance de

presque 2 mm simplement en modifiant la pression d'injection du gaz. Le travail effectué en collaboration avec le mouliste et avec le fournisseur matière a montré que les coefficients de retraits appliqués étaient corrects par rapport aux préconisations. Il semblerait que ces coefficients ne soient pas applicables pour le procédé d'injection assistée par gaz.

Le moule série en acier a ensuite été réalisé en tenant compte des coefficients de retraits calculés à partir des résultats obtenus sur le moule prototype en aluminium.

Les conditions d'injection retenues :

- injection dynamique 7 s avec différents paliers
- début injection du gaz 5.8 s
- pression d'injection du gaz 90 bar
- température matière 275°C
- température moule 70°C
- temps de cycle 120 s
- durée d'injection du gaz 90 s

Avec ces conditions d'injection, il a été possible d'obtenir des pièces parfaitement évidées avec une connexion des bulles parfaitement reproductible. La connexion est possible en diminuant la quantité de polymère injectée. Dans un premier temps, il subsiste un amas matière qui diminue en même temps que le dosage.

Sur la figure ci-dessous, on voit une section de la pièce dans la zone de connexion. Sur la photo du haut, l'amas matière est très faible, une diminution très faible du dosage (1 mm de course) a permis de le supprimer entièrement.



**Figure 56:** Sections dans la zone de connexion

En remplissage partiel, la longueur des bulles est fonction du dosage, en optimisant la quantité de matière injectée, on arrive à supprimer l'amas matière entre les deux bulles.

Les deux sections du bas sont identiques mais inversées et permettent de constater que les deux bulles ne sont pas identiques alors que la pression d'entrée est la même. On observe également un amas matière entre les deux bulles, amas provenant d'un dosage inadapté.

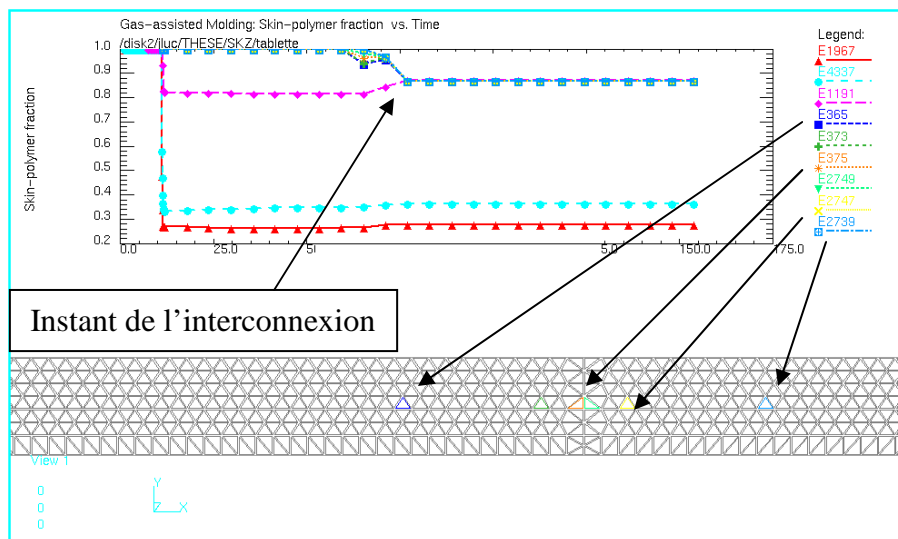
En baissant le dosage, nous pouvons donc réduire cet amas (section du haut) ; et lorsque le dosage est optimal, l'amas a disparu.



**Figure 57:** Le gaz prend toujours le chemin le plus\_court

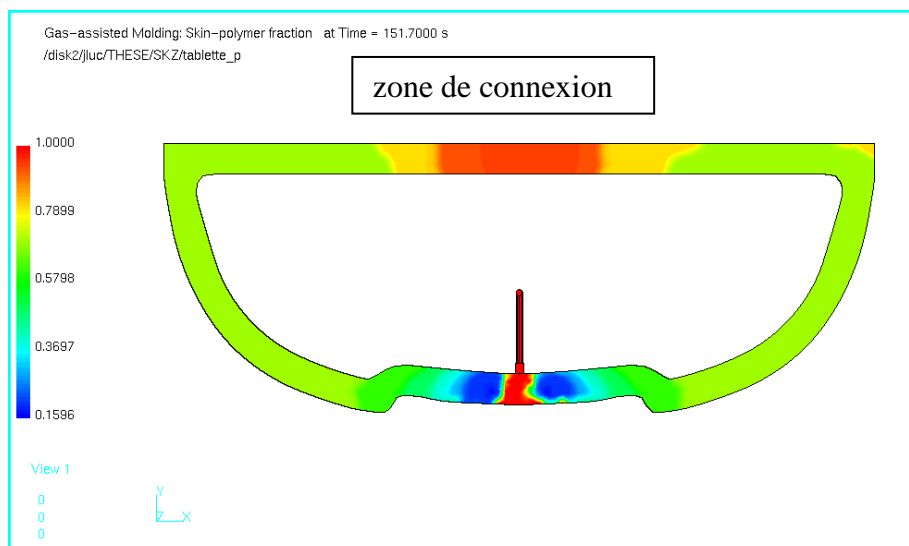
Comme le gaz ne repousse que le polymère fondu, la bulle opte toujours pour le parcours de moindre résistance pour se diriger vers la zone non remplie qui est à la pression atmosphérique. Au fur et à mesure de l'avancée de la bulle, la quantité de polymère diminuant, la bulle aura une très nette tendance à accélérer. En pratique, maîtriser l'avancée de la bulle de gaz est illusoire tellement elle est rapide.

## 5.2.2 Approche numérique



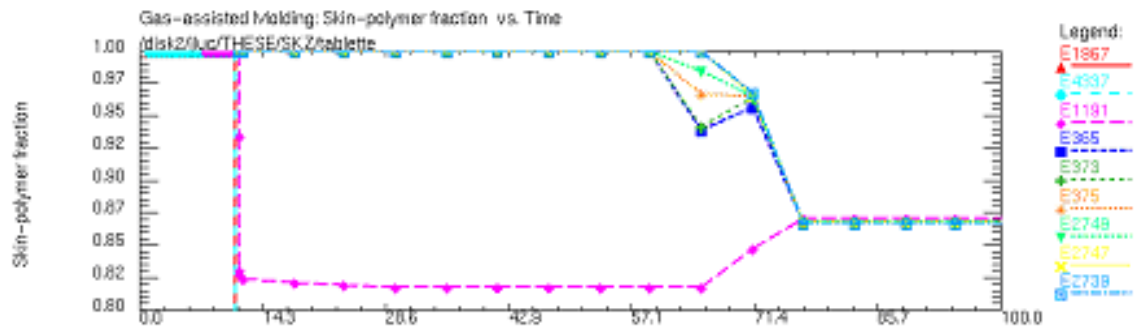
**Figure 58:** Présence de gaz

Nous avons visualisé ci-dessus l'épaisseur de paroi calculée par C-Mold. Les deux courbes du bas montrent le pourcentage de matière dans des zones proches du point d'injection matière et de façon symétrique par rapport à l'axe de la pièce. Toutes les courbes du haut montrent l'évolution de la bulle de part et d'autre de la ligne de recollement. On observera qu'une fois la jonction des bulles réalisée, l'épaisseur de paroi va s'harmoniser de part et d'autre. **En pratique sur cette pièce, il est impossible d'observer la zone de rencontre des deux bulles.**



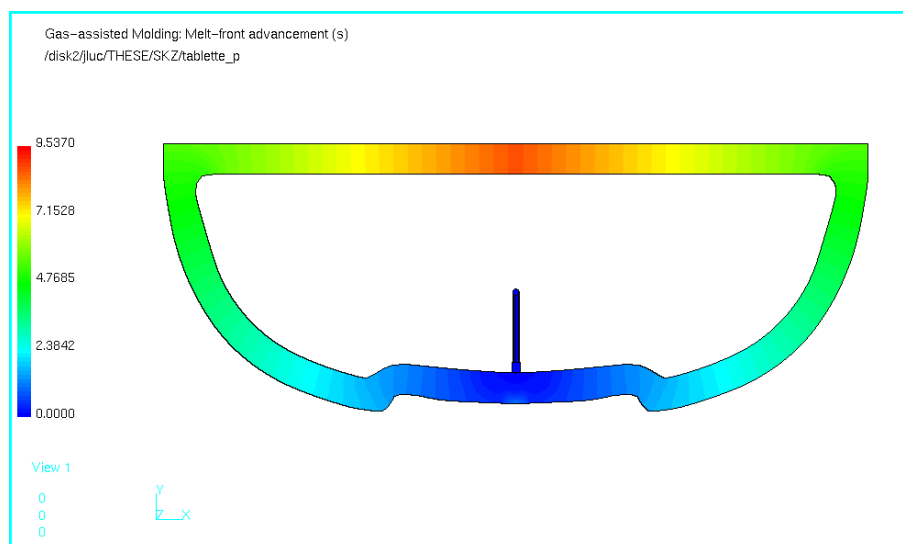
**Figure 59:** Présence de gaz

En rouge, nous avons 100% de polymère, les autres couleurs montrent le pourcentage de gaz dans l'épaisseur. Dans la très grande majorité de la pièce, la bulle occupe plus de 50% de l'épaisseur soit plus de 8 mm. On observera que dans la zone de recollement l'épaisseur augmente de façon importante, en effet dans cette zone les deux bulles n'avancent l'une vers l'autre que sous le phénomène de retrait du polymère. Une fois la jonction réalisée, le champ de pression va s'homogénéiser dans toute la pièce.



**Figure 60:** Présence de gaz

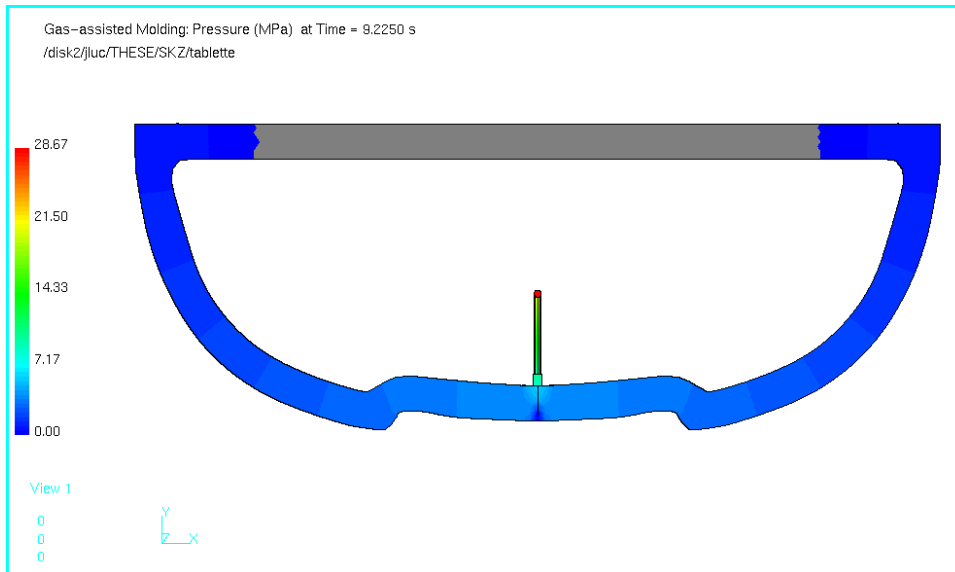
Les courbes d'évolution du pourcentage de polymère montrent très nettement ce phénomène de lissage de l'épaisseur vers 73 secondes de cycle c'est à dire pendant la phase de refroidissement de la matière. L'épaisseur de la pièce étant de 15 mm, il subsiste suffisamment de chaleur à cœur pour permettre de faibles déplacements de matière. Ces déplacements sont suffisamment lents mais permettent néanmoins l'harmonisation de l'épaisseur.



**Figure 61:** Isochrones de remplissage

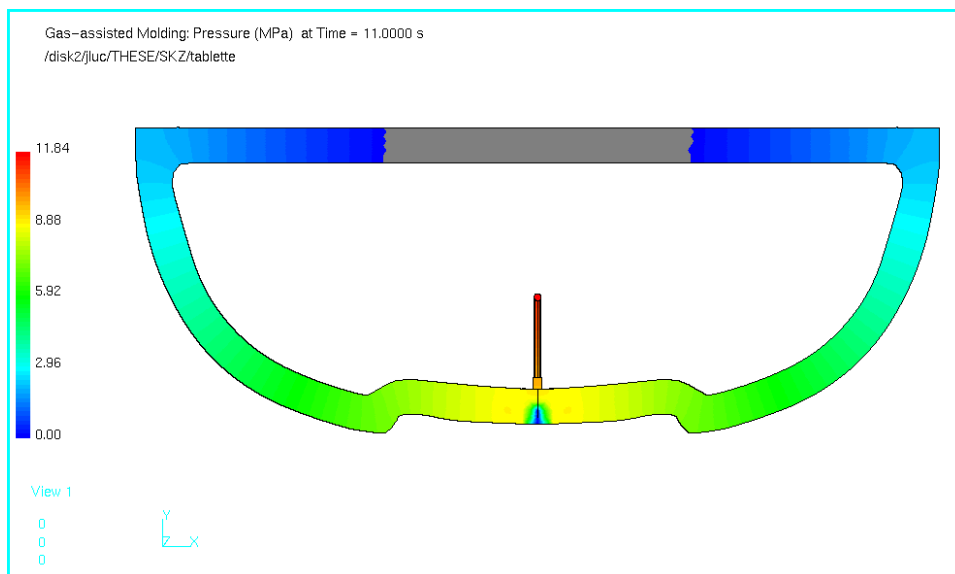
Cette figure montre l'avancée du front matière dans le temps. On observera que ce front ne subit aucune accélération violente et la ligne de soudure des deux fronts se trouve parfaitement centrée dans l'axe de symétrie de la pièce. Cela est reproductible en pratique. Par contre, en pratique le point de rencontre des deux bulles ne se trouve pas forcément dans l'axe. La vitesse de déplacement des bulles semble être un paramètre important dépendant du débit d'azote dans chaque injecteur. Même si les deux injecteurs sont alimentés par la même voie d'entrée, un écart minime de géométrie dans l'injecteur favorisera le déplacement d'une bulle par rapport à l'autre. Il semblerait, d'après la forme de la section, que la bulle la plus rapide retapisse l'intérieur. Ce point demande encore des investigations que nous n'avons pu réaliser au vu des impératifs de production.





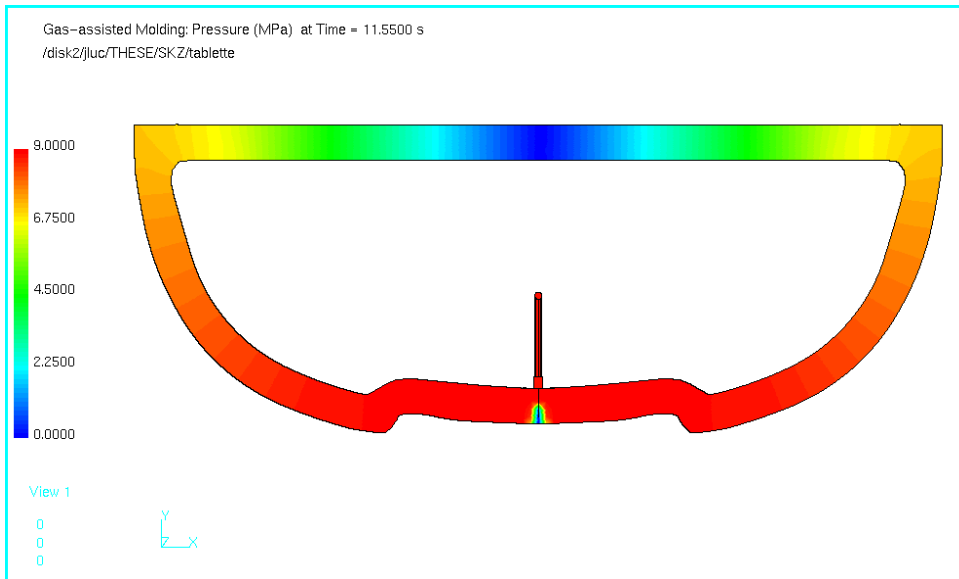
**Figure 62:** Isobares en phase d'injection dynamique

La carotte étant positionnée dans l'axe de la pièce, il est assez logique que les deux fronts matière soient eux aussi symétriques aux approximations numériques près.



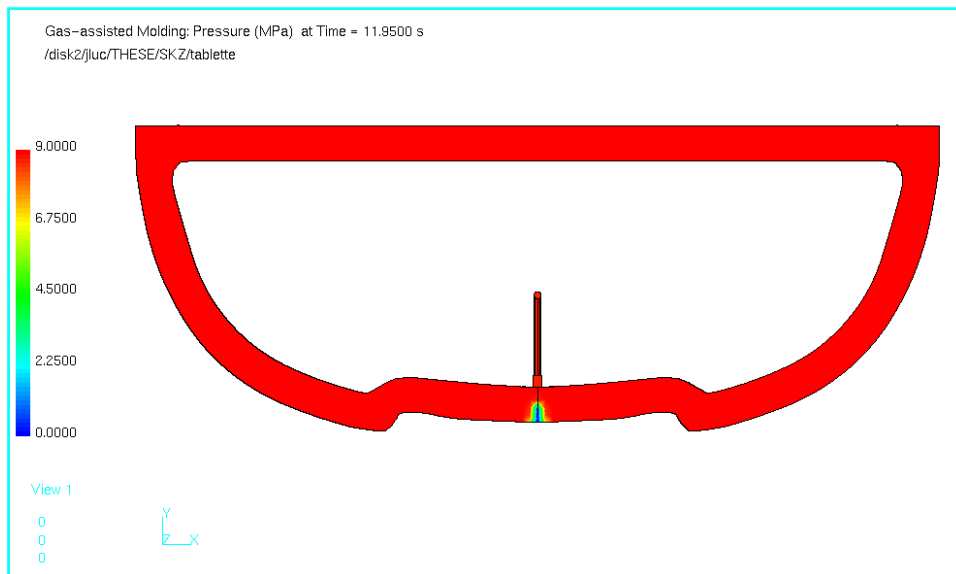
**Figure 63:** Isobares en fin d'injection dynamique

En fin d'injection dynamique, la pression appliquée à la matière par la presse à injecter décroît très rapidement, la pression d'injection du gaz prend alors le relais pour continuer à faire avancer le front matière. Le gaz ne repoussant que du polymère à l'état fondu aura une très forte tendance à faire accélérer le front matière. En effet, la résistance à l'avancement est proportionnelle à la quantité de matière à déplacer donc à la longueur d'écoulement. La matière située devant la bulle diminuant au fur et à mesure de l'avancée de la bulle, à pression d'injection de gaz constante, celle-ci aura une très forte tendance à l'accélération. En pratique, on peut appliquer soit une rampe pour la descente soit plusieurs paliers décroissants.



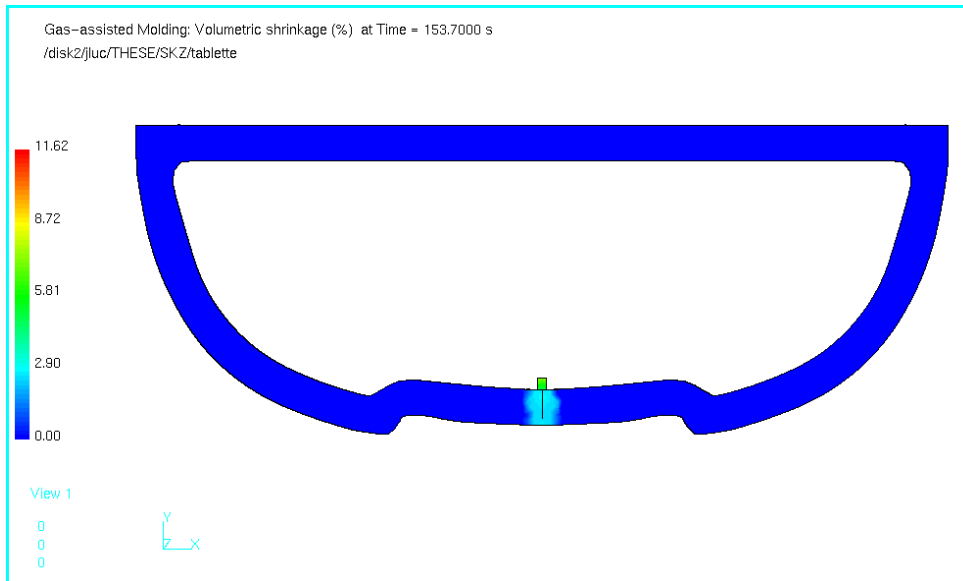
**Figure 64:** Isobares en fin de remplissage de la cavité

Visualisation du champ de pression en fin de remplissage de la cavité. On observe une perte de charge dans la cavité presque similaire à celle que l'on pourrait observer en injection classique.



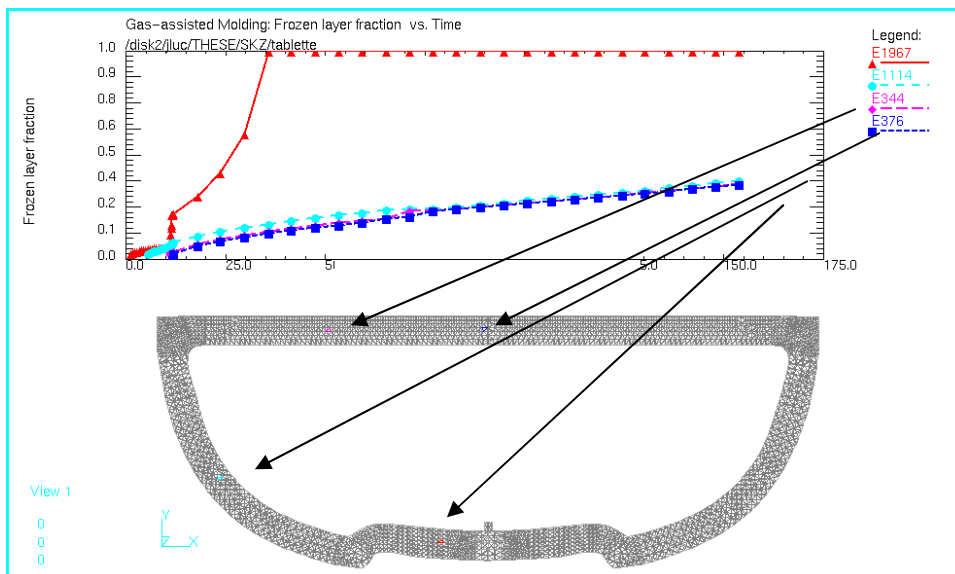
**Figure 65:** Isobares en phase de compactage

C'est le résultat le plus important à retenir, la pression de compactage est parfaitement homogène dans la totalité de la pièce ce qui aura pour conséquence une parfaite homogénéité des retraits, et cela quelle que soit l'épaisseur de la pièce. Par rapport aux courbes PVT, tous les points de la pièce suivront exactement la même courbe de refroidissement. Ce résultat ne peut être obtenu que si les bulles communiquent les unes avec les autres. Ce champ de pression permet de contrôler parfaitement le dimensionnel d'une pièce. Les dimensions de la cavité des moules sont définies en fonction des coefficients de retrait donnés par les fournisseurs de la matière. Cette étude a permis de mettre en évidence que certains phénomènes ne sont pas pris en compte dans les logiciels. Par ailleurs, en pratique, il nous a été possible d'allonger ou de raccourcir la pièce par simple modification de la pression de gaz.



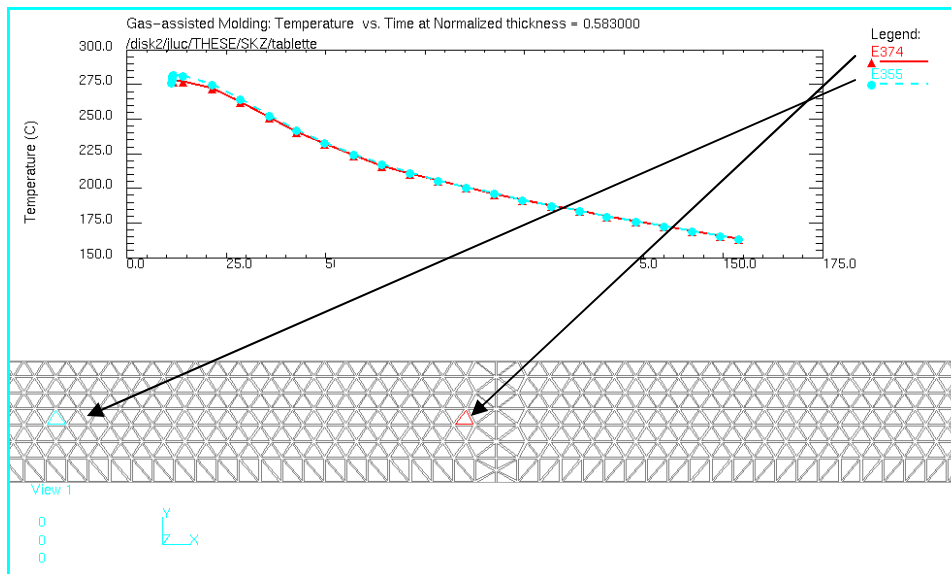
**Figure 66:** Retraits volumiques en pourcentage

Le calcul des retraits se fait à partir des courbes PVT, et on obtient dans cette configuration de calcul un retrait nul dans la totalité de la pièce. En pratique, nous n'avons évidemment pas pu retrouver ce résultat qui sera détaillé plus loin.



**Figure 67:** Fraction solide

Ce résultat montre la lente solidification de la matière dans la pièce. La courbe rouge montrant que dans la partie proche du point d'injection, la matière est solide après 35 secondes de cycle alors que dans la zone de recollement des fronts, après 150 secondes il subsiste toujours du polymère fondu à cœur. Ce résultat a été contredit par la pratique. Dès l'ouverture du moule, nous avons sectionné une pièce dans la partie rectiligne et vérifié que le polymère était parfaitement solidifié après 140 secondes. Même si les outils de simulation deviennent de plus en plus perfectionnés, reproduire en théorie des cas particuliers semble encore difficile. Cet écart et ce cas d'application avaient été signalés à AC Technology qui avait par la suite observé une faiblesse thermique du logiciel en version gaz.



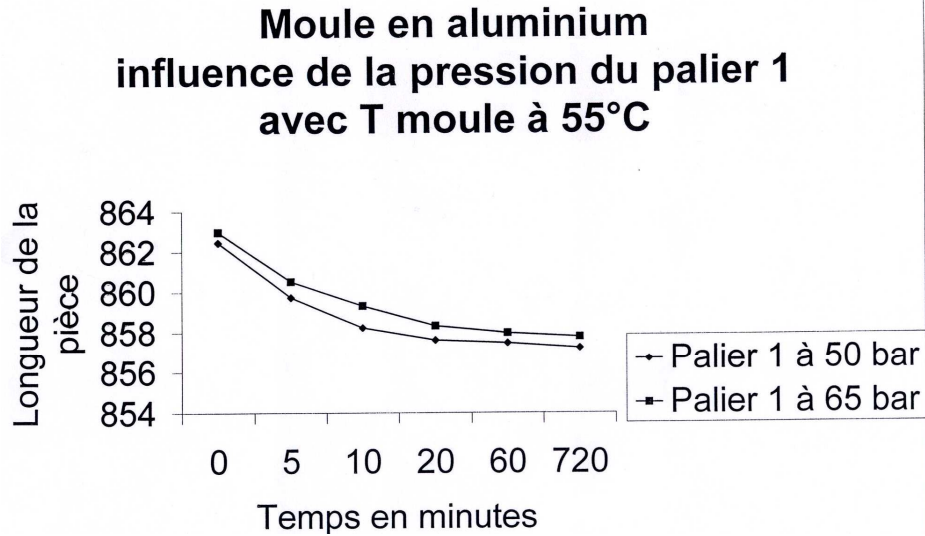
**Figure 68:** Evolution de la température

Cette courbe se trouve dans toute la littérature relative à l'injection des matières plastiques et montre le lent refroidissement des matières plastiques dans le temps, phénomène dû aux piètres caractéristiques thermiques des polymères. On observe donc que la matière reste très chaude même après plus de 150 secondes de cycle. Nous avons tenu à donner ce résultat bien que l'on sache qu'il est la conséquence du problème signalé précédemment.

### 5.2.3 Résultats pratiques

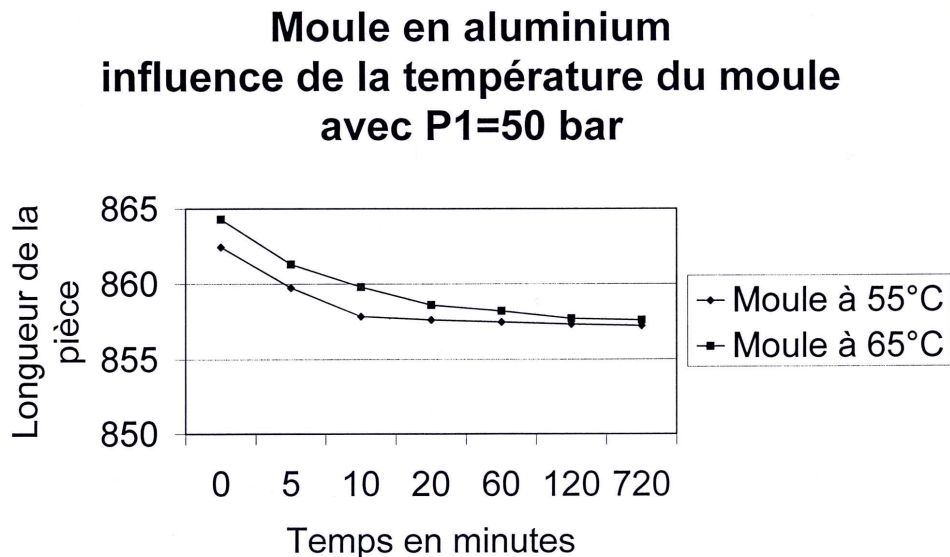
Pour remettre cette étude dans son contexte, nous avons travaillé dans l'urgence avec un moule prototype en aluminium. Celui-ci avait été réalisé en prenant un retrait de 0.6% valeur basse des données du fournisseur. Malheureusement ce moule n'a pas permis d'obtenir des pièces au dimensionnel souhaité à savoir 854,6 mm avec un intervalle de tolérance de +/- 0.5 mm. Toutes les pièces étaient beaucoup trop courtes, il manquait plus d'un millimètre.

Sans faire de plan d'expérience digne de ce vocable, nous avons essayé de déterminer le paramètre prépondérant sur le dimensionnel de la pièce. Pour cela nous avons procédé à différents essais en modifiant différents paramètres tant d'injection matière que lors de la phase d'injection du gaz. Nous avons conservé pour tous ces essais les mêmes conditions d'injection dynamique. La procédure de mesure consistait dès la sortie du moule à mesurer la longueur de la pièce à l'aide d'un pied à coulisse, de la répertorier puis de refaire la mesure après 5 minutes puis 10 minutes et jusqu'à 12 heures après le démoulage. Sommairement, le coefficient de retrait appliqué n'était donc pas correct. Afin de pouvoir réaliser la cavité du moule série avec le minimum d'erreur nous avons recalculé le coefficient de retrait à partir de nos mesures.



**Figure 69:** Longueur de la pièce en mm en fonction de la pression d’injection du gaz

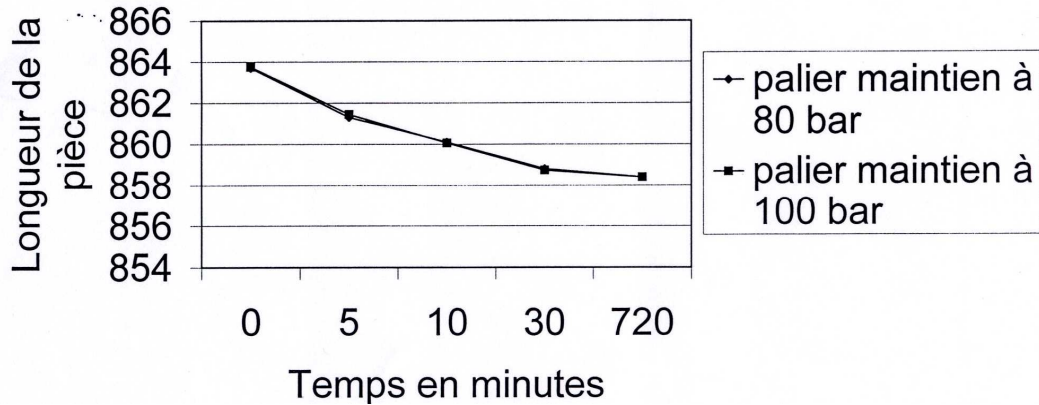
Ce premier résultat montre que le premier palier de pression a pour effet de donner le dimensionnel, l’écart dimensionnel ne varie pas dans le temps entre les deux niveaux de pression testés. Cela revient à dire que la valeur absolue du retrait est à peu près identique quelle que soit la pression d’injection de départ. C’est donc le point de départ qui permettra ou non d’atteindre le dimensionnel voulu. Afin de vérifier l’influence des autres paramètres, nous avons également fait varier la température de moule, le niveau de pression du deuxième palier gaz et enfin la durée du maintien en pression.



**Figure 70:** Longueur de la pièce en mm en fonction de la température du moule

Dans cette deuxième série de mesures, nous avons dans un premier temps régulé le moule à 55°C. Nous n’avons commencé les mesures qu’après deux heures de production (pièces de démonstration). Après avoir réalisé les mesures, nous avons augmenté la température de régulation et attendu deux heures supplémentaires avant d’effectuer la deuxième série de mesures. On observera que l’écart après 12 heures est quasi négligeable, donc que ce paramètre ne semble pas être prépondérant dans l’observation du phénomène de retrait.

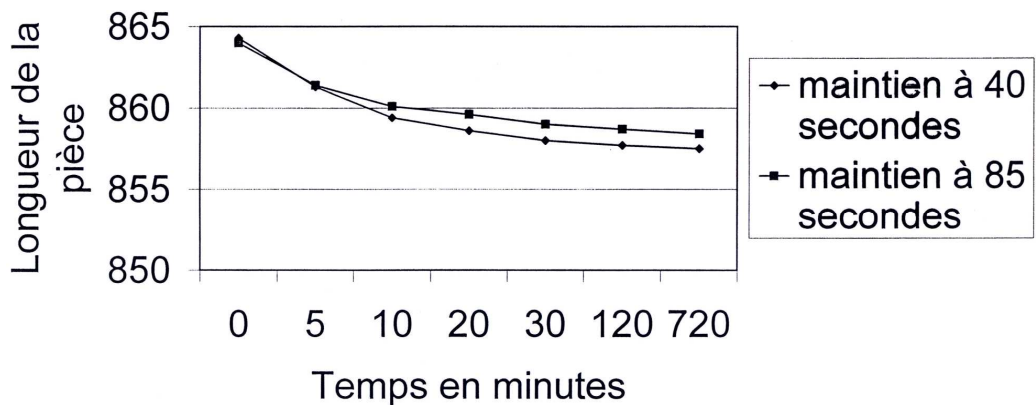
## Moule en aluminium influence du niveau de pression en maintien du palier 2



**Figure 71:** Longueur de la pièce en mm en fonction de la pression de maintien

Cet essai montre que le deuxième palier de pression d'injection du gaz n'a aucune influence sur le dimensionnel de la pièce. La seule différence sensible sera la consommation d'azote qui est directement liée au niveau de pression. A part cette observation triviale, il faut conclure de cet essai qu'une fois la peau de la pièce refroidie, il sera impossible de modifier la longueur de la pièce.

## Moule en aluminium influence de la durée du maintien en gaz pour le palier 3



**Figure 72:** Longueur de la pièce en mm en fonction de la durée de la phase de maintien

On observe sur ce résultat de mesures que le dimensionnel de départ est identique mais qu'à l'arrivée il diffère sensiblement en fonction de la durée du maintien du gaz dans la pièce. Il est logique qu'avec une durée de maintien courte, la matière puisse continuer à se rétracter par rapport à un maintien long. Cela met en évidence l'importance des phénomènes thermiques sur le retrait du polymère.

## 5.2.4 Analyse des différents résultats

Le moule et la pièce ayant été réalisés bien avant l'étude théorique, nous avons obtenu en pratique des résultats qui étaient en contradiction totale avec toute la littérature existant sur l'injection assistée par gaz. En effet, nous avons obtenu la connexion de deux bulles de gaz générées chacune par un injecteur gaz indépendant.

Dès ce résultat pratique obtenu, nous avons essayé de reproduire ce résultat avec le logiciel C-Mold. Sans difficulté particulière, nous avons réussi à reproduire cette connexion sur bien d'autres pièces depuis. Cependant, il a fallu analyser très finement les résultats pour la détecter et essayer de l'expliquer.

Il semblerait qu'en pratique cette connexion se fasse beaucoup plus rapidement que dans l'étude théorique. Dans l'étude avec C-Mold, nous avons observé que la connexion s'opère après plus de 70 secondes. En pratique, nous n'avons pas eu l'opportunité d'équiper le moule pour observer le phénomène. Une méthode par détection ultra-sonique a été industrialisée chez Volkswagen sur une pédale d'embrayage. Il semblerait que cette méthode donne le maximum de garanties par rapport au but recherché.

Comme dans une première étape, nous avons travaillé avec un moule prototype en aluminium, nous avons eu l'opportunité d'évaluer le retrait. Nous avons effectué les mesures en ne modifiant que très peu les paramètres de mise en œuvre, le but premier était toujours de livrer des pièces au client. Cependant, nous avons pu vérifier que même des faibles variations avaient des conséquences sur le dimensionnel de la pièce mais jamais sur le phénomène de connexion.

Les résultats de mesures en pratique ont montré un coefficient de retrait recalculé de 0.9%. Au niveau théorique, les différents résultats montrent que les phénomènes d'écoulement deviennent négligeables dès lors que la cavité est remplie et que les phénomènes de thermique et de thermodynamique deviennent prépondérants.

Le fait que l'on puisse «étirer» la pièce en augmentant le niveau de pression semble indiquer que d'autres phénomènes à découvrir doivent être pris en compte dans les outils de simulation.

Par ailleurs, on constate également que seule la pression d'injection du gaz pourra avoir une certaine influence sur le dimensionnel de la pièce et donc sur le retrait de la matière. On pouvait imaginer que la température de moule, pouvait elle aussi influencer le résultat comme en injection classique mais le contraire a été montré.

### 5.3. Insert de pare-soleil BMW

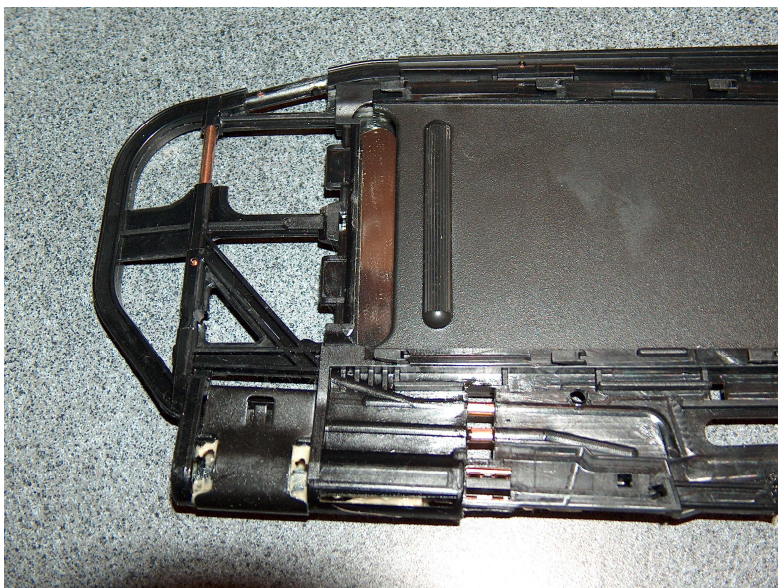
#### 5.3.1 Mise en situation

Jusqu'à peu de temps un pare-soleil était composé de deux demi-coquilles assemblées et emprisonnant des fonctions techniques comme un miroir éclairant ou non. Ces deux demi-coquilles étaient ensuite emballées avec un film PVC assurant l'esthétique. Une autre technologie consistait à faire un insert technique ou une armature donnant la rigidité voulue et à le noyer dans deux demi-coques de PP expansé.

Cette armature est composée d'un fil d'acier formé sur lequel on surmoule un PA 6-6 30%FV. Cette opération de surmoulage ne permet pas une production parfaitement reproductible car dépendant du positionnement du fil dans le moule avant l'opération d'injection. Ces minimes écarts de position ont pour conséquence une modification de la section de passage d'un côté ou de l'autre. Ce phénomène de dissymétrie est alors encore accentué par la pression d'injection de la matière laissant d'un côté du fil un amas matière et de l'autre une très faible quantité de polymère. Avec les conditions de refroidissement cela induit inmanquablement des déformations de l'insert.



**Figure 73:** Insert avec renfort de fil métallique



**Figure 74:** Détail du renfort

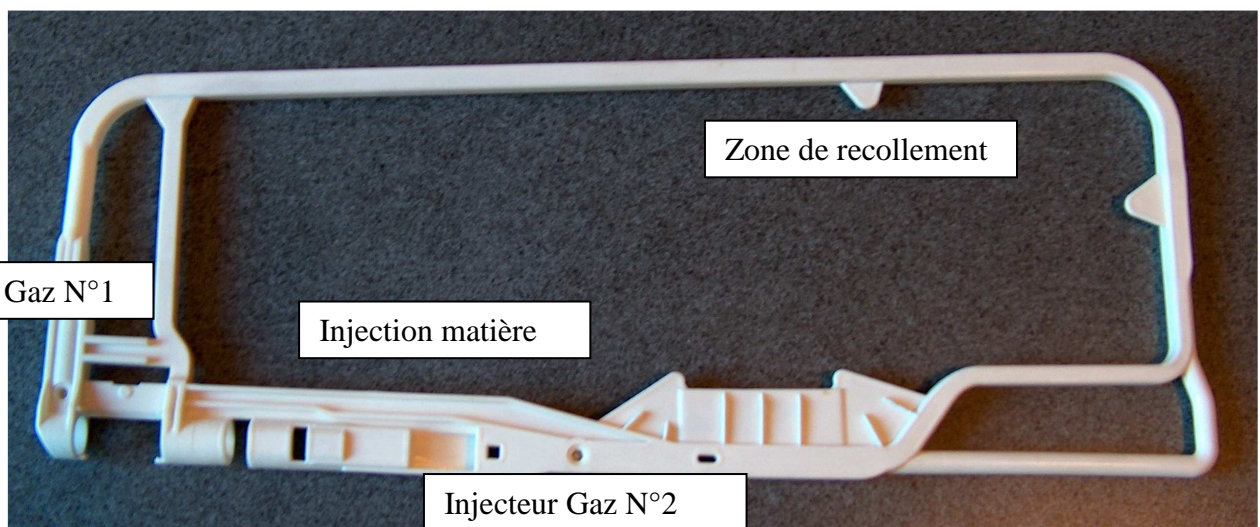


Après avoir mis en évidence toutes ces difficultés, nous avons proposé de conserver la géométrie de la cavité de l'insert mais en place du fil métallique, nous avons imaginé d'injecter du gaz dans la section laissée libre par l'absence du fil.



**Figure 75:** Armature du pare-soleil BMW

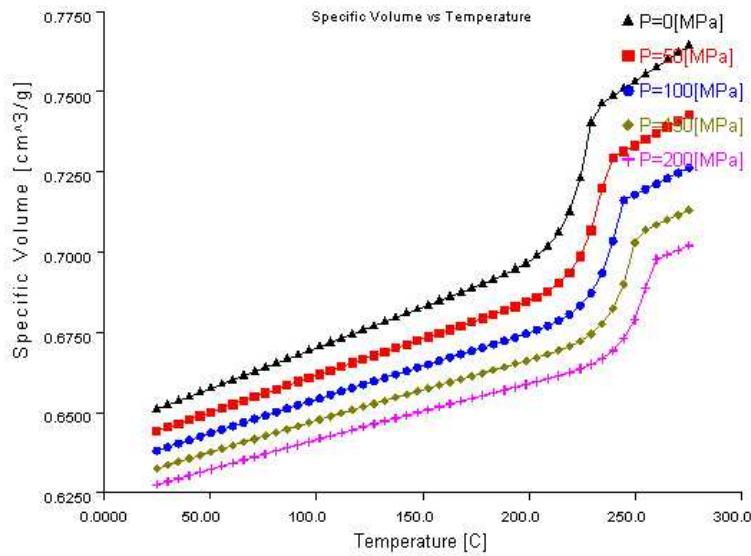
Dans la version classique de l'armature, on observe sur cette pièce provenant d'un premier essai d'injection, de fortes déformations dues essentiellement à un champ de pression déséquilibré de part et d'autre du fil métallique



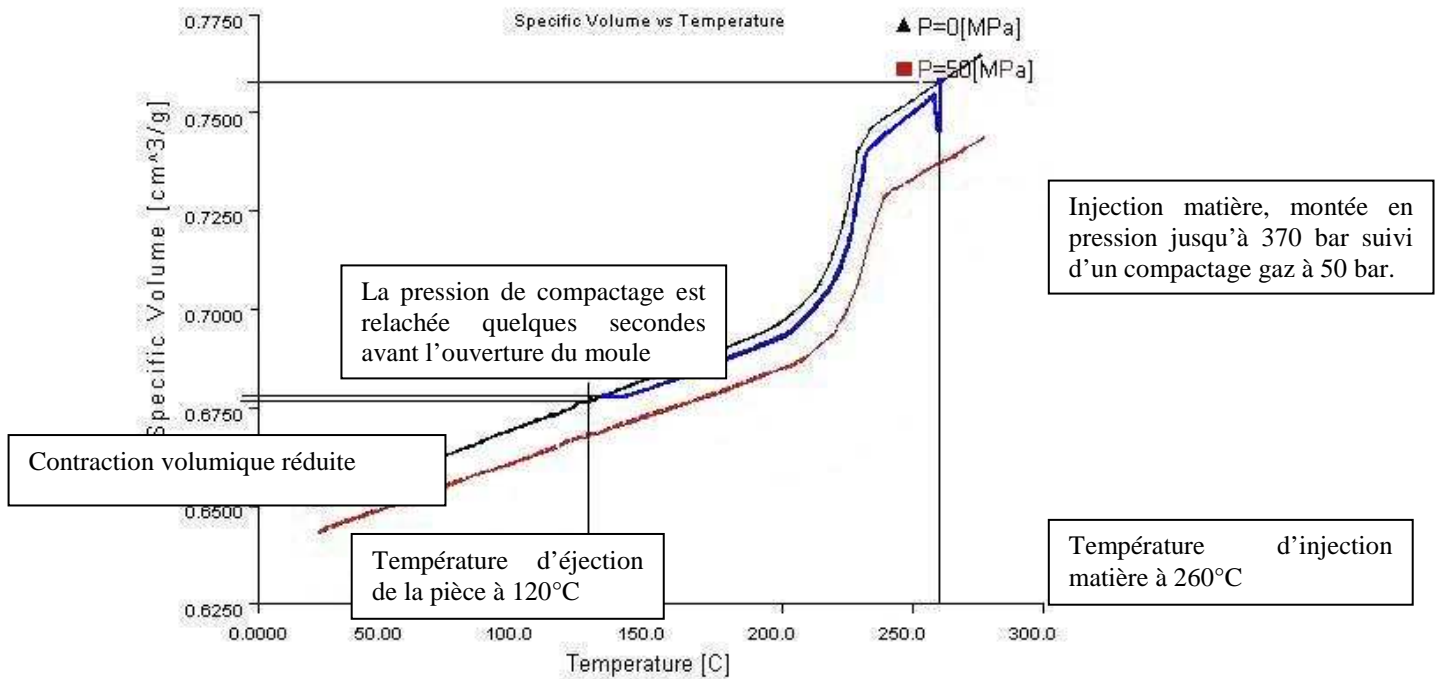
**Figure 76:** Armature du pare-soleil BMW version guidage

Cette pièce est produite en PBT 30%FV. L'injection est réalisée à partir d'une carotte froide située dans la zone de faible épaisseur de la pièce. Nous avons positionné un injecteur gaz à chaque extrémité de la veine. De cette façon, nous avons provoqué le recollement des deux fronts matières et donc des deux bulles dans la zone de la veine. Cette pièce provient du premier essai en injection assistée par gaz de ce moule. On remarquera bien évidemment que la pièce est moins déformée qu'avec la version classique avec fil métallique. Comme pour la tablette arrière de l'AUDI TT, ce résultat n'a été possible que par une uniformisation du champ de pression pendant la phase d'injection du gaz.

A partir des courbes PVT, nous avons reproduit le cycle d'injection pratique.



**Figure 77:** Courbes PVT extraites de la base de données Moldflow

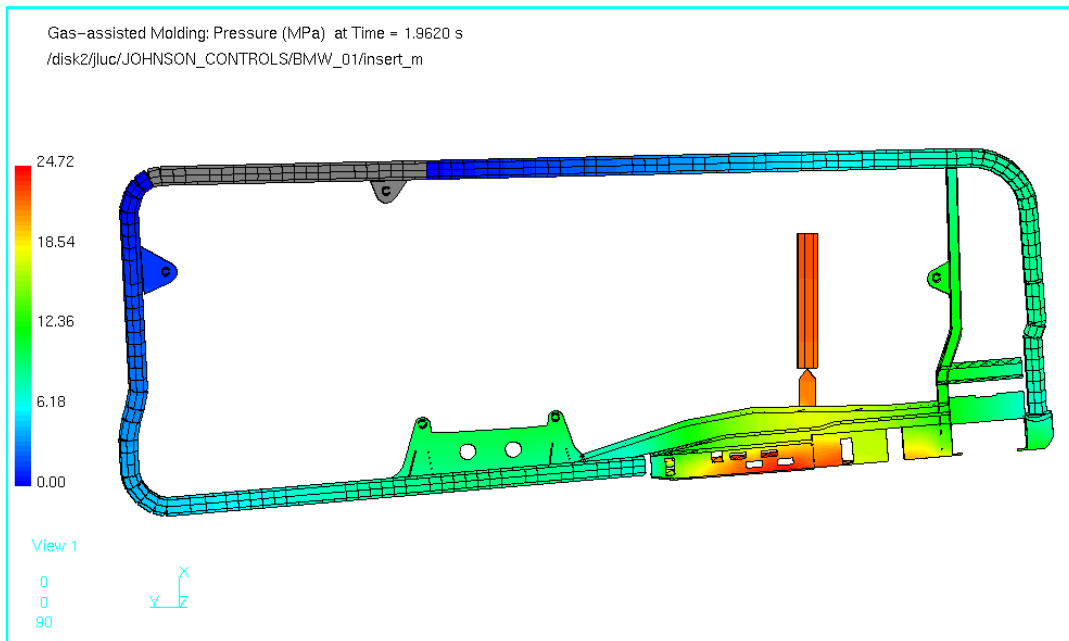


**Figure 78:** Cycle d'injection pratique appliqué sur l'armature

Le PBT étant un polymère semi-cristallin, nous avons opté pendant la phase d'essais pour une éjection à «haute température» afin de minimiser le temps de cycle. Malgré un temps de cycle très court, la pièce sort du moule parfaitement droite sans avoir été déformée par des retraits différentiels.

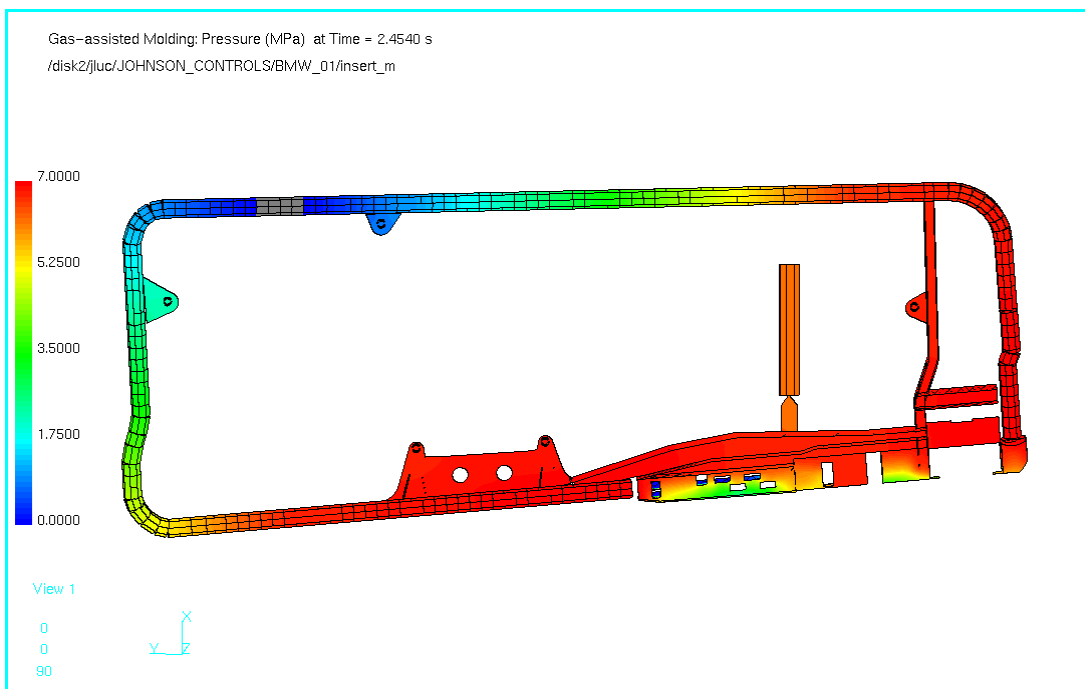
Nous avons visualisé l'état de remplissage de la cavité par différentes cartes de pression à différents pas de temps.

### 3.3.2 Analyse rhéologique



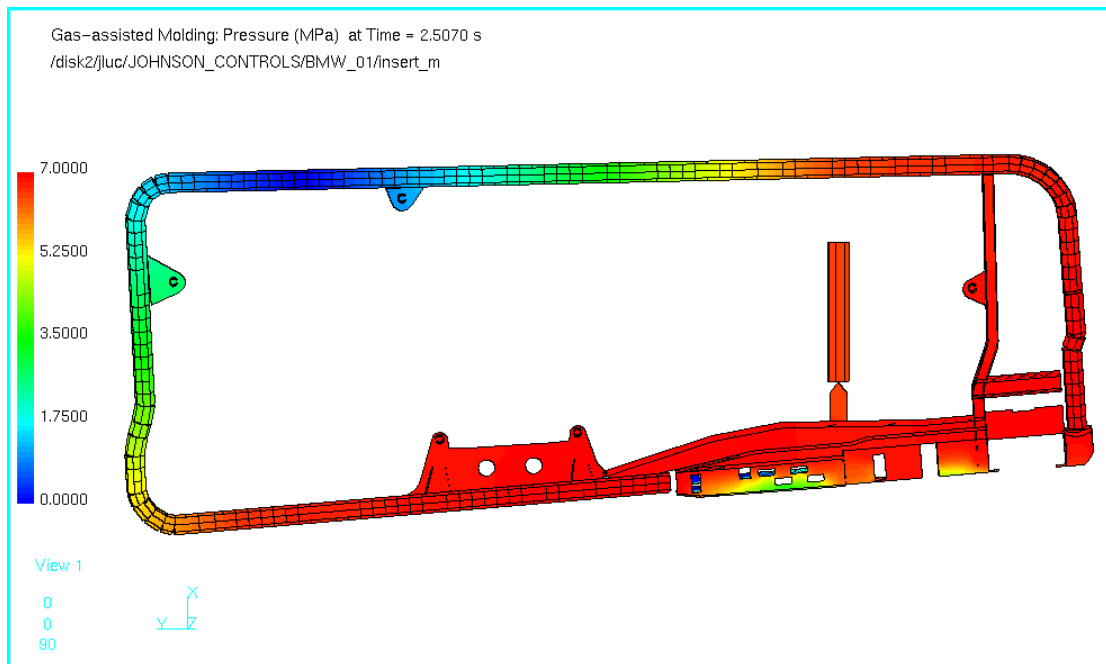
**Figure 79:** Champ de pressions en phase d'injection dynamique

Isobares en phase d'injection dynamique, une pression de 250 bar environ est appliquée à la matière. La pression maximale observée est de l'ordre de 350 bar.



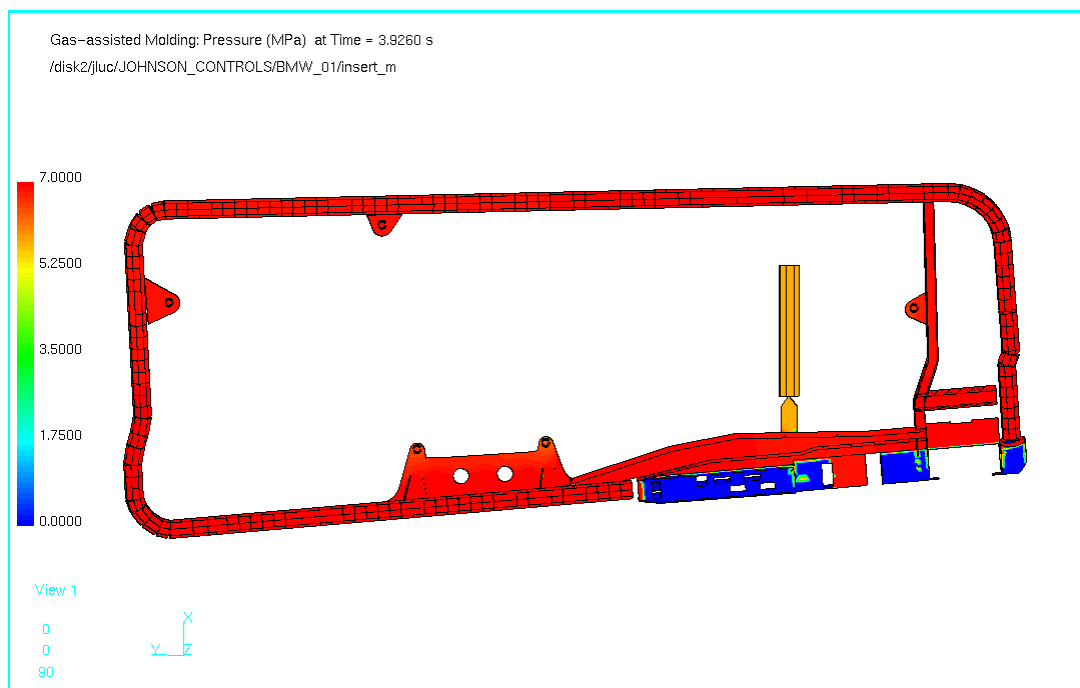
**Figure 80:** Champ de pressions en fin d'injection dynamique

Visualisation des pressions dans la cavité, le gaz ne se propageant que dans la veine fluide, se déplacera très vite. Dans ce calcul, nous avons opté pour une pression d'injection du gaz de 70 bar. Nous discuterons plus loin de l'intérêt de ce choix. On remarquera que le champ de pression commence à s'homogénéiser dans la partie basse alors que le remplissage de la cavité n'est même pas terminé.



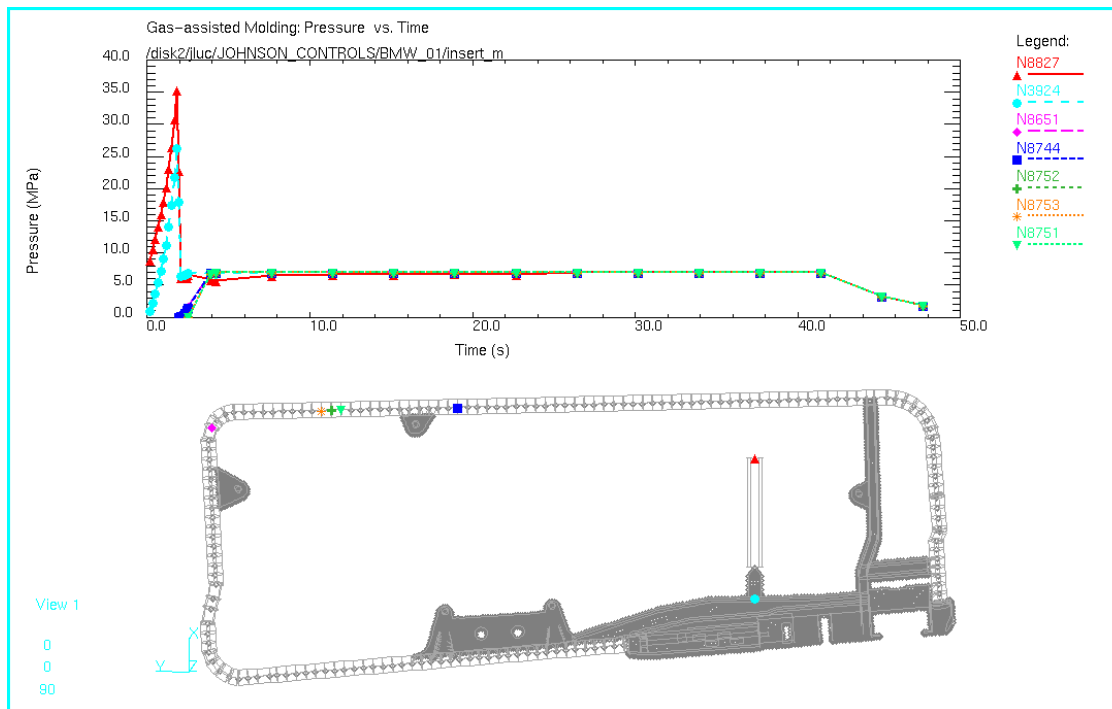
**Figure 81:** Champ de pressions en fin de remplissage de la cavité

Le remplissage de la cavité vient de se terminer et l'on observe un gradient en pression typique d'un remplissage classique. La cavité est remplie en 2.5 secondes, et la pression de 70 bars commence à s'appliquer de plus en plus dans la cavité.



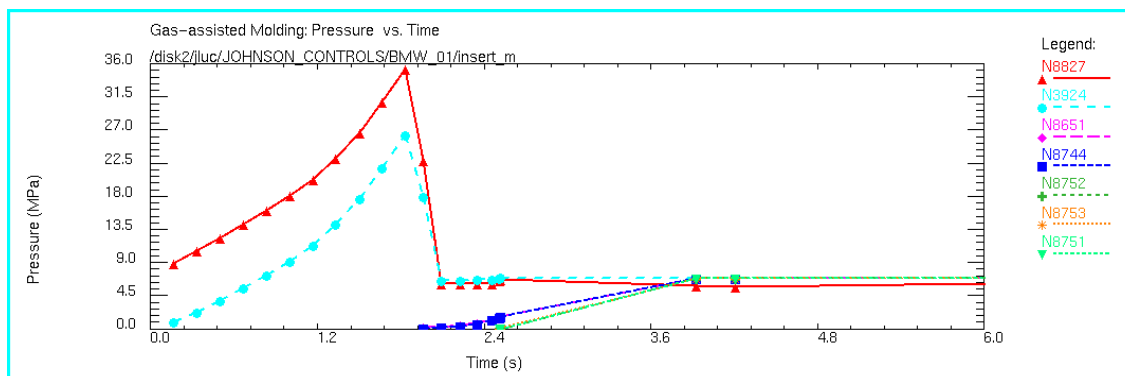
**Figure 82:** Champ de pressions en phase de compactage

Les bulles s'étant rencontrées, nous n'avons plus qu'une seule bulle dans la pièce; le gaz s'y trouvant étant à 70 bar, nous obtiendrons un compactage parfaitement homogène de la matière et cela en tout point de la pièce. Les zones en bleu, sont des zones de la pièce de faible épaisseur déjà à l'état solide.



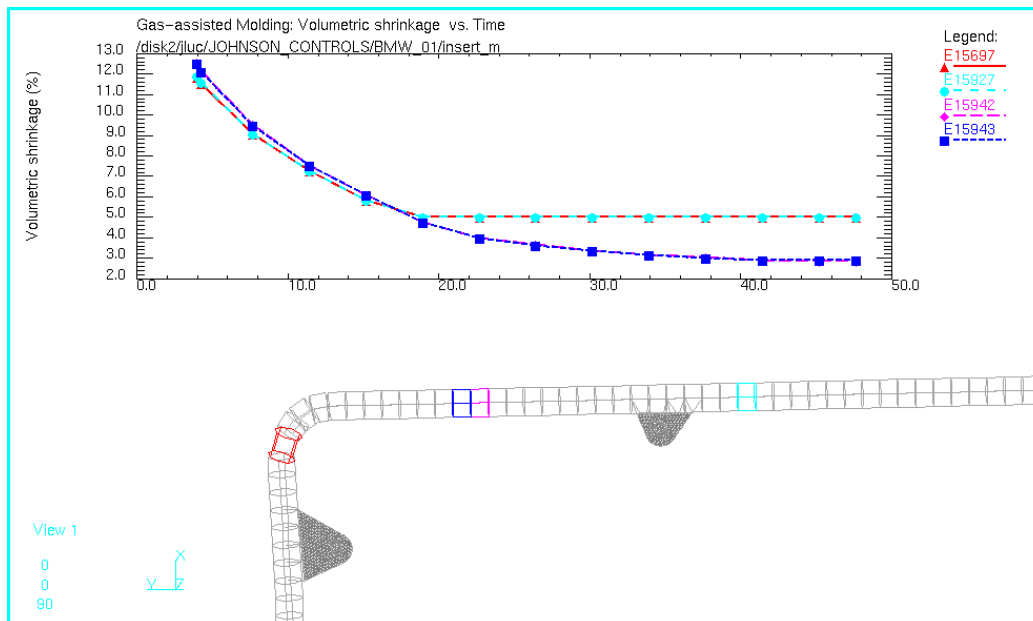
**Figure 83:** Courbes de pression en différents points de la pièce

Courbes isobares en différents points de la cavité, on observera que l'on a en tout point la même pression de compactage. Dans la zone de recollement des deux flux matière, le niveau de pression est atteint plus tard mais se stabilise dès la connexion réalisée.



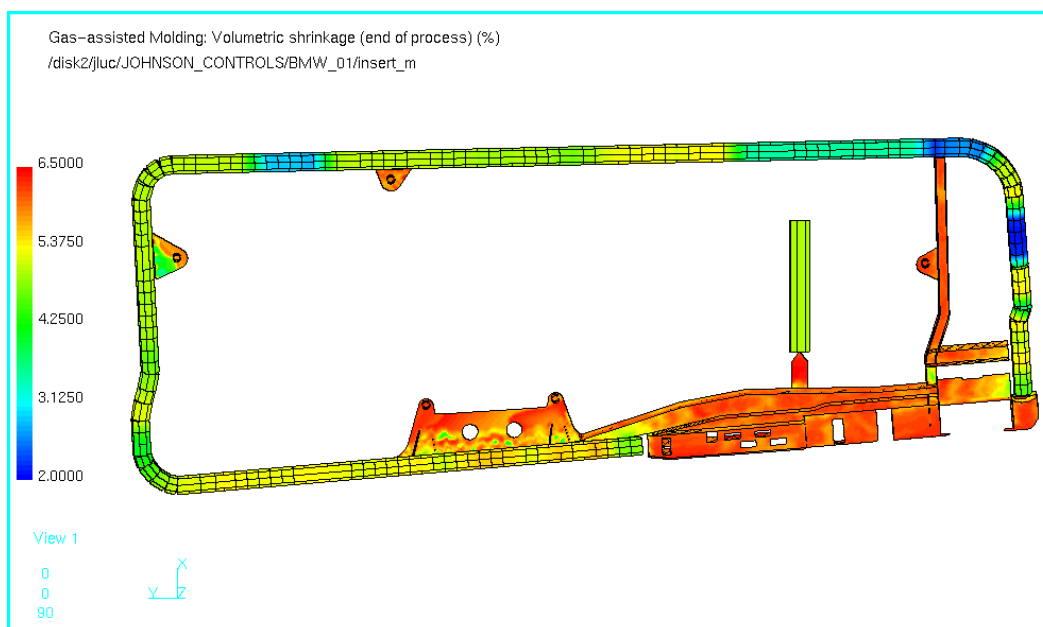
**Figure 84:** Courbes isobares lors de la commutation.

Afin d'obtenir un aspect de surface correct, il est indispensable que le front matière ne s'arrête pas, pour cela il faut veiller à ce qu'il subsiste pendant tout le cycle une pression appliquée à la matière. Néanmoins, on observera une chute de pression du fait que le gaz est injecté à pression beaucoup plus faible. Contrairement à l'injection classique, la matière se trouvant dans la zone remplie en dernier reste sous pression pendant toute la phase de refroidissement.



**Figure 85:** Evolution de retrait volumique dans le temps

Dans la zone de jonction des flux matière, la matière étant encore très chaude, n'a pas encore eu le temps de se rétracter, c'est pour cette raison que le retrait y est très faible. Plus on s'éloigne de la zone de jonction plus le retrait sera important. Le PBT étant un polymère cristallin, le passage sous la température de fusion est très rapide, cette vitesse de refroidissement ne sera pas sans conséquence. La veine gaz est évidée tout à fait correctement et la faible épaisseur de paroi résiduelle sera refroidie très rapidement.

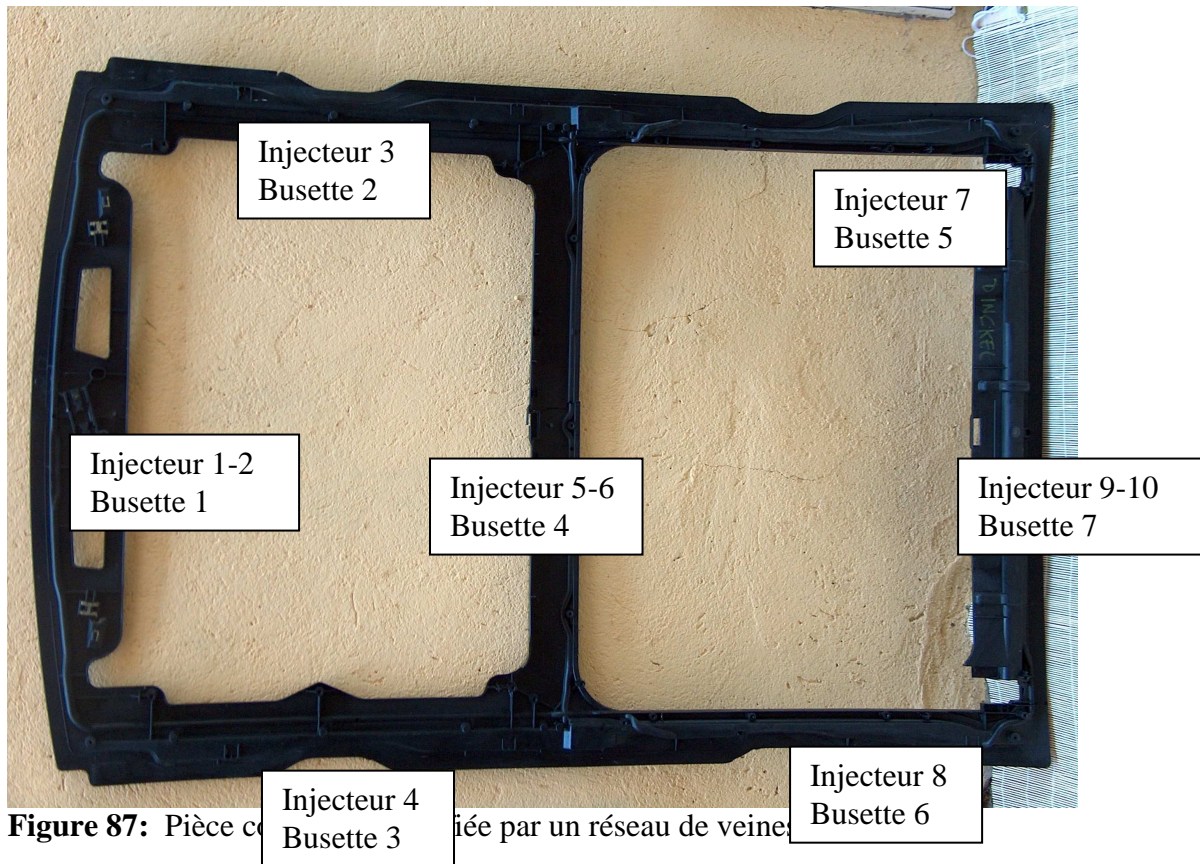


**Figure 86:** Carte des retraites volumiques

On observera que le retrait est plus élevé que pour le cas de la tablette arrière, la matière de celle-ci étant un polymère amorphe. Le compactage n'étant assuré que par l'injection du gaz, on observera que les zones de forte épaisseur seront très correctement compactées alors que les zones de faibles épaisseurs présenteront un retrait bien supérieur. La matière n'est pas étrangère à ce résultat.

## 5.4 Garnissage de toit ouvrant (Megane Scenic J84)

### 5.4.1 Mise en situation



#### But recherché:

Augmentation de la rigidité de la pièce et diminution des déformations.

#### Solution proposée

La veine gaz forme un huit et est continue sur toute la pièce. Les injecteurs ont été positionnés dans le but d'obtenir une interconnexion entre les différentes bulles et ainsi obtenir un compactage parfaitement homogène dans toute la pièce.

#### Gain réalisé

Injecter le gaz à 97% de remplissage a permis de diminuer la force de fermeture de plus de 500 tonnes (50kN) par rapport à une pièce équivalente réalisée en injection traditionnelle. Le volume occupé par le gaz représente une économie matière de l'ordre de 200 g par rapport à l'injection classique.

Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	Ultradur PBT / ASA 30% FV S4090G6
Alimentation matière	7 busettes chaudes
Injection de gaz	10 injecteurs couplés en 2 voies
Temps de cycle:	142 s
Pression de gaz:	Voie 1: 100 bar
	Voie 2: 120 bar



**Figure 88:** Section à proximité de l'injecteur gaz N°8

Cette section met en évidence l'intérêt de l'injection assistée par gaz pour assurer la phase de compactage.



**Figure 89:** Coin supérieur gauche



**Figure 90:** Coin supérieur droit



**Figure 91:** Zone centrale

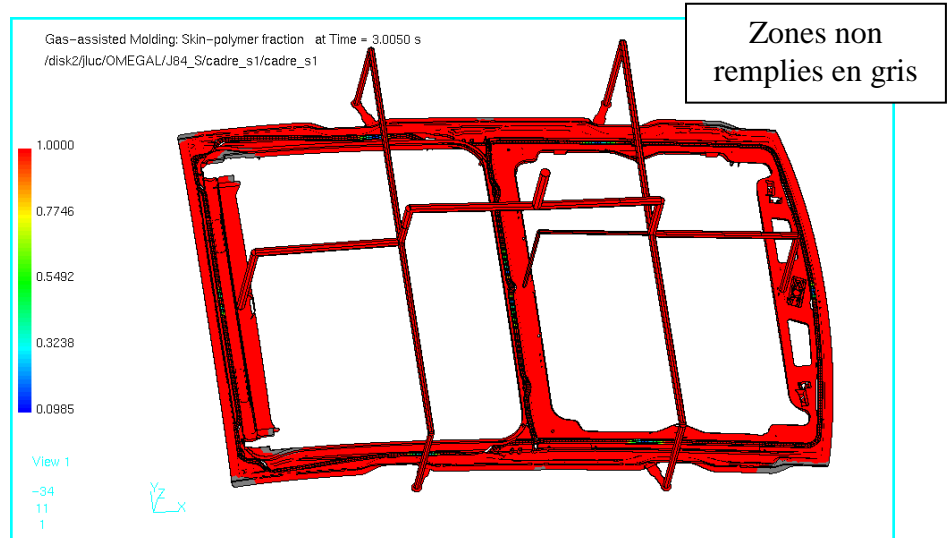


## 5.4.2 Analyse rhéologique

Dans le cas du cadre de toit J84 (nouvelle Mégane Scénic de Renault) nous avons proposé au transformateur et à son donneur d'ordre d'intégrer dans la géométrie une veine gaz formant un immense 8. Dans cette configuration, nous avons proposé une solution comportant 10 injecteurs gaz de façon à pouvoir réaliser une bulle unique dans la totalité de la pièce. L'étude théorique a montré de très bonnes chances d'obtenir le résultat escompté.

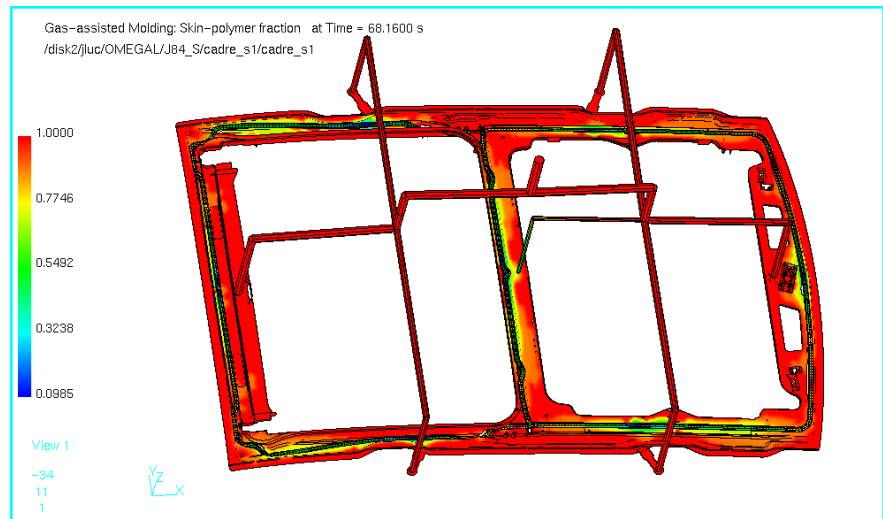
Ci dessous, nous avons visualisé avec C-Mold version 2.11 la fraction de polymère dans certaines zones du cycle de toit ouvrant. Ce résultat permet de valider le trajet de la bulle de gaz au cours du cycle.

**Figure 92:** Etat du remplissage au début de l'injection du gaz



Cette figure montre l'état de remplissage au début de l'injection du gaz, en rouge nous avons toujours 100% de polymère et les autres couleurs montrent la présence de gaz. Le gaz assurera parfaitement son rôle d'éviter les veines et repoussera le polymère fondu dans les zones non encore remplies.

**Figure 93:** Présence de gaz en fin de remplissage de la cavité

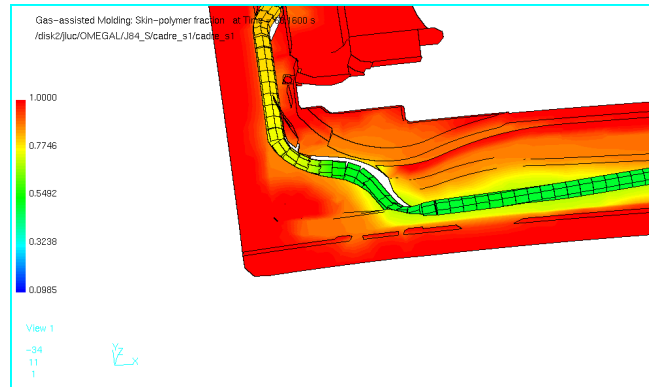


Le gaz a parfaitement rempli son rôle et s'est répandu dans toutes les veines terminant le remplissage de la cavité.

**Figure 94:**

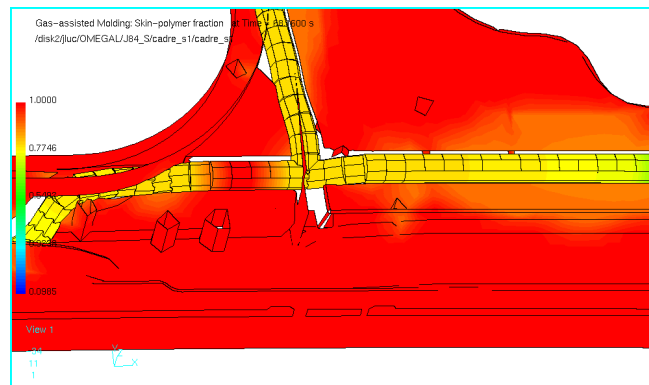
En rouge, 100% de polymère  
les autres couleurs montrent  
le pourcentage de gaz dans  
l'épaisseur ou le diamètre

Coin avant gauche



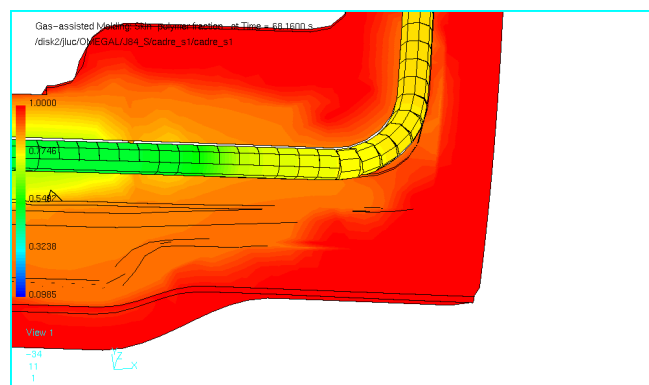
**Figure 95:**

Connexion entre la traverse  
centrale et la longueur



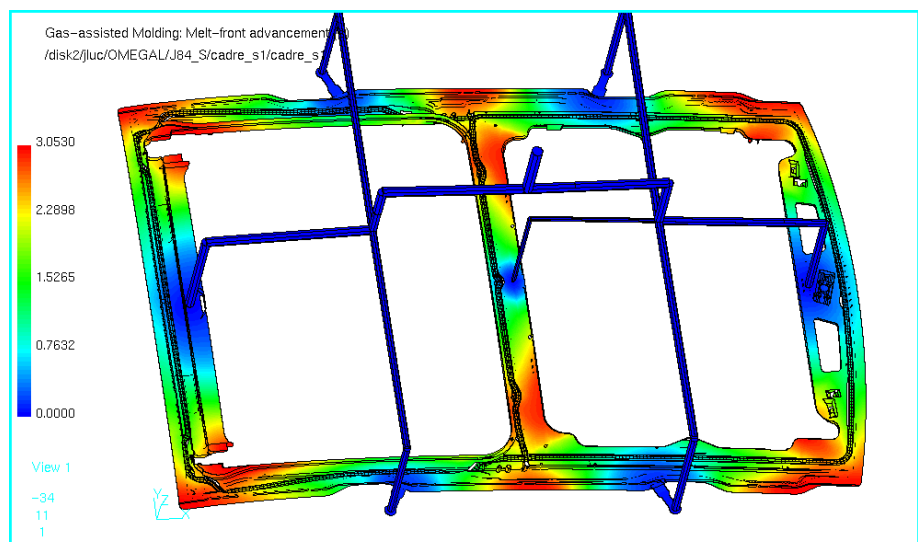
**Figure 96:**

Coin arrière gauche

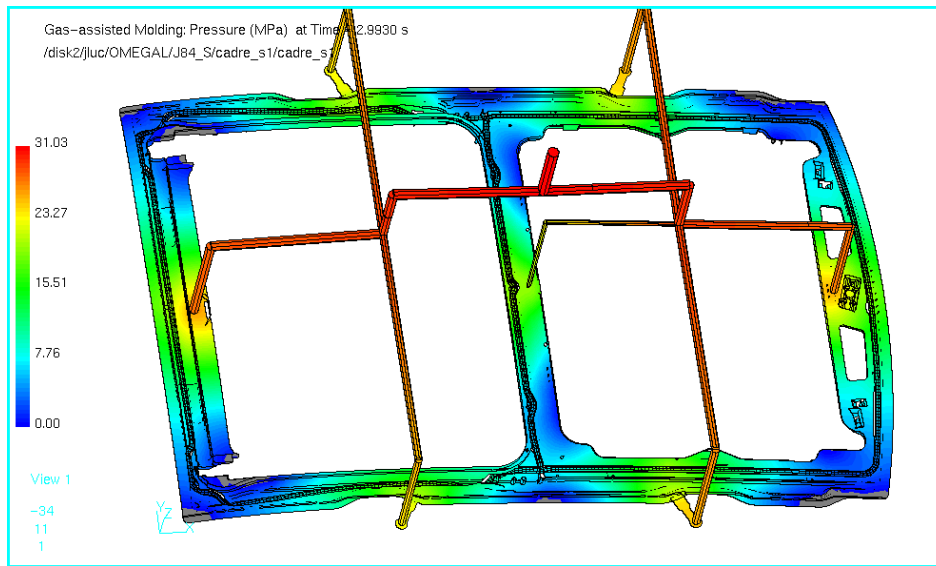


**Figure 97:**

Isochrones de  
remplissage

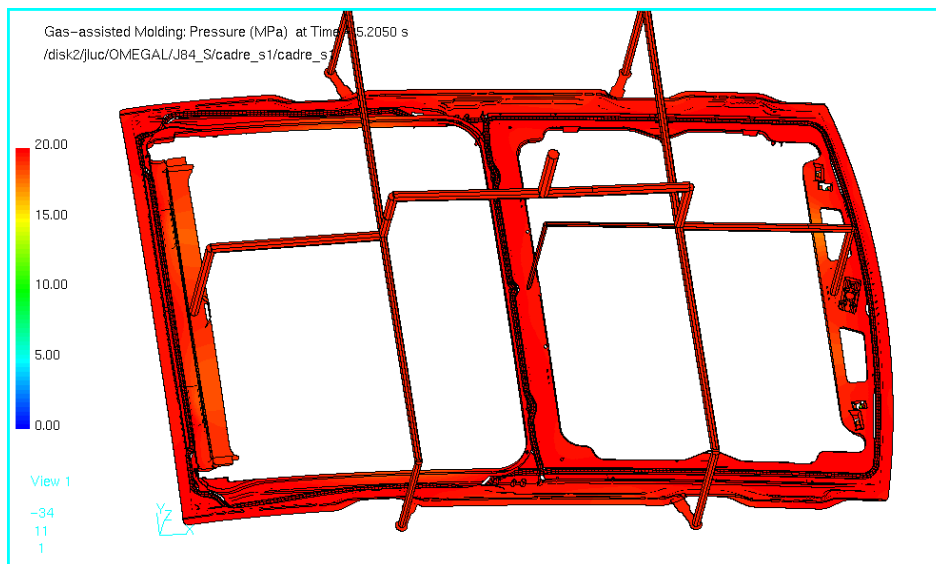


Nous avons déterminé les diamètres du bloc chaud et des busettes de façon à obtenir une fin de remplissage dans les quatre coins de la pièce et dans la zone centrale. Ce résultat a pu être parfaitement reproduit en pratique.



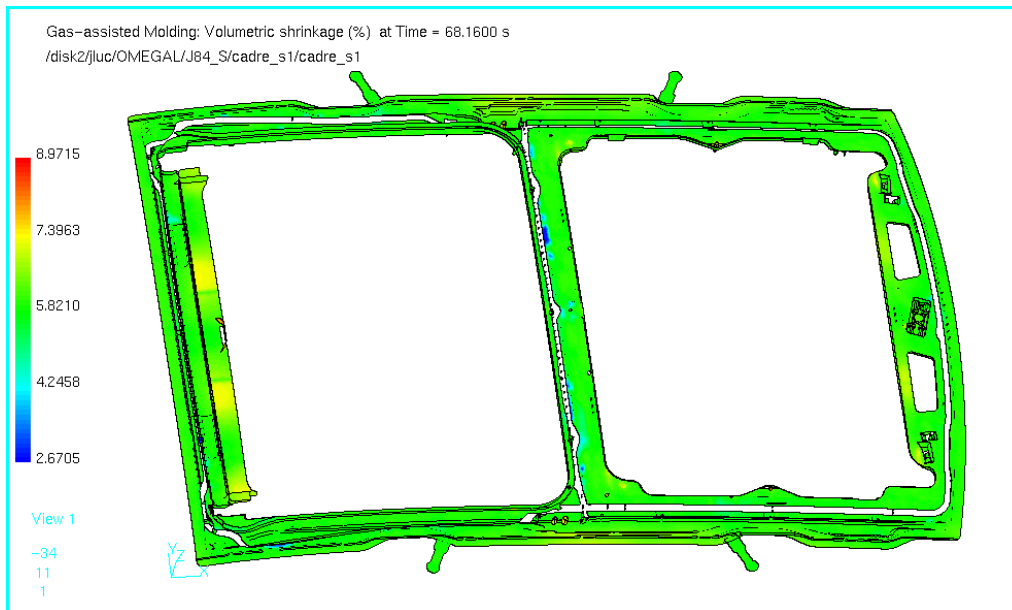
**Figure 98:** Isobares en fin d'injection dynamique

Cette figure montre le champ de pressions dans la pièce en fin d'injection dynamique. On retrouvera bien évidemment les mêmes zones non remplies, en gris près des zones bleues (basse pression).



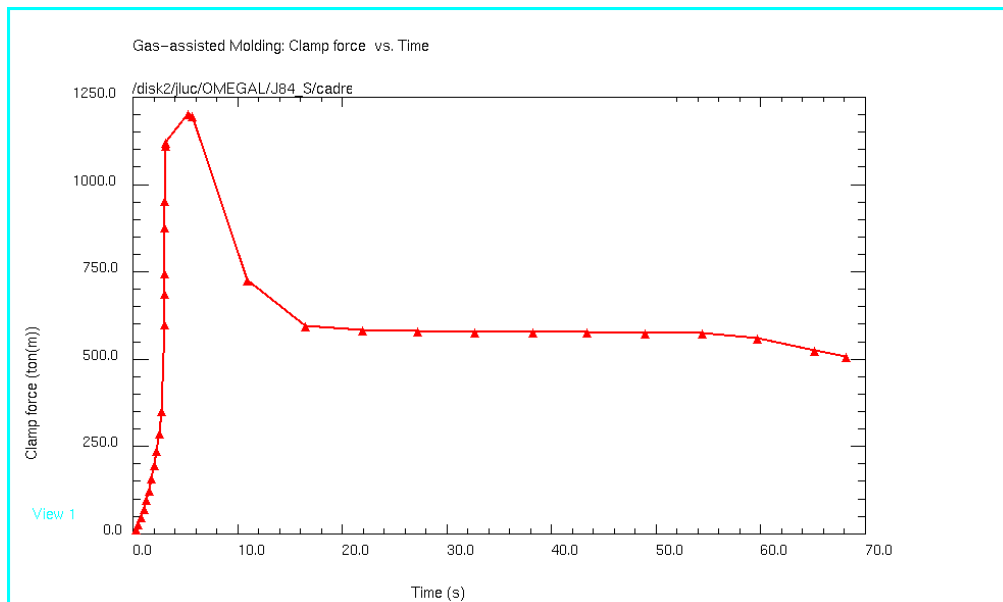
**Figure 99:** Isobares en phase de compactage

Lors de la phase d'injection dynamique s'était créé un gradient de l'ordre de 300 bars. A 97% du remplissage de la cavité, le gaz injecté à 200 bars a permis d'homogénéiser le champ de pression, de supprimer les amas matière et d'annuler ce gradient et cela tout en terminant le remplissage de la cavité. Là aussi, si les bulles ne communiquaient pas entre elles, ce gradient de pression aurait pour conséquences des déformations importantes de la pièce dues au refroidissement différentiel de l'amas matière.



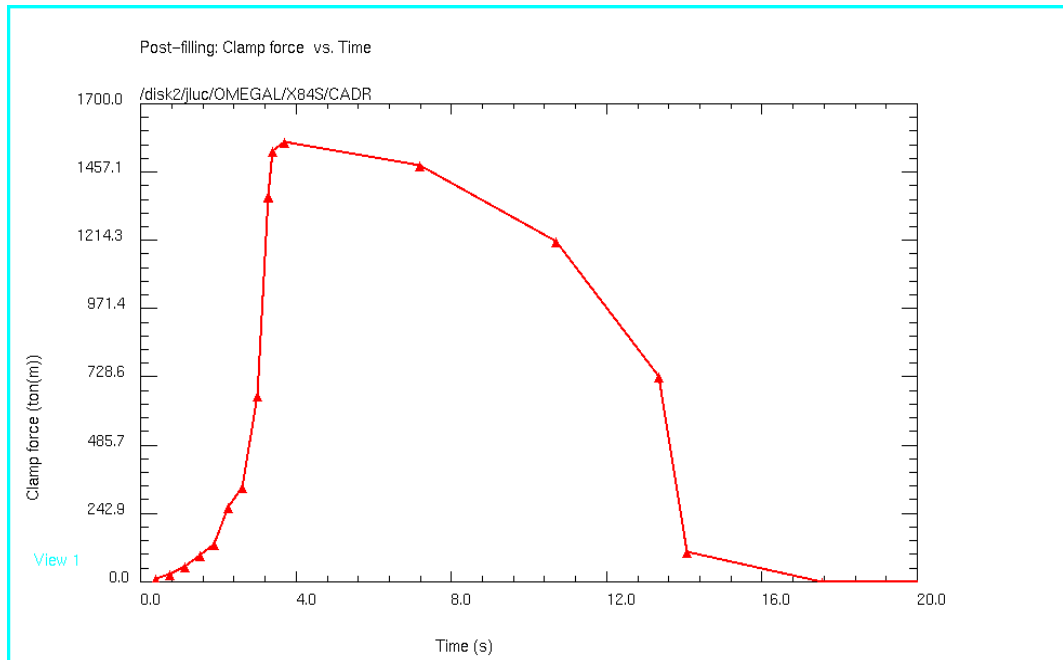
**Figure 100:** Retraits volumiques

Comme dans les deux cas précédents, le point remarquable est l'homogénéité du retrait dans la pièce. On a pu observer dans d'autres itérations de calculs que la pression de gaz n'a que très peu d'influence sur le retrait volumique alors qu'en injection classique le niveau de pression de maintien est un critère important dans le cycle d'injection. Quels que soient la configuration et les paramètres d'injection du gaz appliqués, le compactage réalisé par une injection de gaz sera plus efficace



**Figure 101:** Evolution de la force de fermeture du moule

Par rapport à une injection classique, la force de fermeture ne décroît qu'à partir du moment où la pression de gaz est relâchée. Cela montre que la matière est parfaitement plaquée contre les parois du moule garantissant ainsi l'efficacité du refroidissement. Bien évidemment la force de fermeture est bien plus faible qu'en injection classique limitant ainsi l'effort de traction appliqué aux colonnes de la presse à injecter.



**Figure 102:** Evolution de la force de fermeture du moule en injection classique

Résultat sur une pièce analogue injectée avec 12 points d'injection. Cette différence s'explique de la façon suivante : au lieu de continuer à pousser du polymère fondu sur une grande longueur, le gaz repousse uniquement le polymère encore fluide se trouvant au cœur de la veine. Par ailleurs, on observe que la courbe décroît très vite dans cette configuration d'injection.

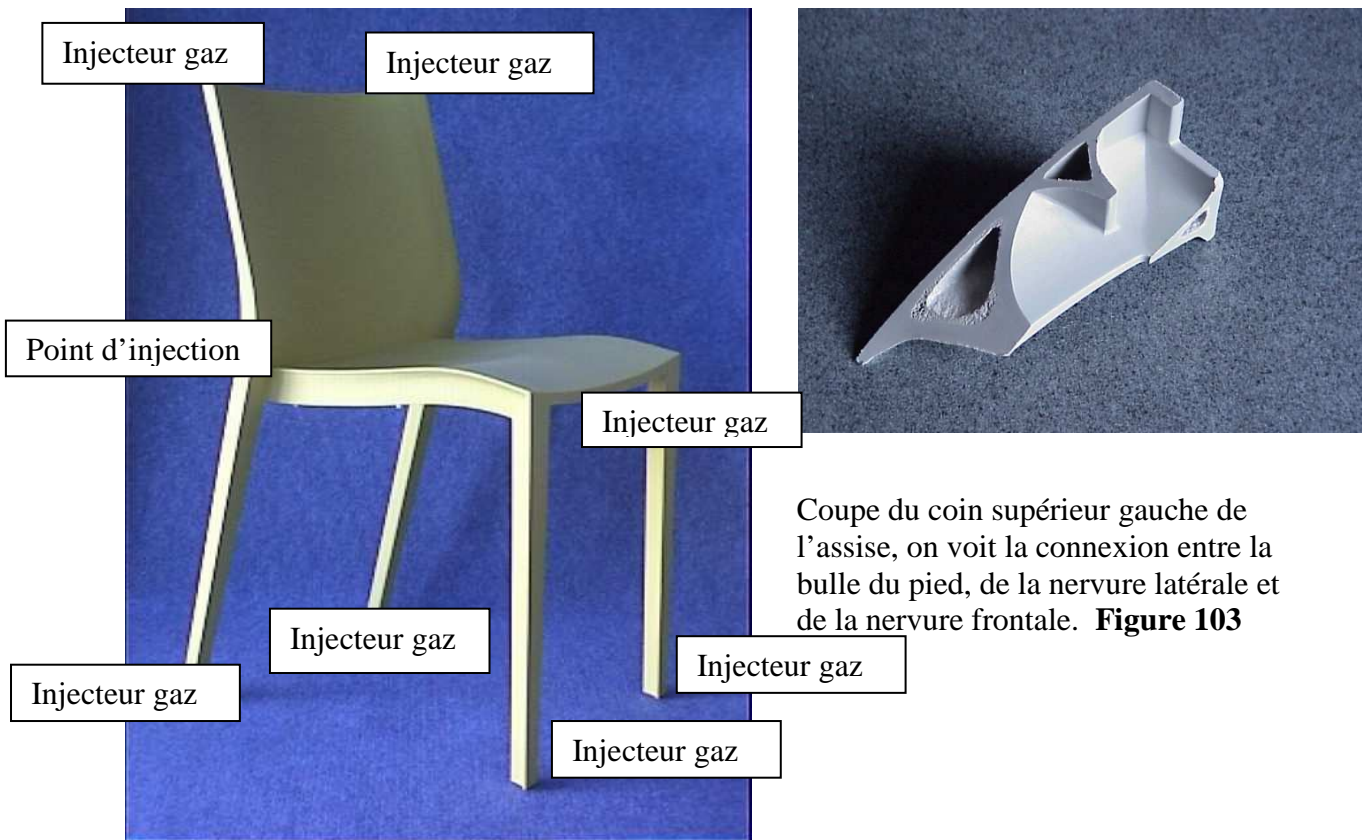
### 5.4.3 Intérêt économique

Sans tenir compte de la taille du moule et de la presse, les gains réalisables sur ce type de pièces sont considérables:

- diminution du nombre de busettes du bloc chaud (de 12 à 7)
- diminution des déformations (de 65 mm à 8 mm)
- diminution de la force de fermeture (de 1650 tonnes à 1250 tonnes)
- diminution du temps de cycle, suppression de la phase d'injection statique

## 5.5 Chaise Philippe Starck

### 5.5.1 Mise en situation



**Figure 104:** Chaise Slick-Slick pour Philippe Starck

#### But recherché:

Le cahier des charges d'une chaise de collectivités demande une résistance en statique à 120 kg et à 90 kg en basculement dans les deux directions.

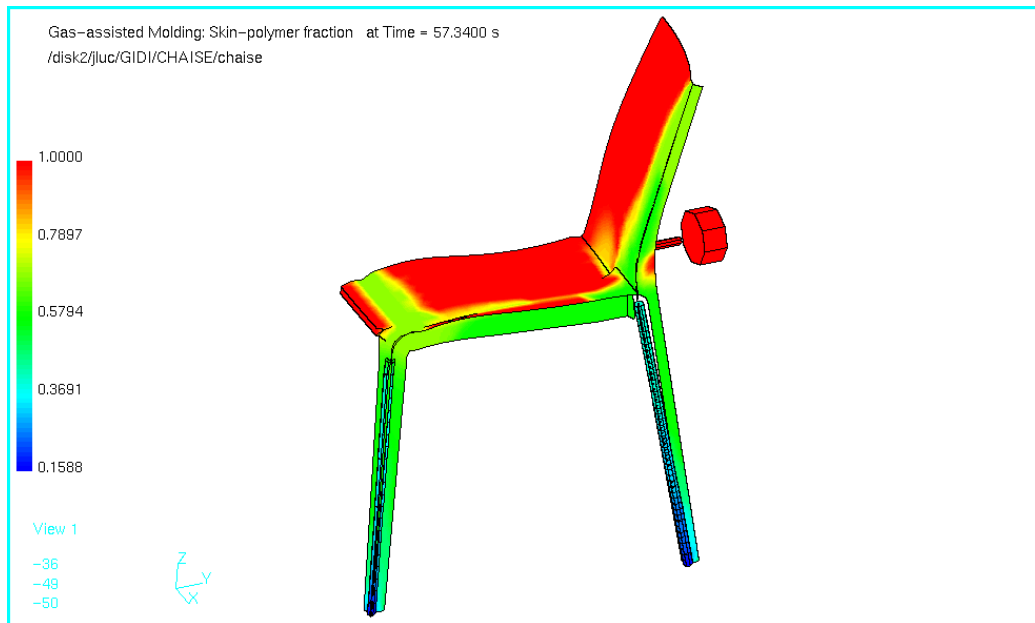
#### Solution proposée

Pour atteindre cet objectif, il a fallu renforcer tant les pieds, que l'assise et le dossier par des nervures de forte dimension. Ces contraintes mécaniques ajoutées à celles du design ont imposé à certains endroits des sections trapézoïdales de 40 mm x 30 mm. Réaliser cette pièce de façon classique condamnait la viabilité économique du projet. C'est pour cette raison que toutes les nervures ont été évidées grâce au procédé d'injection assistée par gaz.

Procédé utilisé: Refoulement dans le fourreau

Matière:	polypropylène chargé à 20% de talc
Alimentation matière	canal froid
Injection de gaz	7 injecteurs (chaque pied, chaque nervure du dossier, nervure frontale)
Temps de cycle :	142 s
Pression de gaz :	90 bar
Poids pièce	2.8 kg

## 5.5.2 Analyse rhéologique



**Figure 105:** Présence de gaz

Avec la technique de refoulement de la matière dans le fourreau, il faut optimiser la phase d'injection matière avant de s'occuper de l'injection de gaz. Après avoir résolu les habituels problèmes de lignes de recollement et autres inclusions d'air, nous avons opté pour une injection de gaz séquentielle. En injectant le gaz simultanément, il n'était pas possible d'évider correctement les différentes nervures.

Dans une première étape, nous avons injecté le gaz dans les pieds arrière à une pression de 100 bar afin de diminuer la résistance à l'avancement de la matière venant de la zone avant de la chaise. Le phénomène de propagation de la veine gaz étant très rapide, 1 s plus tard, nous avons injecté le gaz dans les pieds avant à une pression de 120 bar. De cette façon, la bulle venant de l'avant repoussant celle de l'arrière permettra de renvoyer la matière vers la vis. Il est à noter que la matière provenant de l'avant retapissera la cavité créée par la bulle provenant des pieds arrière.

Enfin, 3 s plus tard, est injecté le gaz au niveau de la nervure frontale à l'avant et au niveau des nervures du dossier.

Même si ces paramètres d'injection peuvent sembler complexes à mettre en œuvre, ils ont permis d'obtenir une production parfaitement stable dans le temps avec un taux de rebut de l'ordre de 1%, ce qui est acceptable pour ce type de production.

## 5.6 Coiffe de mixer

### 5.6.1 Mise en situation

Cette pièce se trouve sur le mixer Rondo2500 de SEB et produite chez un transformateur de matières plastiques à Lourdes. Les premières pièces injectées de façon classique présentaient toutes de très visibles retassures au droit des fûts de fixation. Pour remédier à ce défaut d'aspect inacceptable, nous avons proposé d'injecter du gaz dans la surépaisseur de façon à améliorer la phase de compensation des retraits.



**Figure 106:** La coiffe

#### But recherché:

L'intérêt de l'injection gaz sur cette pièce était de supprimer les retassures au droit des fûts de fixation

#### Solution proposée

La principale difficulté a été de trouver la position idéale de la busette d'injection matière qui devait être dans une zone de faible épaisseur tout en étant sur une face non visible. Le point d'injection se trouve dans l'axe de la pièce dans la dépression à gauche et à proximité immédiate de l'alésage. L'injecteur gaz est quant à lui positionné dans la surépaisseur à gauche sur la face non visible de la pièce.

#### Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	ABS
Alimentation matière	busette chaude
Injection de gaz	1 injecteur
Temps de cycle :	45 s
Pression de gaz :	30 bar
Poids pièce	36.2 g

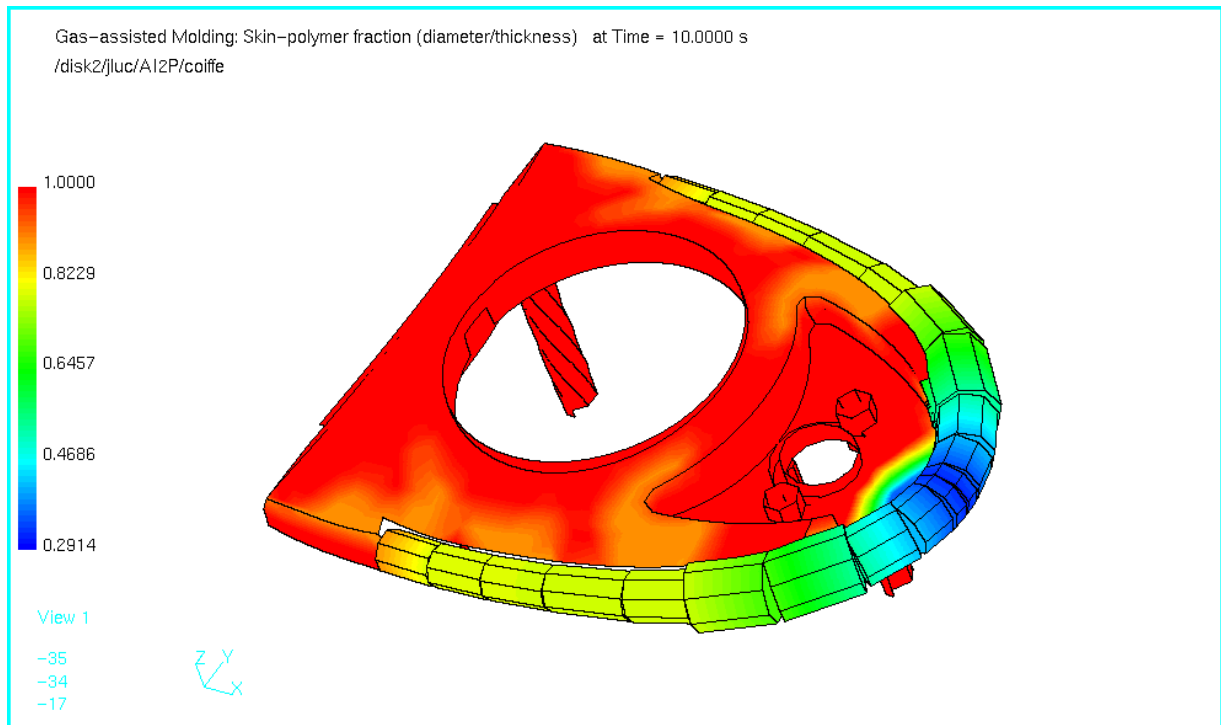
Moule 2 empreintes



**Figure 107:** pièce en injection assistée par gaz



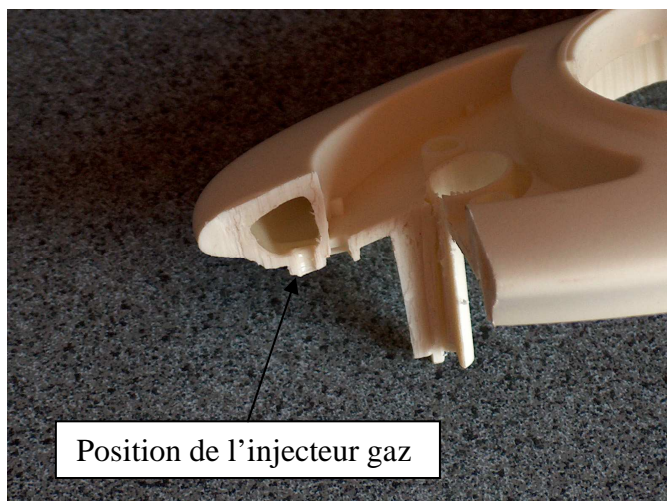
### 3.7.2 Analyse rhéologique



**Figure 108:** Présence de gaz

Les zones de faible épaisseur ont été modélisées en éléments coques minces à 3 nœuds alors que les zones de plus forte épaisseur l'ont été en éléments poutres à 2 nœuds. Les sections de ces éléments poutres sont recalculées de façon à tenir compte des particularités de forme, un coefficient correcteur est appliqué.

On voit ici la position de l'injecteur gaz, c'est la zone bleue où le gaz ne laisse que de très faibles épaisseurs de paroi.

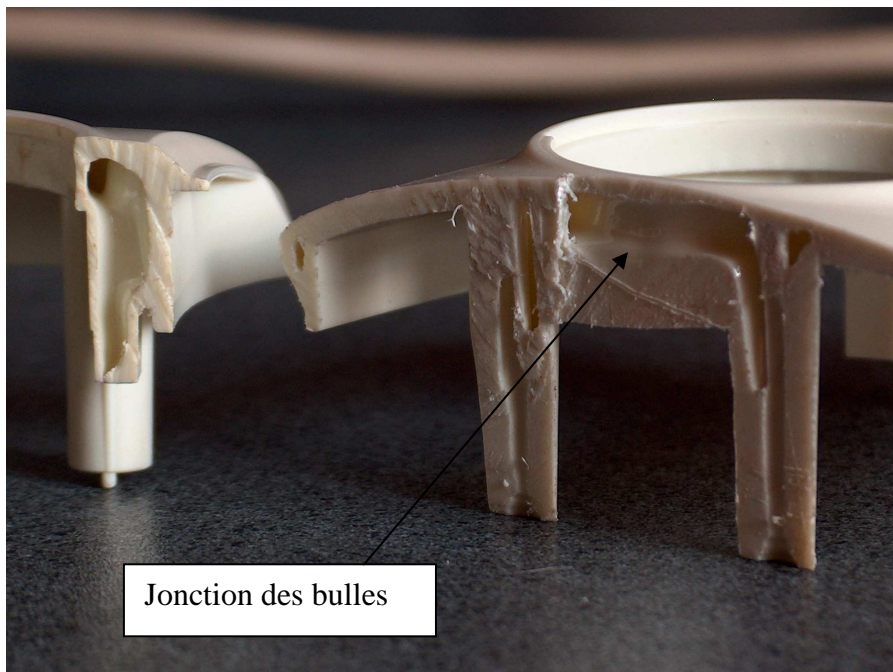


**Figure 109:** Coupe axiale au niveau de l'injecteur gaz



**Figure 110:** Coupe transversale

On remarquera que la bulle de gaz a réussi à s'infiltrer dans l'épaisseur. Pour certaines pièces, ces pénétrations de gaz intempestives, résultat qui pour certaines pièces peut être un défaut.



**Figure 111:** Coupes

Au niveau de la jonction des deux bulles de gaz, on ne remarque aucun amas matière ou autre défaut.

## 6. CONCLUSIONS

Dans notre travail, nous avons montré qu'en provoquant la connexion entre plusieurs bulles de gaz, il est possible de supprimer une bonne partie des défauts observables en injection. Ainsi, cette particularité permet un compactage parfaitement homogène supprimant en conséquence les phénomènes de retraits différentiels. Cet avantage majeur s'accompagne d'une suppression quasi totale des déformations et d'une diminution très sensible de la force de fermeture. Ces avantages permettent une nette amélioration de la qualité et une réduction importante des coûts de production.

A partir d'une singularité géométrique, nous avons pu mettre en évidence de nouvelles pistes de recherche. Ce que nous avons réussi à reproduire sur ces quelques pièces laisse penser que ce particularisme peut être généralisé, lorsqu'il subsiste la possibilité de faire évoluer la géométrie.

Supprimer les déformations et minimiser l'influence du phénomène de retrait peut donc être obtenu sans difficultés insurmontables. Nous avons pu montrer que la maîtrise de ce procédé en pratique ne présentait pas de difficultés particulières.

La difficulté de ces études a été la mise à disposition des outillages pour la réalisation de mesures des pièces. Monopoliser une presse à injecter pour réaliser des mesures est difficile à concevoir dans une phase de mise au point et de production.

Par rapport au travail théorique réalisé, nous avons testé ou fait tester différents logiciels de simulation. Autant les logiciels 2D1/2 ont permis d'observer la connexion entre les différentes bulles, autant les calculs réalisés avec des logiciels 3D n'ont pas permis d'approcher tous les phénomènes de la réalité pratique. La tablette arrière a été modélisée en 3D et aucun des logiciels testés n'a permis pour l'instant d'observer l'interconnexion des deux bulles. On aurait pu penser qu'en utilisant un maillage symétrique on puisse arriver à reproduire le phénomène.

Les mesures réalisées sur le retrait de cette pièce demandent à être étendues à d'autres géométries afin de pouvoir en tirer des règles de conception où le hasard n'interviendra plus que de façon marginale. C'est aussi pour cette raison que les logiciels de simulation devraient pouvoir intégrer un critère permettant de reproduire le phénomène.

Ces études ont permis de montrer que ce phénomène est observable quelles que soient la matière et la charge utilisée. Cela lève déjà une incertitude. Celle qui subsiste est relative au dimensionnel, ce gain en retrait pour des polymères amorphes est-il du même ordre de grandeur que pour des polymères semi-cristallins?

Les avantages considérables que nous avons observés, tant économiques que techniques, ne sont que trop rarement mis en œuvre chez les transformateurs de matières plastiques. Réaliser une pièce sans déformations en économisant de la matière et dans un temps de cycle 20% plus court est pourtant le vœu le plus cher de la majorité d'entre eux.

L'actualité nous pousse évidemment à nous demander si ce phénomène peut se reproduire en injection assistée par eau. Dans l'affirmative, cela simplifierait de façon considérable les problèmes de circulation et d'évacuation de l'eau.

# ANNEXE A

## 1. Présentation des différents procédés d'injection

Très rapidement, il a été possible de faire évoluer ce procédé en fonction des besoins pratiques. Ainsi, sont apparus les procédés suivants :

- l'injection multi-matières
- l'injection soufflage
- l'injection compression
- l'injection assistée par eau
- l'injection MuCell
- l'injection avec agents gonflants
- l'injection assistée par gaz

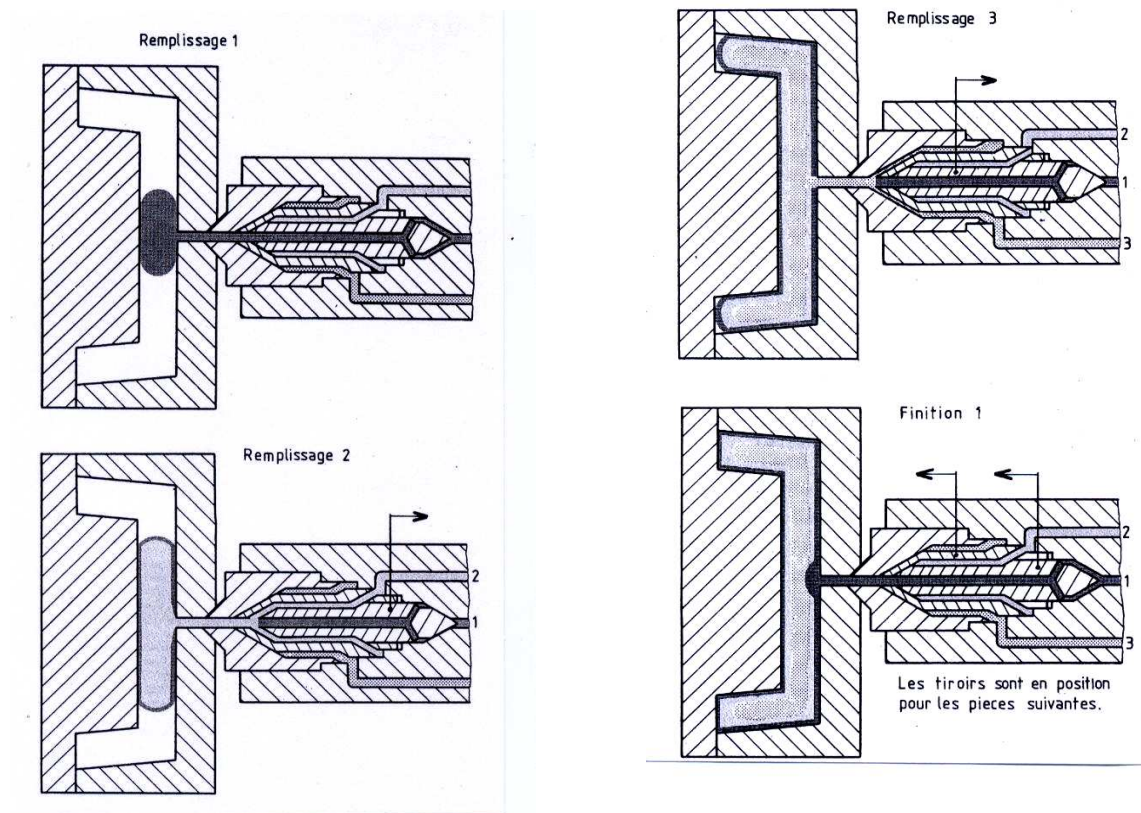
Il faut dès à présent signaler qu'il est parfaitement possible de combiner ces différents procédés entre eux. Il n'y a aucune contre-indication à combiner injection-compression et injection assistée par gaz.

### 1.2.1 L'injection multi-matières

Pour certaines pièces, seul est important l'aspect extérieur de la surface. L'option de retenir une matière noble pour la surface, donc avec un surcoût, peut être compenser par l'injection d'une matière tout venant compatible au cœur, matière ne servant qu'à donné le volume de la pièce. L'application typique que l'on peut signaler est la poignée de valise avec une matière soft en surface et un polyamide à cœur pour donner la rigidité.



**Figure 3:** Presse bi-matière Billion modèle Hercule 100 t (10 kN) de force de fermeture



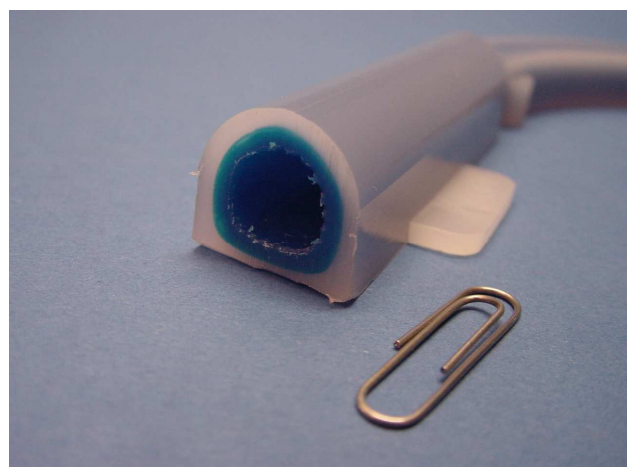
**Figure 4:** Schéma de principe d'une injection multi-matières [40]

Le principe consiste à piloter un distributeur en fonction du volume à injecter. La première étape est toujours l'injection de la peau extérieure de la pièce. C'est donc cette phase qui permettra d'obtenir la qualité de surface.

Le distributeur est ensuite reculé pour obstruer le passage de la matière de peau et permettre l'injection de la matière à cœur. Ce pilotage peut être électrique ou hydraulique.

Pour éviter toute trace en surface, on peut être amené à réinjecter la première matière, pour ce faire un deuxième distributeur obstrue le passage de la matière de cœur et ouvre le passage de la troisième matière.

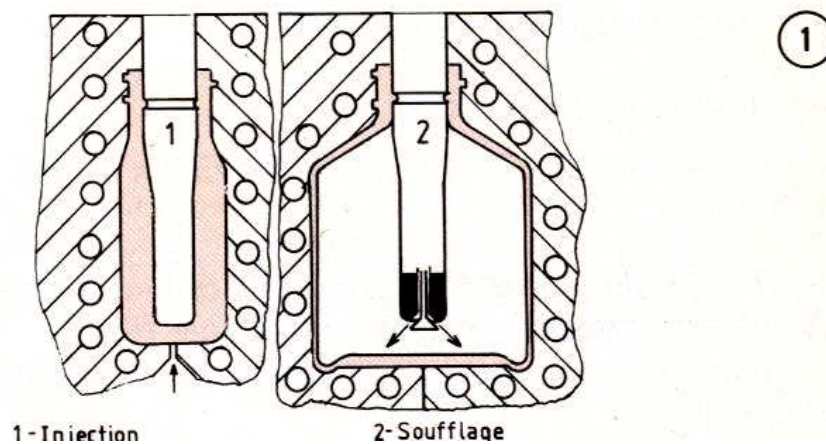
**Figure 5:** Section d'une pièce réalisée en bi-injection combinée avec l'injection gaz



## 1.2.2 L'injection soufflage

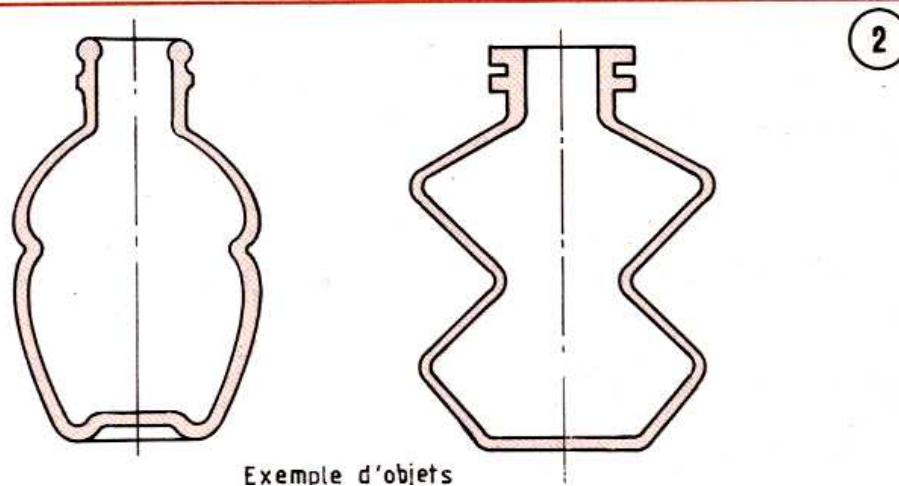
Ce procédé permet de fabriquer des corps creux tels que les bouteilles d'eau minérale. Il est possible d'obtenir des corps creux en grande série mais dont l'épaisseur de paroi n'est pas forcément homogène. Ainsi, il est possible de produire des pièces de quelques dixièmes de millimètre jusqu'à plusieurs millimètres.

Le procédé d'injection soufflage se décompose en deux phases : une phase d'injection d'une ébauche puis d'une phase de soufflage.



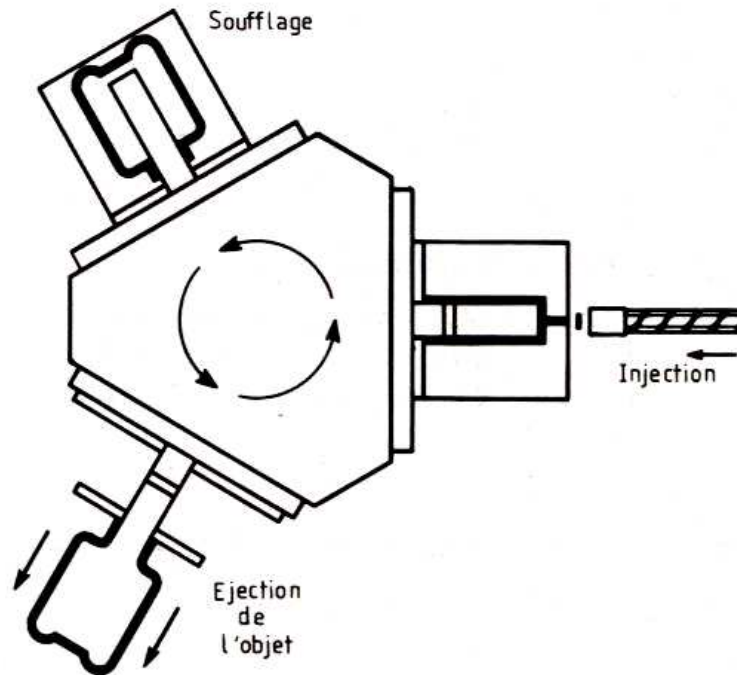
**Figure 6:** Principe du procédé d'injection soufflage [40]

Lors de la phase d'injection (1), le polymère est injecté de façon tout à fait traditionnelle dans un moule de préforme. Le noyau est ensuite retiré et la paraison est alors transférée dans le moule de forme pour la phase de soufflage (2).



**Figure 7:** Section de pièces obtenues par injection soufflage [40]

Une fois la phase de soufflage réalisée, la pièce ainsi obtenue est refroidie avant démoulage.



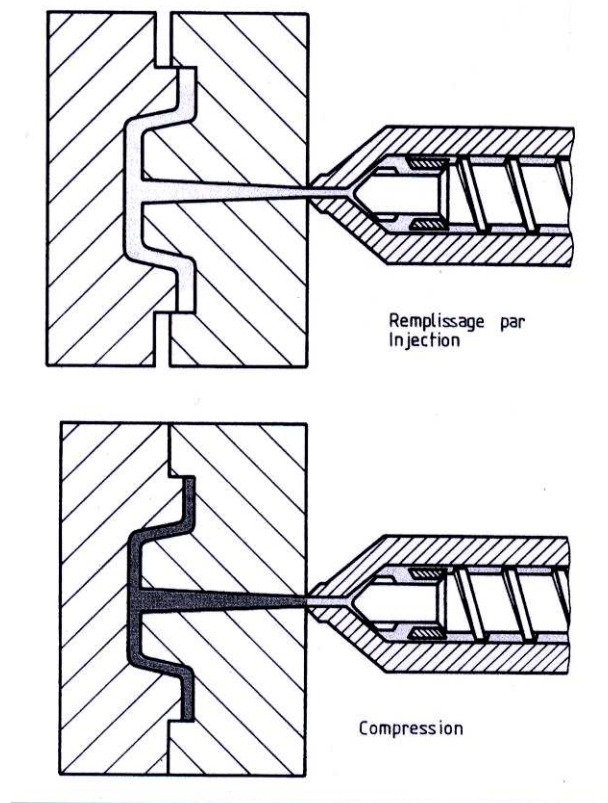
**Figure 8:** Installation type d'injection soufflage [40]

Ce procédé présente l'avantage de supprimer les lignes de recollement de flux matière et donc de zones fragiles. La phase d'injection permet également d'obtenir un embout fileté ou non de grande précision.

L'inconvénient est l'hétérogénéité des épaisseurs de parois qu'il est impossible de contrôler avec précision. Ce procédé se rapproche du procédé d'injection assistée par gaz. La différence majeure réside dans la nature du gaz et dans le mode d'injection. En injection soufflage le gaz est de l'air injecté à pression faible alors qu'en injection assistée par gaz, le gaz utilisé est de l'azote injecté à haute pression.

### 1.2.3 L'injection compression

Ce procédé consiste à injecter le polymère en un ou plusieurs points d'injection à moule ouvert.



**Figure 9:** Principe de l'injection compression [40]

Ce principe diffère sensiblement du procédé d'injection classique étant donné que la matière est injectée le moule étant partiellement ouvert. Ce procédé est particulièrement bien adapté aux pièces de grandes dimensions et de faible épaisseur. En règle générale, l'entrefer est de l'ordre de 4 fois l'épaisseur finale de la pièce. Une fois la « galette » injectée, le moule est fermé et verrouillé avant le début de la phase de compactage. Puis débute de façon tout à fait classique la phase de refroidissement.

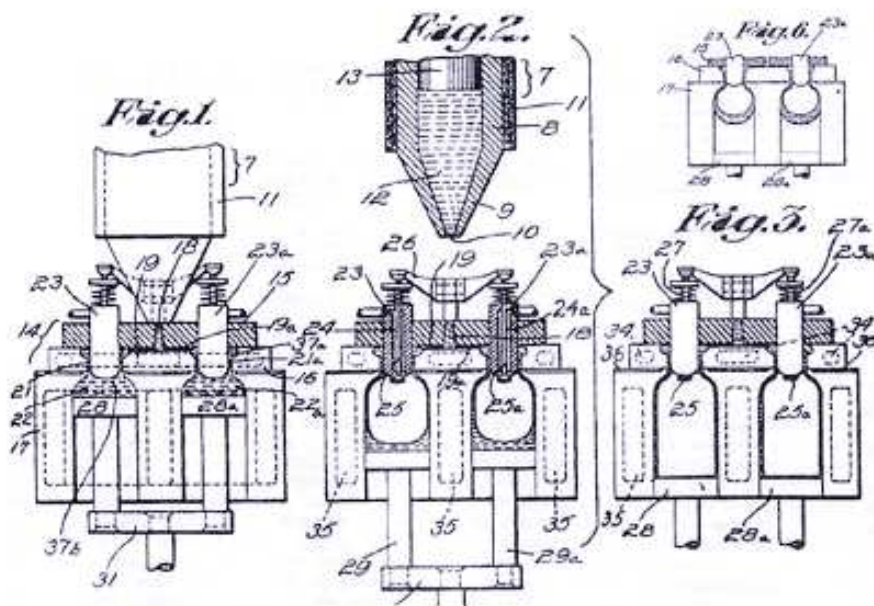
Ce procédé présente de nombreux avantages :

- pression d'injection réduite
- faible orientation des charges pour les polymères renforcés
- bonnes tolérances dimensionnelles
- réduction importante de la force de fermeture
- très bonne reproductibilité en masse injectée



## 1.2.4 L'injection assistée par eau

Même si ce procédé se développe plus lentement dans l'industrie que l'injection assistée par gaz, le brevet décrivant l'injection assistée par eau a été déposé en 1938 par Hobson. Ce procédé est en tous points comparable au procédé d'injection assistée par gaz ; seul le système d'injection du fluide diffère. L'intérêt de ce procédé est bien évidemment la réduction du temps de cycle. Ce procédé utilise les propriétés thermiques de l'eau pour pomper les calories depuis l'intérieur de la pièce. Là où l'azote stagne à la température du polymère, l'eau sous haute pression et haut débit va recevoir des calories du polymère. Au fur et à mesure de l'avancée de la bulle d'eau, sa température va augmenter et peut atteindre sous certaines conditions la température d'ébullition. La majorité des pièces aujourd'hui en production sont mises en œuvre avec le procédé masselotte, procédé plus simple à mettre au point dans ce cas.



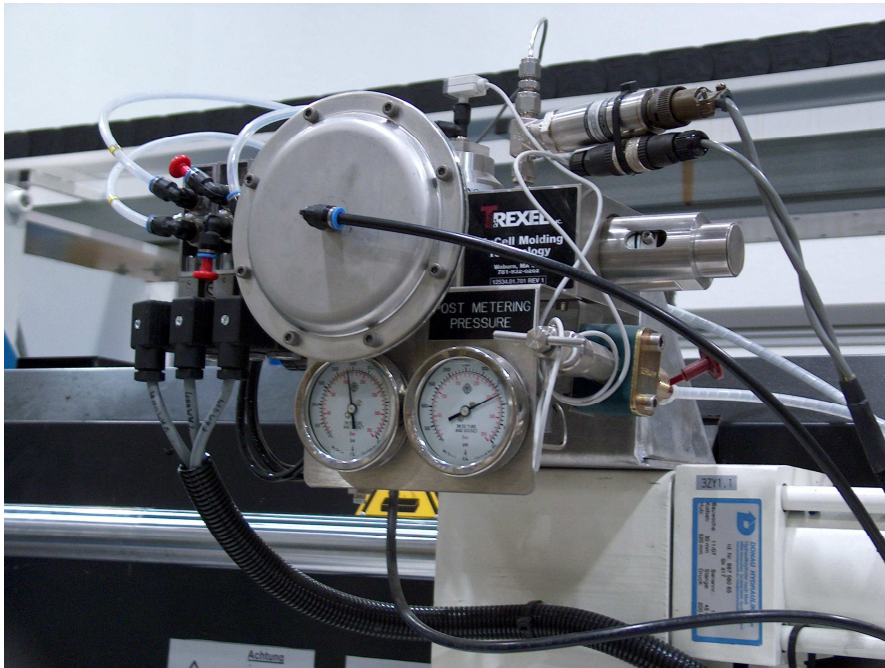
Hobson: Method and apparatus for making hollow articles of plastic material, 1938

**Figure 10:** Schéma de principe du procédé d'injection assistée par eau  
Document IKV

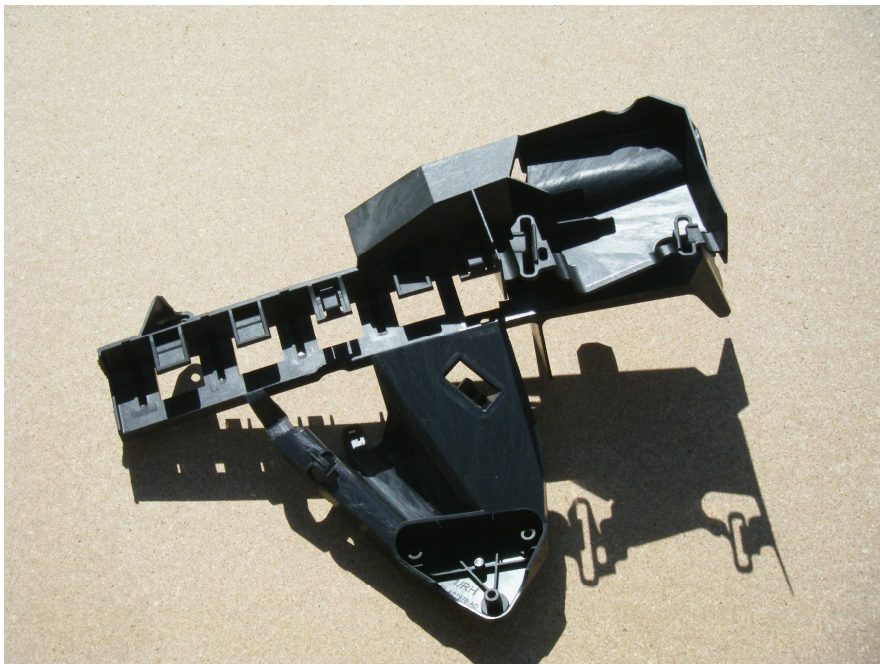
Injecter un gaz peut se faire à travers un jeu de fonctionnement alors qu'injecter de l'eau sous pression demande beaucoup plus de précautions vu la viscosité de ce fluide. La viscosité de l'eau est 170 fois supérieure à celle d'un gaz. De ce fait, il faudra intégrer un injecteur avec une section de passage suffisante pour permettre le passage de l'eau sous pression. Cet orifice doit pourtant rester fermé en cours d'injection dynamique sous peine de remplir l'injecteur avec du polymère fondu. L'injecteur comprend une aiguille mobile à commande le plus souvent hydraulique.

### 1.2.5 L'injection MuCell

Ce procédé breveté par la société Trexel Ltd consiste à injecter un gaz sous pression directement dans la zone de compression du système vis fourreau. Le gaz est délivré à débit contrôlé et est ainsi mélangé à la masse de polymère fondu. Lorsque le polymère est injecté dans la cavité du moule, les bulles de gaz se trouvant à la surface éclatent et laissent des traînées blanchâtres à la surface de la pièce. Par contre, la dimension des bulles se trouvant à cœur et toujours en pression va augmenter proportionnellement au retrait du polymère. Ce procédé permet donc d'avoir une pression relativement homogène en phase de compactage.



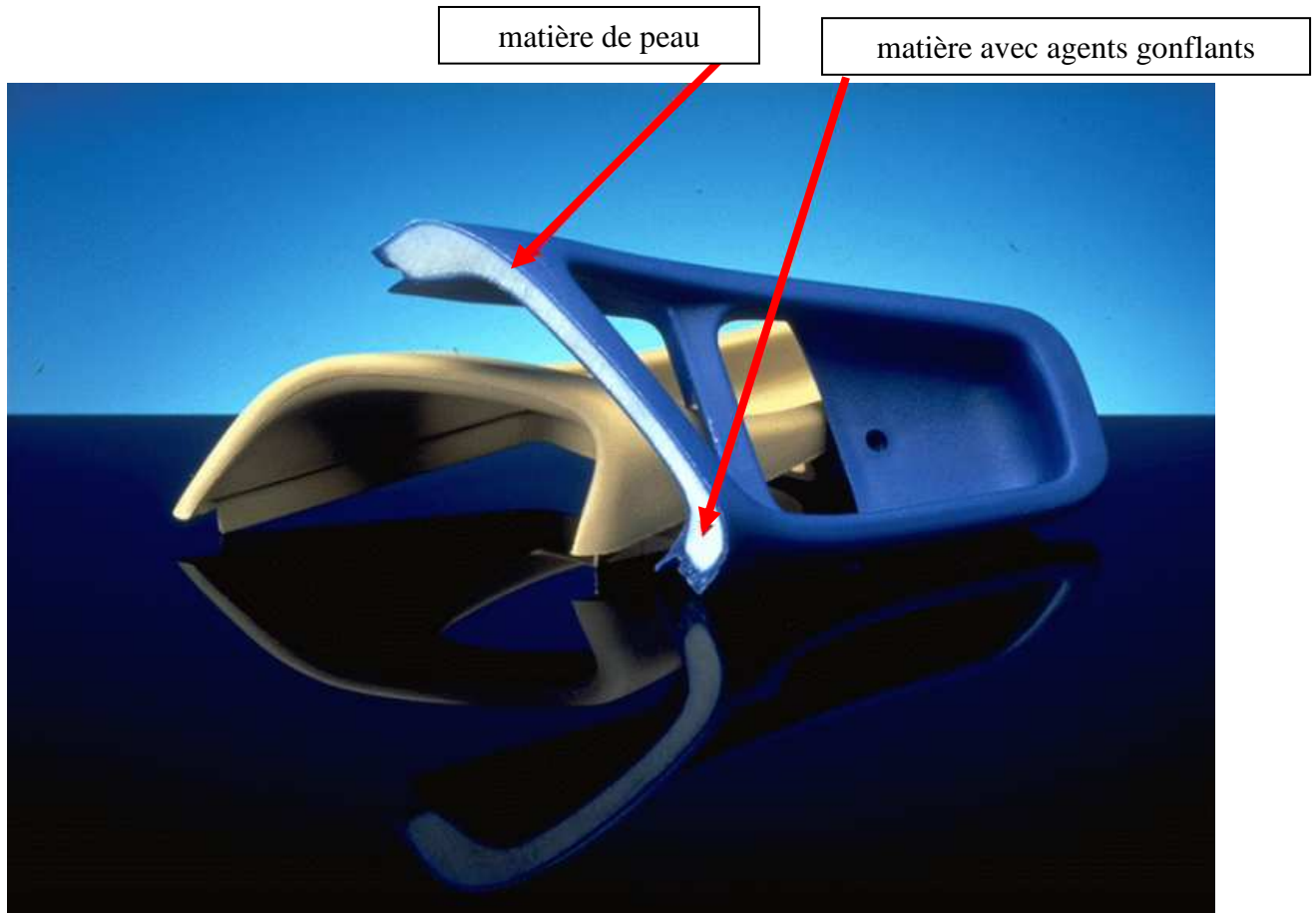
**Figure 11:** Installation Trexel, en gros plan l'électrovanne



**Figure 12:** Pièce automobile réalisée avec le procédé MuCell

### 1.2.6 L'injection avec agents gonflants

Ce procédé se rapproche de la bi-injection et du procédé MuCell. Dans une première étape, une matière noble est injectée pour former la peau de la pièce avec une grande qualité d'état de surface. A cœur est injectée une matière chargée d'agents qui à la chaleur vont gonfler de façon analogue à l'effet de la levure en boulangerie. Cette expansion aura pour effet de plaquer la matière de peau contre les parois du moule et ainsi garantir la qualité de l'état de surface. Ce procédé est souvent utilisé pour des pièces présentant des zones massives difficiles à compacter.



**Figure 13:** Pièce automobile réalisée en bi-injection avec agents gonflants à cœur (document Battenfeld)

# ANNEXE B

## Quelques brevets en injection assistée par gaz

Propriétaire	N° de brevet	Pays	Expiration
Cinpres Limited	591385	Australie	16.03.2004
	568375	Australie	11.05.2000
	1280859	Canada	15.03.1988
	1227006	Canada	22.09.2004
	57661	Eire	07.05.1984
	0283207	Europe	10.03.2008
	0127961	Europe	12.12.1984
	0289230	Europe	22.04.2008
	0309257	Europe	23.09.2008
	03-047171	Japan	11.05.2004
	160422	Mexique	22.02.2004
	78572	Portugal	08.05.2006
	532382	Espagne	03.01.2005
	33407	Taiwan	11.08.2004
	2202181	UK	10.03.2008
	2210578	UK	23.09.2008
	2139548	UK	19.11.2006
	2158002	UK	17.06.2007
	2124968	UK	13.09.2005
	4923666	Etats-Unis	08.05.2007
4498860	Etats-Unis	12.02.2002	
6896844	Etats-Unis	2005	
6767487	Etats-Unis	2004	
Alliance Gas Systems	6579489	Etats-Unis	2003
Inconnu	0232604 A1	Etats-Unis	2004
	0202743 A1	Etats-Unis	2004
	0075837 A1	Etats-Unis	2003
Battenfeld	6294126 B1	Etats-Unis	2001
	19735031 C2	Allemagne	2000

# ANNEXE C

## Extrait de l'Article des Techniques de l'Ingénieur, AM3693 par Jean-Luc DREYER

### Le procédé d'injection assistée par gaz

Les premières applications de l'injection assistée par gaz n'avaient qu'un seul but, économiser de la matière. Très rapidement, les applications de l'injection assistée par gaz se multiplièrent et aujourd'hui l'injection assistée par gaz est utilisée pour:

- améliorer la phase de maintien en pression et diminuer les retassures
- diminuer les temps de cycle en assurant un meilleur contact polymère-outillage
- augmenter la rigidité en créant un effet tube

Cette technique de transformation peut être mise en œuvre par différents procédés présentant évidemment des avantages et des inconvénients. Afin de faciliter la compréhension des phénomènes, nous porterons toute notre attention sur le procédé de remplissage partiel, procédé quasiment libre de contraintes juridiques. Ce procédé permet de cumuler tous les avantages de l'injection assistée par gaz:

- diminution du poids pièce
- diminution du temps de cycle car moins de matière injectée
- diminution de la force de fermeture pour la même raison
- diminution des retassures, le gaz va pouvoir être guidé dans les zones critiques
- augmentation de la rigidité à moment quadratique équivalent
- amélioration de l'aspect

L'injection assistée par gaz est un procédé où toute étape doit être optimisée, de la conception de la pièce au choix de la matière, et de l'optimisation de l'outillage jusqu'au choix de la presse à injecter. Il suffit d'un seul paramètre négligé pour risquer une production aléatoire voire de mauvaise qualité. Le choix de la matière est primordial, surtout pour les polymères chargés. Choisir la matière générique ou d'entrée de gamme pour une pièce technique optimisée conduit souvent vers une impasse. Les défauts d'aspect ont une telle influence que la totalité du projet peut être remise en cause. Ce procédé trouve aujourd'hui une seconde jeunesse après un démarrage très rapide suivi par une longue période de désillusions. En plus des difficultés techniques, s'est greffé un problème de protection industrielle.

Le procédé se démocratise et l'on trouve des applications dans des domaines aussi variés que le jouet, l'électroménager, le médical, le bricolage et l'ameublement. Il y a encore 10 ans, on considérait que le procédé était «réservé» à l'automobile et aux façades de téléviseurs. Cette récente évolution est due à la créativité dont ont fait preuve les designers et bureaux d'études. Ils n'ont pas utilisé le procédé classiquement pour gagner de la matière ou renforcer la pièce par une nervure creuse, mais soit pour améliorer la phase de compactage, soit pour supprimer un mouvement dans le moule.

## 2. Principes généraux des procédés d'injection assistée par gaz

Très schématiquement, on peut citer les procédés suivants :

- le remplissage partiel
- le remplissage avec utilisation de masselotte
- le remplissage avec refoulement de la matière dans le fourreau
- le remplissage avec utilisation de noyau mobile
- l'injection de gaz pour le compactage de pièce d'aspect
- injection externe de gaz
- injection de gaz hyper-refroidi

### 2.1 Technique de remplissage partiel

Vu plus haut

### 2.2 Technique de remplissage avec utilisation de masselotte(s)

Vu plus haut

### 2.3 Technique de refoulement dans le fourreau

Vu plus haut

### 2.4 Technique de noyau amovible

Vu plus haut

### 2.5 Technique de compactage (full shot)

Vu plus haut

### 2.6 Injection externe de gaz

Vu plus haut

### 2.7 Injection de gaz hyper-refroidi

Vu plus haut

## 2.8 Simplification de l'outillage

L'injection assistée par gaz permet de réaliser de substantielles économies au niveau de l'investissement dans l'outillage, par exemple la suppression d'un tiroir.

Sur la photo ci-dessous, l'injection du gaz a permis de supprimer une contre-dépouille et donc un mouvement tout en conservant les paramètres de production imposés.

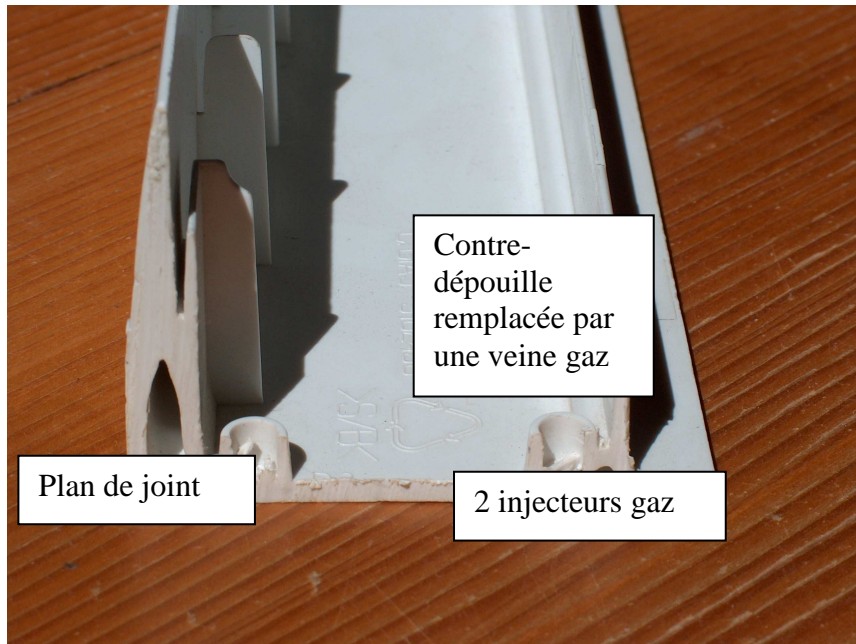


Figure 7: Enjoliveur de réfrigérateur

#### 4. Spécificités de conception - contraintes

La conception d'une pièce destinée à être produite avec le procédé d'injection assistée par gaz demande de prendre certaines précautions. Afin de simplifier, nous allons distinguer deux grandes familles géométriques de pièces.

- les grandes pièces planes avec nervures
- les pièces tubulaires

##### 4.1 Grandes pièces planes

Le but en injection assistée par gaz pour ce type de pièces est d'augmenter la rigidité de la pièce. Les gains matière et en temps de cycle sont souvent négligeables. Il faut toujours avoir à l'esprit que le gaz va faciliter le remplissage en apportant un niveau de pression correct jusqu'au dernier point rempli par la matière. L'exemple classique est la table de jardin; injecter cette pièce demande une très importante force de fermeture et injecter du gaz quelques instants avant la commutation en pression permet de limiter cette force de fermeture. Entre un cadre de toit ouvrant en injection classique et un modèle réalisé en injection assistée par gaz, la force de fermeture passe de 1700 tonnes (170 kN) à 1150 tonnes (11.5 kN) soit un gain de plus de 30%.

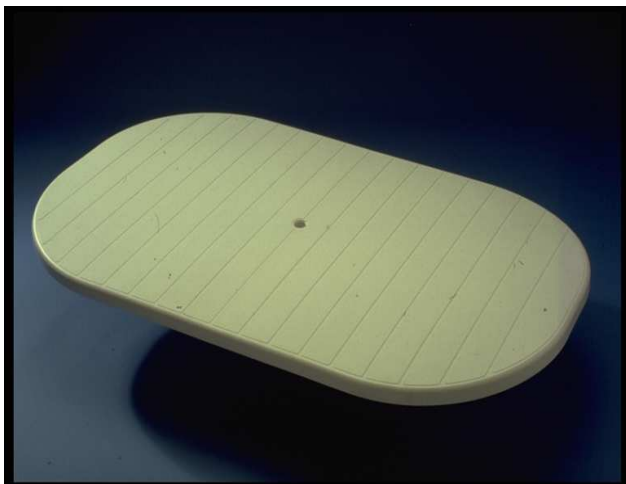


Figure 11: table de jardin  
Document Battenfeld



Figure 12: coupe de la table  
Document Battenfeld

Injecter du gaz dans ce type de pièce permet parfois de pallier à un manque de compactage et ainsi supprimer des défauts tels que retassures et/ou déformations. Un autre exemple type de cette application est la façade de téléviseur où l'azote sous pression circule dans des canaux sur le pourtour de la pièce permettant un compactage correct au droit des différentes nervures et fûts de fixation. Le dimensionnement des veines gaz est essentiellement fonction du polymère injecté. Quel que soit la section de passage, à cœur subsistera une gaine fluide que le gaz pourra repousser. A partir du moment où le gaz sera présent, on pourra avoir la certitude que le compactage de la zone sera optimal.



Ci dessous, quelques exemples de canaux gaz:

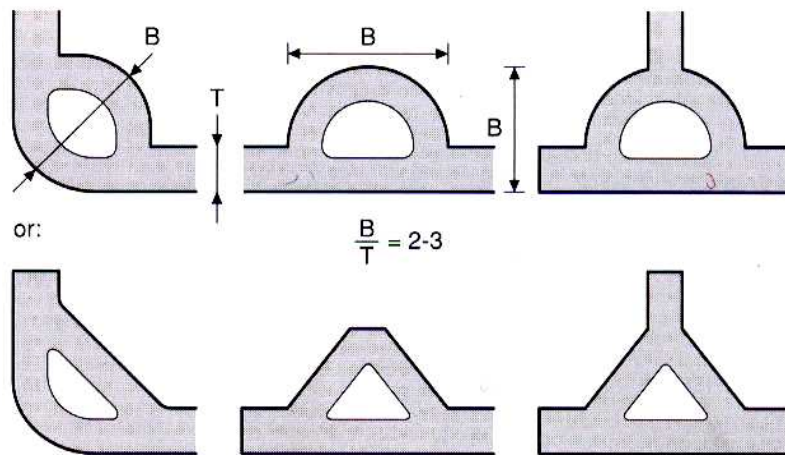


Figure 13 Document Dupont de Nemours

Le rapport indiqué figure 12 pourra varier en fonction du polymère. Pour les polymères tels que les styréniques, la valeur de 3 est optimale, on choisira une valeur de 4 à 5 pour les polyoléfines.

Sous l'effet de la pression, le polymère fondu avancera toujours plus facilement dans des canaux de diamètre 10 mm que dans une épaisseur de 3 mm. Il est donc indispensable d'étudier avec soin le remplissage de la cavité. Cette étude permettra de déterminer le diamètre hydraulique idéal de la veine gaz et ainsi éviter des défauts comme des inflorescences (Figures 13 et 14) ou pénétrations de gaz tout au long des canaux. Ces défauts se produisent uniquement lorsque le rapport entre le diamètre des canaux et l'épaisseur générale est inadapté. C'est pour cette raison que nous préconisons toujours de remplir le plus tôt possible les zones de faible épaisseur.

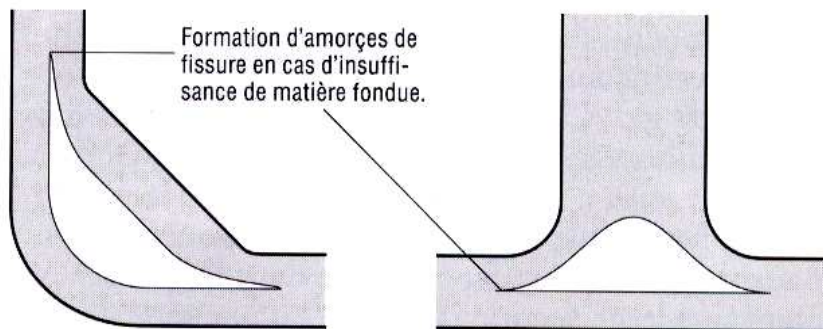


Figure 14: en fonction de la pression de gaz injecté, ces pénétrations seront plus ou moins importantes. Document Dupont de Nemours



Figure 15: Inflorescence due au compactage

## 4.2 Pièces tubulaires

On appelle pièce tubulaire toute pièce ressemblant à une poignée, un accoudeur etc... Différentes méthodes sont utilisées pour réaliser ce type de pièce:

- remplissage partiel
- remplissage complet avec évacuation par masselotte
- remplissage complet avec noyau coulissant

La première méthode est évidemment la plus simple à mettre en oeuvre car il suffit de bien choisir le moment de la commutation en gaz. Les outils simples de simulation, permettent d'obtenir une bonne corrélation entre théorie et pratique. Bien sûr certains paramètres ne sont pas pris en compte, comme les dimensions de l'injecteur gaz par exemple. Pour valider l'influence de ce type de paramètres, il est indispensable d'utiliser des outils beaucoup plus perfectionnés comme des outils de simulation 3D, qui permettent eux de visualiser avec une étonnante précision les surfaces de recollement qui, sur la peau de la pièce, laissent des lignes plus ou moins visibles et potentiellement pénalisantes.

Dans tous les cas, il est nécessaire d'avoir des épaisseurs relativement uniformes afin de conserver en fin de compactage une quantité suffisante de polymère encore à l'état fondu. Ce n'est qu'à la fin de cette phase de compactage que l'on commandera l'ouverture de l'obturateur de la masselotte. Dans ce cas, nous aurons une épaisseur de paroi relativement constante si le moule est parfaitement équilibré au niveau thermique.

Les pièces tubulaires peuvent en général être réalisées avec tous les procédés détaillés dans le paragraphe 1.

Le gaz prenant toujours le chemin le plus court ne laissera que très peu de matière dans la courbe intérieure. Les angles vifs sont donc absolument à proscrire.

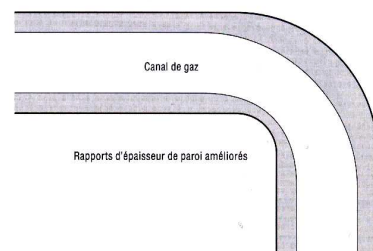
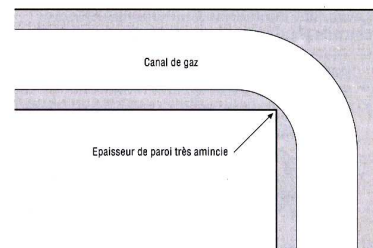


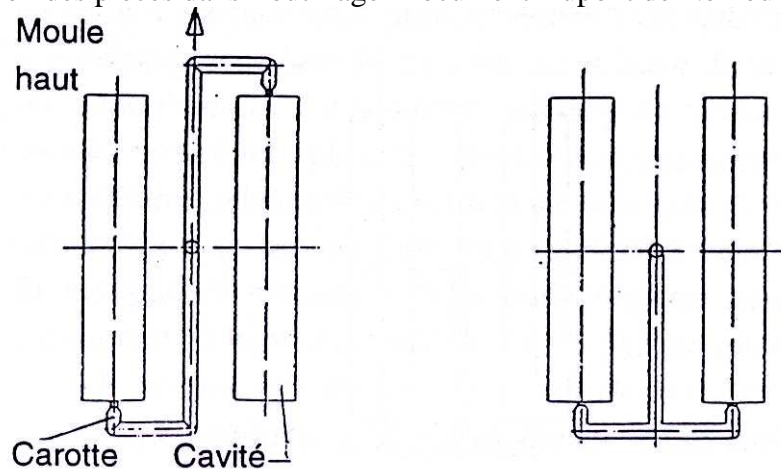
Figure 16

Document Dupont de Nemours

Soigner la conception de la pièce ne suffit pas pour obtenir une pièce de bonne qualité, il faut également soigner la conception de l'outillage qui doit la produire. Il faudra prendre en compte l'effet de la gravité et évaluer la quantité de calories à évacuer au cours du cycle de refroidissement. Lors de l'injection dynamique, la matière est plaquée contre les parois du moule par la pression d'injection. Autant cela est vrai pour les zones de faible épaisseur, autant cela est faux pour les sections importantes, la seule force exercée au niveau du front matière est la gravité. La perte de charge est le gradient de pression entre la carotte et le front matière. Lorsque l'injection matière est orientée de haut en bas, la matière aura tendance à

tomber. Dans un entrefer de 2.5 mm, la matière restera «collée» aux parois, mais dans un tube de 30 mm de diamètre le phénomène observé est complètement différent : la matière tombera au fond de la cavité rendant impossible toute formation de bulle de gaz.

Figure 17 Position des pièces dans l'outillage Document Dupont de Nemours



Dans l'empreinte de gauche, l'avancée de la matière se fera en opposition à la gravité, alors que dans l'empreinte de droite la matière tombera au fond de la cavité.

Injectées de cette façon, les deux empreintes se rempliront exactement de la même façon.

Refroidir une paroi de 2.5 mm est autrement plus simple que de refroidir une section de 10 mm de diamètre ou même beaucoup plus dans certains cas. Se contenter d'appliquer les règles élémentaires de l'injection classique aura pour conséquence un accroissement significatif du temps de cycle, résultat directement opposé au but recherché. Pour une pièce de section circulaire, la surface d'échange de chaleur sera proportionnelle au périmètre. Pour obtenir un refroidissement efficace, la solution idéale est d'avoir une surface identique au niveau des circuits de refroidissement, pour cela il faut augmenter la section de passage des canaux qui pourront aller jusqu'à des diamètres de 24 mm. Mais pour assurer un écoulement turbulent dans de tels circuits, on prendra la précaution de dimensionner correctement l'installation de pompage.

## A1. Matériels et périphériques

Très schématiquement, la mise en œuvre du procédé d'injection assistée par gaz ne demande qu'une source d'azote et un système de régulation de pression. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, on peut mettre en œuvre ce procédé sur toutes les presses à injecter récentes.

Afin d'assurer une transition correcte entre la fin de l'injection dynamique et le début de l'injection du gaz, il faut transmettre au pupitre une information électrique indiquant soit le début de l'injection soit la position exacte de la vis. En pratique, il suffit de récupérer cette information au niveau d'un relais qui se déclenche au démarrage de l'injection.

### La source d'azote

Pour pouvoir choisir objectivement son mode d'approvisionnement en azote, il faut prendre en compte deux paramètres importants:

- une estimation annuelle de la consommation d'azote
- le polymère transformé

La grande difficulté pour un transformateur est de connaître les coûts induits par la décision de démarrer une production en injection assistée par gaz. Pour pouvoir répondre à cette question, il est indispensable d'évaluer avec la plus grande précision sa consommation d'azote par pièce. Celle-ci peut se calculer de façon relativement simple en déterminant les volumes des différentes cavités occupées par le gaz. Une fois le volume à la pression atmosphérique connu, il faut le transformer en volume à la pression de transformation. Déterminer par sa simple expérience le niveau de pression du gaz peut s'avérer délicat bien qu'en règle générale on connaît les ordres de grandeur. Très grossièrement et pour les pièces communes, entre le remplissage partiel et le procédé masselotte le rapport de pression est de l'ordre de 2 ; on retiendra environ 50 bar pour le remplissage partiel et 100 bar pour le procédé masselotte. Evidemment, lorsque l'on doit positionner plusieurs injecteurs ou que l'on transforme une matière plus technique, la solution la plus sage est de réaliser une étude rhéologique. Cette étude permettra de situer très rapidement le niveau de pression, les logiciels étant aujourd'hui à même de signaler certaines causes de défauts.

Plus faible sera la pression d'injection du gaz, plus faible sera la consommation d'azote et plus faible sera l'incidence du procédé sur le prix de la pièce. Le choix de la pression d'injection d'azote ne doit être dicté que par des considérations techniques relatives à la pièce.

Pour de très faibles consommations d'azote, la solution la plus économique est une bouteille de 85 m<sup>3</sup> à 200 bar. En pratique, si l'on injecte le gaz à 20 bar, on pourra réaliser des pièces en vidant la bouteille jusqu'à atteindre la pression de consigne. Il restera donc dans la bouteille une pression résiduelle non-consommée. Dans la très grande majorité des cas, cela reste sans influence sur le prix de la pièce par rapport aux autres modes de fourniture tels que les cadres de 9 bouteilles, la bonbonne cryogénique ou le générateur d'azote.

Lorsque la consommation augmente et que la pression non consommée est supérieure à 50 bar, les différents fournisseurs peuvent proposer deux solutions techniques très différentes l'une de l'autre:

- une ou plusieurs bouteilles d'azote
- une bonbonne cryogénique reliée à un évaporateur



Bonbonne cryogénique couplée à un évaporateur      Générateur couplé à un surpresseur  
Figure 8: Document Air Liquide

A partir du moment où plusieurs presses à injecter fonctionnent simultanément en injection assistée par gaz, la solution la plus économique sera d'installer un générateur d'azote in situ couplé lui aussi à un surpresseur. Il existe deux types de générateurs d'azote faisant appel à deux technologies différentes, la première solution développée entre autre par Air Liquide est la perméation par membranes, et la seconde assure la purification à partir de charbon actif. Les générateurs d'azote par membrane permettent de moduler la pureté de l'azote en fonction des besoins et en particulier du polymère transformé. Seuls les polymères styréniques demandent une grande pureté (99,7%) alors qu'en général, tous les autres polymères supportent une pureté de 98%.

Faire le choix d'intégrer ce procédé dans un atelier de production est une décision à long terme. Mais investir lourdement lorsque l'on transforme bon an mal an deux ou trois pièces en injection assistée par gaz représente un risque économique dans la mesure où il faut amortir l'investissement réalisé sur la durée de production des pièces considérées. Certains fournisseurs proposent une mise à disposition des moyens de fourniture d'azote (figure 7). Cette formule très originale permet de faire évoluer sa source d'azote en fonction des besoins soit dans un sens soit dans l'autre.

Ce sont bien sûr des critères économiques qui permettront au transformateur de réaliser le choix le plus judicieux.

## Le surpresseur

Le surpresseur devient indispensable pour une pression d'injection de gaz supérieure à 50 bar vu le coût de la pression restant dans les bouteilles. Le surpresseur est en pratique intercalé entre la source d'azote et le pupitre de commande. Celui-ci est alors en permanence alimenté en azote à environ 300 bar, pression préconisée il y a une dizaine d'années. On s'est rapidement rendu compte que ce niveau de pression n'est plus guère nécessaire. Très rares sont les pièces demandant des pressions d'injection de gaz supérieures à 150 bar.



Surpresseur Battenfeld  
Figure 9:



Electrovanne mobile de Battenfeld

## L'ensemble pupitre de commande-électrovanne

C'est l'appareil indispensable pour réaliser des essais et une production en injection assistée par gaz, le pupitre permet le pilotage de la pression en fonction du temps. Le pupitre transforme la pression d'entrée en une pression de pilotage par l'intermédiaire d'une électrovanne commandée par l'information électrique provenant de la presse à injecter.

On pourra toutefois remarquer que la position de l'électrovanne n'est pas neutre, plus l'électrovanne sera proche de l'outillage, moins on consommera d'azote. Si pour une pression d'injection de gaz de 20 bar l'influence de la longueur du flexible est négligeable, cela sera loin d'être le cas pour une pression d'injection de gaz de 100 bar.

Ainsi, Battenfeld a dissocié l'électrovanne de l'écran de programmation, l'électrovanne se trouvant dans un boîtier fixé directement sur l'outillage. Le pupitre n'abrite alors que le système de programmation.

Pour tous les autres constructeurs, l'électrovanne se trouve directement dans le pupitre. Bien évidemment, il y a autant d'électrovannes que de voies de sortie permettant ainsi le pilotage simultané de plusieurs presses à injecter. Autant que faire se peut, il est indispensable de limiter le volume de gaz contenu dans les flexibles afin de limiter la consommation d'azote non-efficace.

Quel que soit le constructeur, la méthode de programmation est quasiment toujours identique, à savoir imposer différents paliers de pression. L'interface graphique est toujours très conviviale et permet tous types de sorties et sauvegardes.

### L'injecteur gaz

On appelle injecteur gaz un petit mécanisme permettant le passage du gaz sous pression mais interdisant les infiltrations de polymère fondu vers la source d'azote. En effet, quel que soit le procédé de mise en œuvre, l'injecteur gaz est noyé dans le polymère fondu sous pression. Selon la pression d'injection matière, une faible quantité de polymère fondu pourra s'infiltrer dans la section de passage du gaz, colmatant ainsi l'arrivée du gaz.

Pour empêcher ce phénomène, beaucoup de transformateurs ont essayé d'inventer des systèmes plus ou moins compliqués et sophistiqués et de très nombreuses demandes de brevets ont été déposées. Après avoir testé un très grand nombre d'injecteurs, on peut aujourd'hui affirmer que seuls les paramètres d'injection matière et gaz permettent d'empêcher le colmatage.

Par contre, nous avons pu observer qu'il existe des systèmes plus ou moins pratiques et, dans tous les cas, on préférera des injecteurs aisément démontables moule ouvert. On pourra également remarquer que ces injecteurs sont de petits mécanismes relativement fragiles et que des précautions de montage doivent être prises.



Figure 10: Document Battenfeld

## A2. Exemples de pièces réalisées et problèmes rencontrés

Généralement, les pièces présentées dans les pages suivantes ont été réalisées en faisant appel au procédé de remplissage partiel. La totalité de ces pièces aurait pu être réalisée avec des masselottes. Notre travail consiste à donner aux transformateurs le meilleur conseil afin qu'ils puissent produire ses pièces au moindre coût et au meilleur niveau de qualité.

Dans les pages suivantes, on trouvera un bon nombre d'applications illustrées dans différents domaines. Ci dessous, quelques domaines d'applications non-illustrées :

### Emballages

- boîtes
- palettes

### Sports

- raquettes
- crosses de hockey
- fixations de ski
- chaussures de ski

### Médical

- poignées de lit d'hôpital
- main courante de lit d'hôpital

### Pièces automobiles

- garnissage de toit ouvrant
- encadrement de rétroviseur extérieur
- poignée de virage
- support d'essuie-glace
- couvercle de boîte à gants
- châssis de siège
- appui-tête
- pédales
- volants
- pommeaux de commandes de boîte de vitesses
- boîtiers de filtres
- calandres
- pare-chocs
- becquets
- planche de bord



## 2.11 Garnissage de toit ouvrant

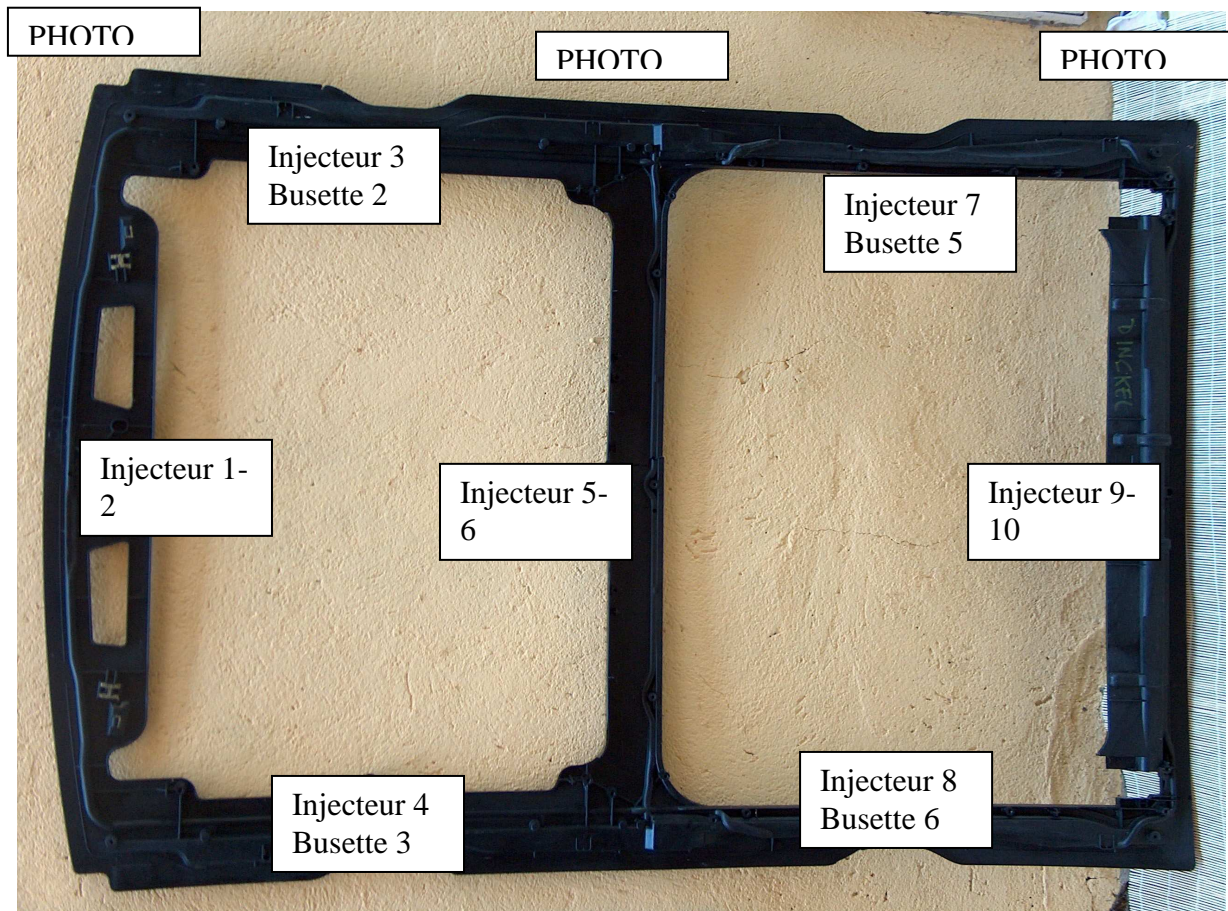


Figure 7a: Pièce complexe rigidifiée par un réseau de veines gaz

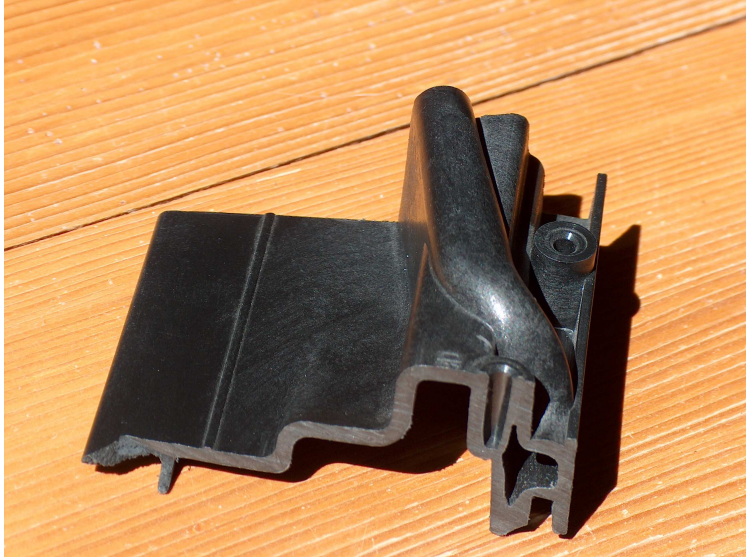
### But recherché:

Augmentation de la rigidité de la pièce et diminution des déformations. La veine gaz forme un huit et est continue sur toute la pièce. Les injecteurs ont été positionnés dans le but d'obtenir une inter-connexion entre les différentes bulles et ainsi obtenir un compactage parfaitement homogène dans toute la pièce.

Injecter le gaz à 97% de remplissage a permis de diminuer la force de fermeture de plus de 500 tonnes (50 kN) par rapport à une pièce équivalente réalisée en injection traditionnelle.

Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	Ultradur PBT / ASA 30% FV S4090G6
Alimentation matière	7 busettes chaudes
Injection de gaz	10 injecteur couplés en 2 voies
Temps de cycle:	142 s
Pression de gaz:	Voie 1: 100 bar
	Voie 2: 120 bar



Section à proximité de l'injecteur gaz N°8

Cette section met en évidence l'intérêt de l'injection assistée par gaz pour assurer la phase de compactage.



Figure 7b



Figure 7c: intersection des veines



Figure 7d

## 2.12 Comodo

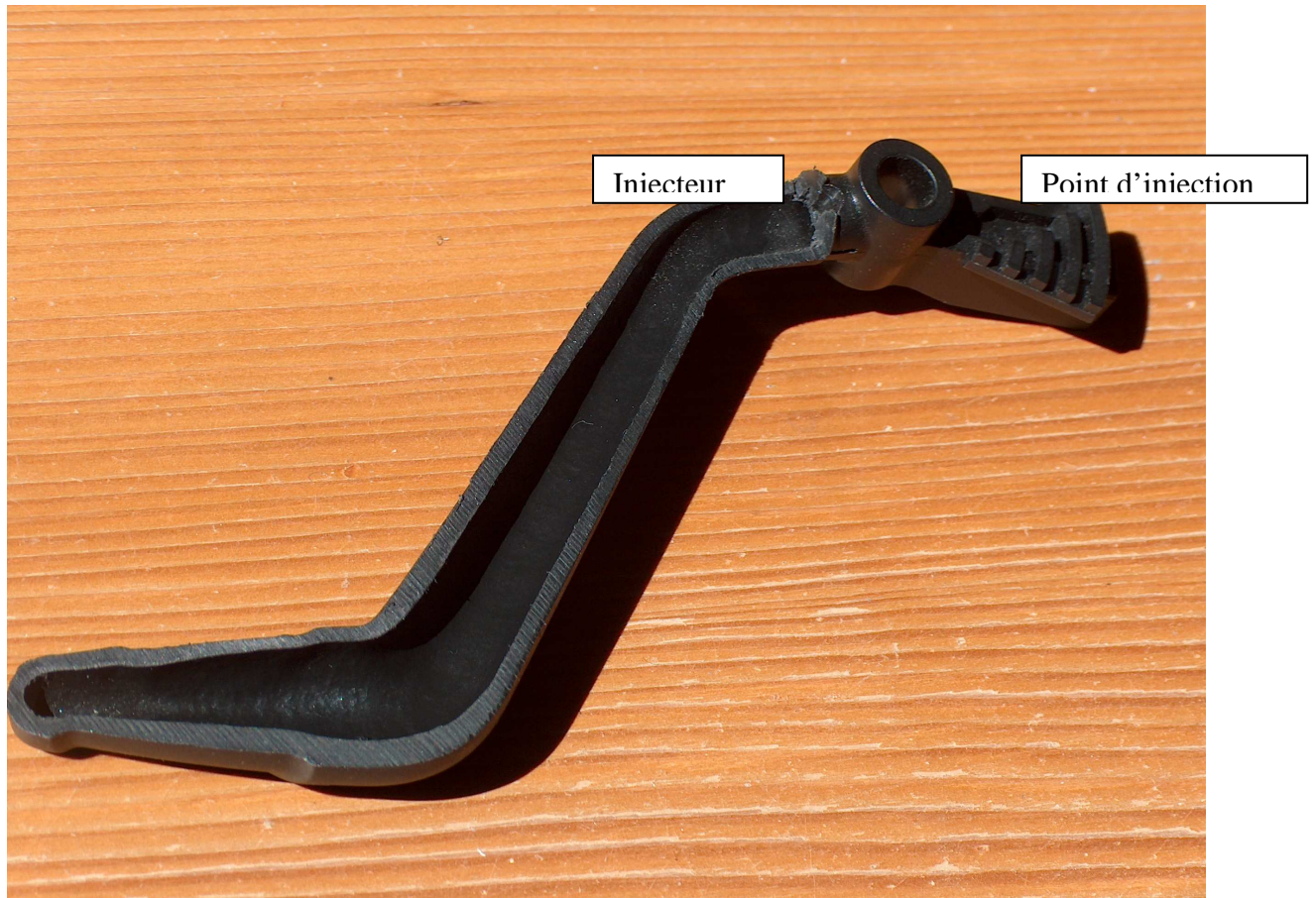


Figure 8: Coupe longitudinale du comodo

### But recherché:

Pièce typique parfaitement adaptée au remplissage partiel, technique avec la quelle on cumule tous les gains possibles de l'injection assistée par gaz. L'injecteur gaz a été positionné de façon à répondre au cahier des charges mécaniques devant permettre une rupture au delà d'une charge statique de 10 kg dans les trois directions.

Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	polybutylène téréphtalate 30%FV
Alimentation matière	1 busette chaude sur canal froid
Injection de gaz	1 busette
Temps de cycle:	42 s
Pression de gaz:	20 bar

## 2.13 Tablette arrière de l'Audi TT

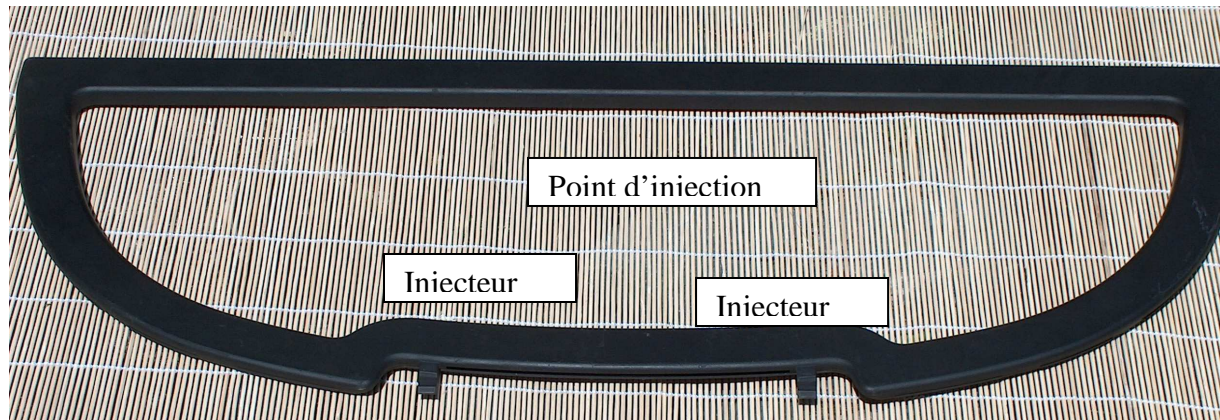
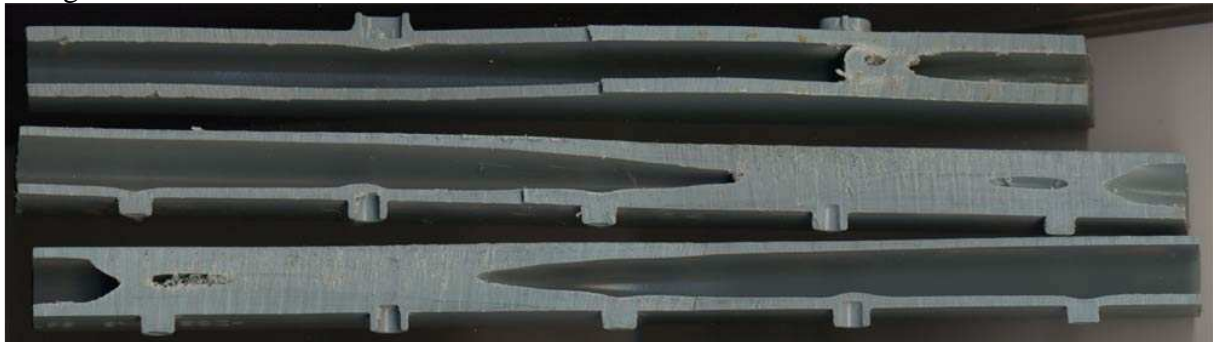


Figure 9a

### But recherché:

Injecter une section pleine de 45 mm x 15 mm ne peut pas être considéré comme une solution ni technique ni économique satisfaisante. Réaliser des économies matière et de temps de cycle est l'objectif de tout transformateur. Nous avons raccordé les deux veines gaz qui étaient à l'origine séparées par une restriction de faible épaisseur.

Figure 9b



En remplissage partiel, la longueur des bulles est fonction du dosage, en optimisant la quantité de matière injectée, on arrive à supprimer l'amas matière entre les deux bulles.



Figure 9c : Le gaz prend toujours le chemin le plus court

<u>Procédé utilisé:</u>	Remplissage partiel
Matière:	mélange 85% de polycarbonate et de 15 % d'acrylonitrile-butadiène-styrène
Alimentation matière	1 busette chaude sur canal froid
Injection de gaz	2 busettes
Temps de cycle:	125 s
Pression de gaz:	90 bar

## 2.14 Garnissage de boîte à gants

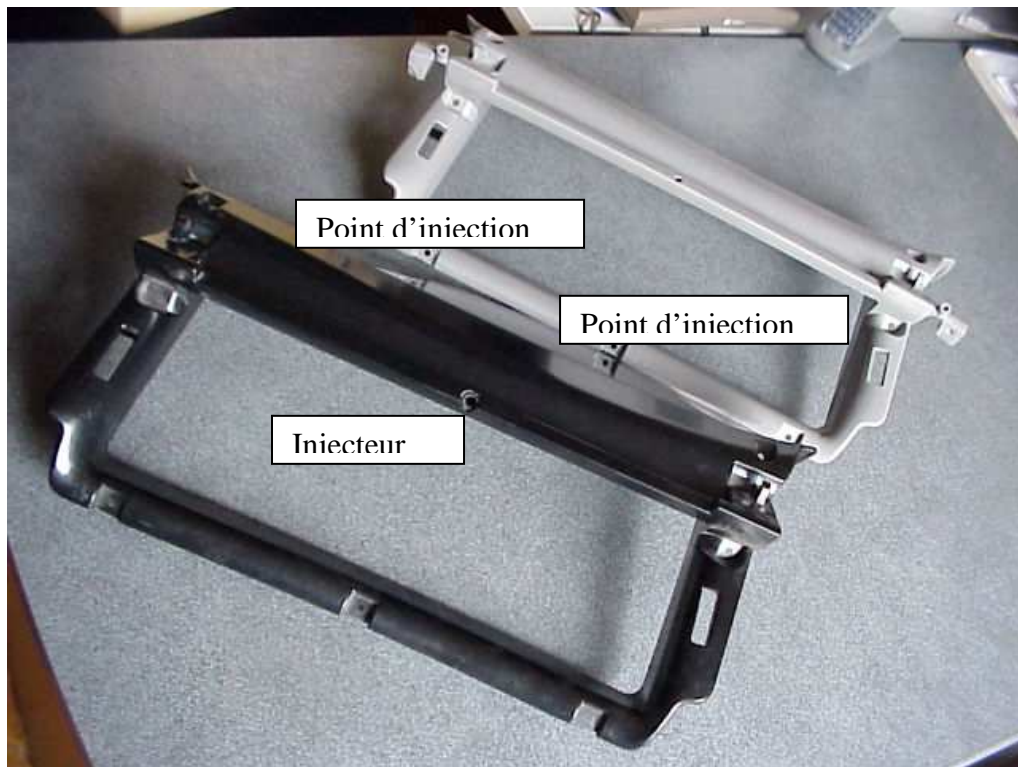


Figure 10

### But recherché:

Renforcer la pièce au niveau du « coup de genou » est le seul objectif de la veine gaz. Cette pièce étant dans une premier temps produite avec deux masselottes, l'objet de l'étude a été de les supprimer, le transformateur ayant été averti par le propriétaire de ce brevet.

Procédé utilisé:            Masselottes (pièce du haut)  
                                      Remplissage partiel (pièce du bas)

Matière:                        mélange de polycarbonate à 65% et d'acrylonitrile butadiène  
   styrène à 35%

Alimentation matière        1 busette chaude sur canal froid alimentant deux seuils

Injection de gaz                1 injecteur

Temps de cycle:                125 s

Pression de gaz:                90 bar

Ce cas montre qu'en étudiant avec soin et la géométrie de la pièce et le procédé, on peut réaliser des gains considérables tant en poids pièce qu'en coûts de production.

## 2.2 ELECTROMENAGER

Quelques applications

- poignées
- carénages de tondeuses à gazon
- carénages d'ordinateurs
- carénages de télévision
- capot d'aspirateur

### 2.21 Poignée de verseuse

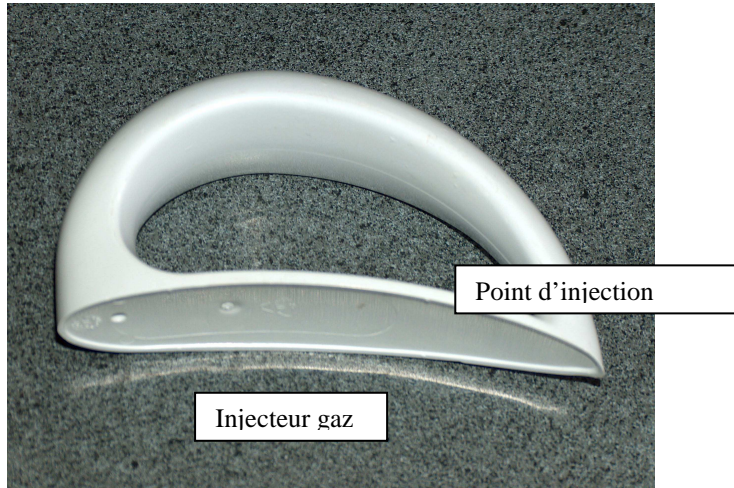


Figure 11a

But recherché:

Par rapport à une pièce équivalente au niveau design, les gains suivants ont pu être réalisés sur cette pièce:

- réduction de poids (25%)
- réduction du coût de l'outillage
- réduction du temps de cycle
- diminution de la force de fermeture

Procédé utilisé: Remplissage partiel

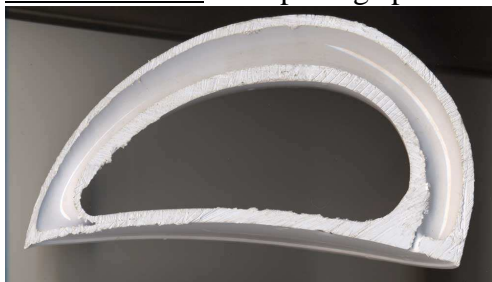


Figure 11b: Coupe longitudinale de la poignée

Matière:	Acrylonitrile Butadiène Styrène
Alimentation matière	canal froid
Injection de gaz	1 busette
Temps de cycle:	45 s
Pression de gaz:	25 bar
Nombre d'empreintes	1

## 2.22 Grill de table

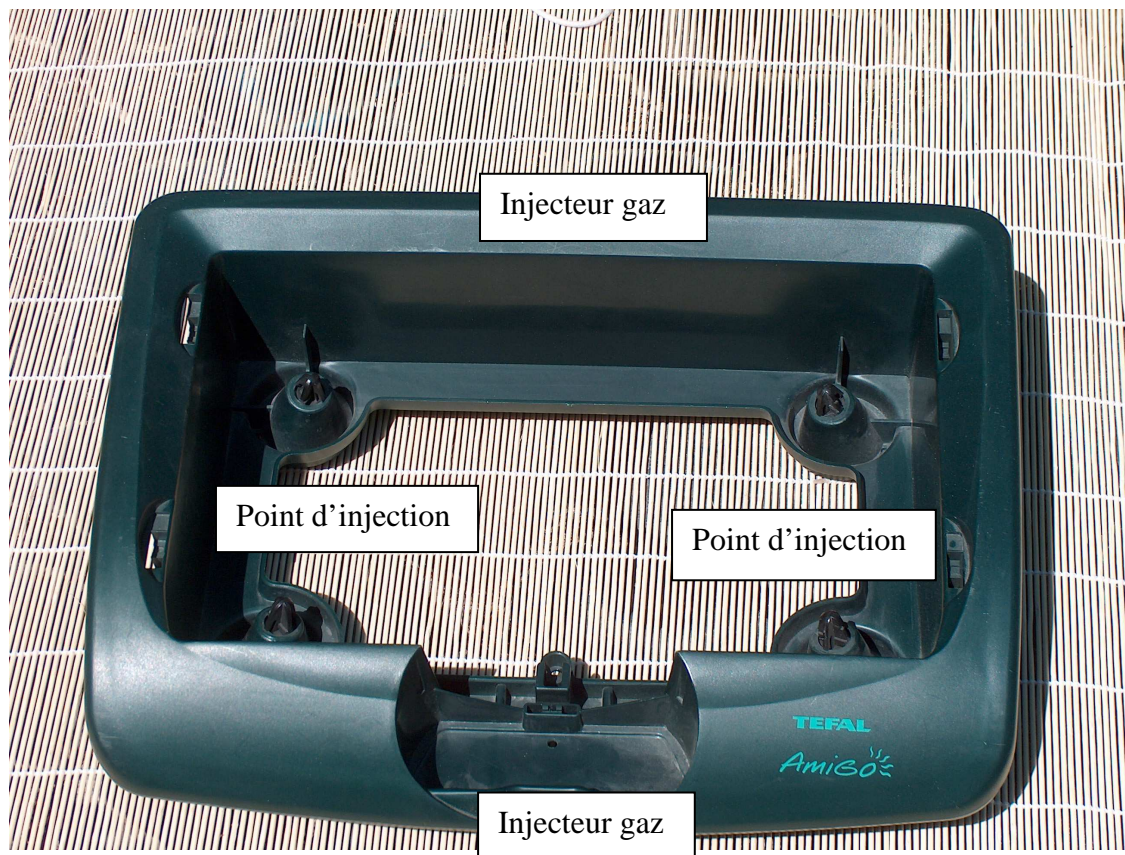


Figure 12

### But recherché:

Afin d'obtenir la meilleure rigidité, la veine gaz ceinture la pièce sur sa périphérie. L'épaisseur générale de cette pièce est de 2.4 mm et pour éviter le phénomène d'inflorescences (pénétrations de gaz autour de la veine) nous avons proposé un diamètre hydraulique de 13 mm pour la section du canal.

Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	polypropylène 20% talc
Alimentation matière	1 busette chaude sur canal froid vers 2 seuils
Injection de gaz	2 injecteurs
Temps de cycle:	62 s
Pression de gaz:	90 bar

## 2.23 Capot d'aspirateur

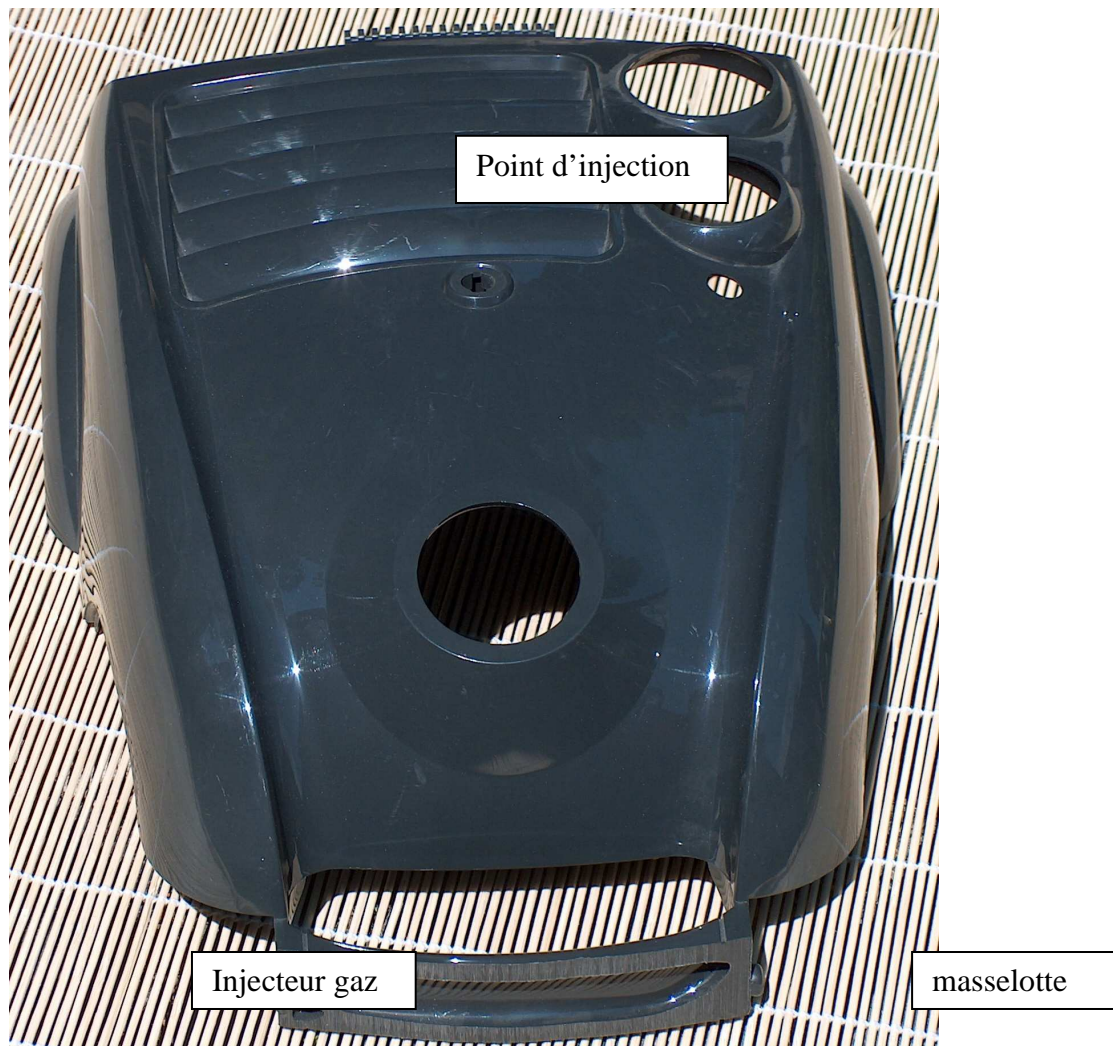


Figure 13

### But recherché:

La poignée de l'aspirateur est une zone sensible étant donné que c'est la zone interface avec l'utilisateur. Il fallait donner à l'utilisateur l'idée de robustesse et éviter un renfort mécanique par nervures. Le point d'injection matière a été positionné de façon à pouvoir transformer la pièce avec le procédé de remplissage partiel.

Procédé utilisé: procédé avec masselotte (Ladney)

Matière:	Acrylonitrile Butadiène Styrène
Alimentation matière	1 busette chaude directe
Injection de gaz	1 injecteur
Temps de cycle:	45 s
Pression de gaz:	90 bar



## 2.24 Poignée de mixer

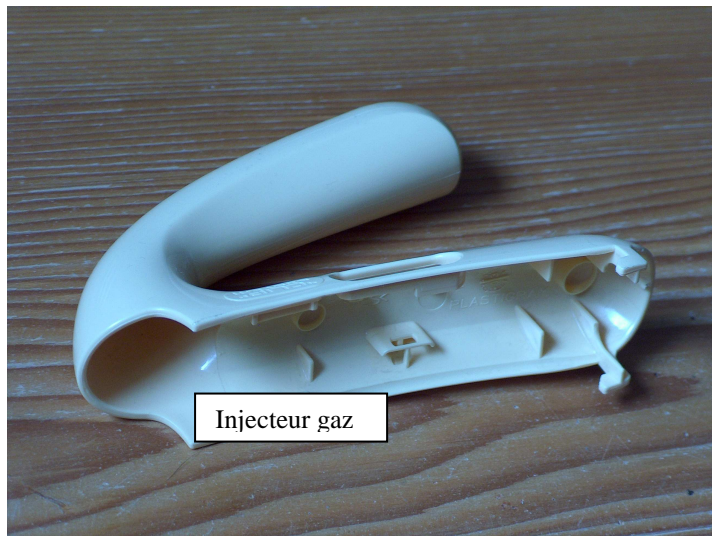


Figure 14a: Vue de la zone de faible épaisseur

### But recherché:

Par rapport à une pièce équivalente au niveau design, les gains suivants ont pu être réalisés sur cette pièce:

- réduction de poids (25%)
- réduction du coût de l'outillage
- réduction du temps de cycle
- diminution de la force de fermeture



Figure 14b: Coupe longitudinale

Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	Acrylonitrile Butadiène Styrène
Alimentation matière:	1 busette chaude
Injection de gaz:	1 injecteur
Temps de cycle:	28.6 s
Pression de gaz:	30 bar

## 2.3 AMEUBLEMENT

Ci dessous, nous avons listé des pièces sur lesquelles nous avons déjà travaillé et donnons plus de détails sur certaines d'entre elles.

- accoudoirs
- piétements de chaise
- coquilles de dossiers
- assises de sièges
- boîtiers
- accessoires de salle de bain
- mobilier de jardin
- plateau de meuble de cuisine

### 2.31 Plateau de meuble de cuisine

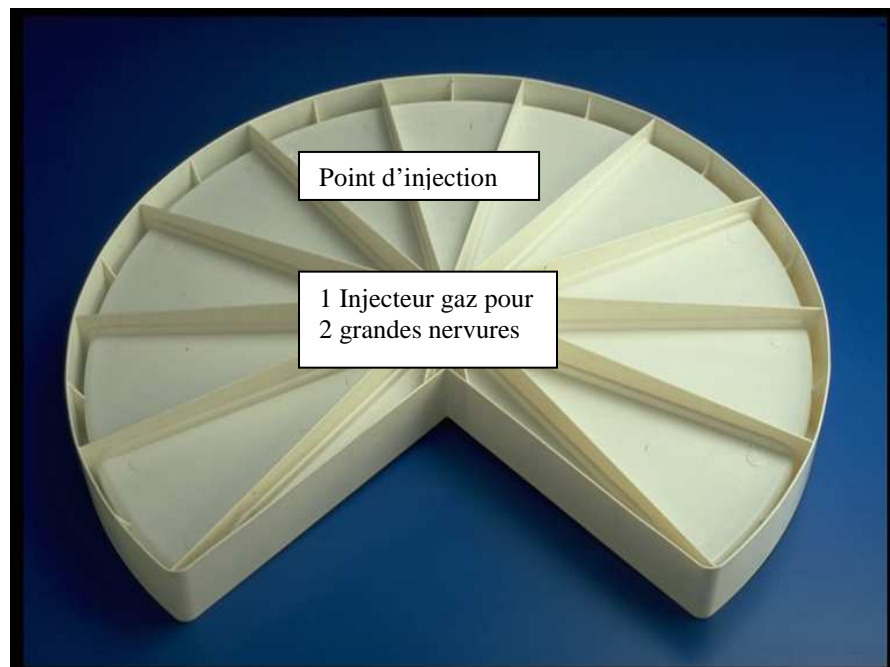


Figure 15

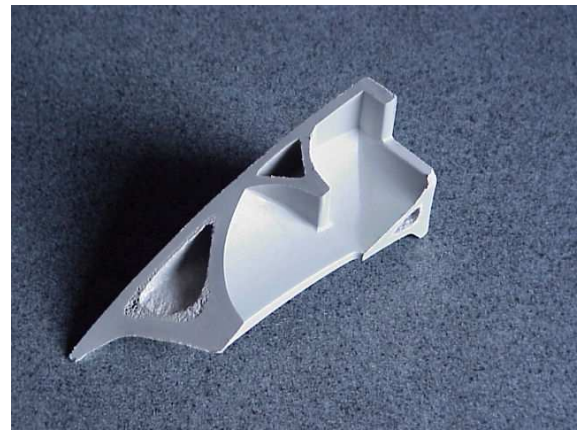
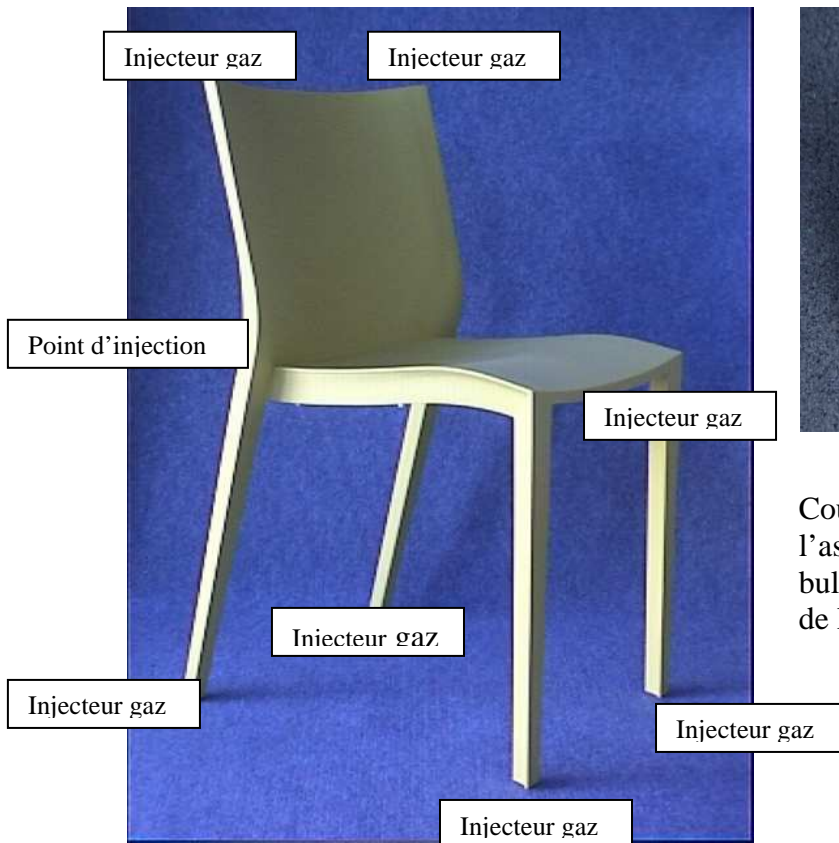
#### But recherché:

Sous charge, des nervures classiques de cette hauteur avaient une forte tendance à se voiler et à blanchir. Nous avons positionné une veine gaz au pied de la nervure, à l'intersection avec le plateau. De cette façon, nous avons créé un effet tube qui, au niveau mécanique est bien plus rigide que la nervure plate.

Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	polypropylène
Alimentation matière	canal froid
Injection de gaz	6 injecteurs
Temps de cycle :	45 s
Pression de gaz :	90 bar

## 2.32 Chaise Philippe Starck



Coupe du coin supérieur gauche de l'assise, on voit la connexion entre la bulle du pied, de la nervure latérale et de la nervure frontale. Figure 16b

Figure 16a

### But recherché:

Le cahier des charges d'une chaise de collectivités demande une résistance en statique à 120 kg et à 90 kg en basculement dans les deux directions. Pour atteindre cet objectif, il a fallu renforcer tant les pieds, que l'assise et le dossier par des nervures de forte dimension. Ces contraintes mécaniques ajoutées à celles du design ont imposé à certains endroits des sections trapézoïdales de 40 mm x 30 mm. Réaliser cette pièce de façon classique condamnait la viabilité économique du projet. C'est pour cette raison que toutes les nervures ont été évidées grâce au procédé d'injection assistée par gaz.

Procédé utilisé: Refoulement dans le fourreau

Matière:	polypropylène chargé à 20% de talc
Alimentation matière	canal froid
Injection de gaz	7 injecteurs (chaque pied, chaque nervure du dossier, nervure frontale)
Temps de cycle :	142 s
Pression de gaz :	90 bar
Poids pièce	2.8 kg

## 2.4 BRICOLAGE

Quelques applications

- pinceaux
- poignées de taloche
- pelle à neige
- raclette de dégivrage

### 2.41 Manche de pinceau

Figure 17b: Coupe longitudinale

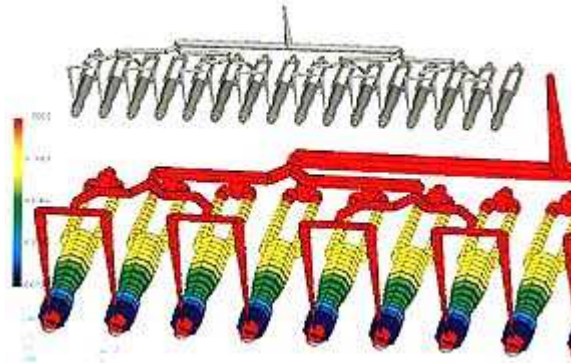


Figure 17a: injection matière sur moule 3 plaques

#### But recherché:

Afin de faciliter la préhension des manches de pinceaux, ceux-ci avaient toujours une section conséquente et étaient réalisés en injectant à cœur un agent gonflant. Cette technologie permettait de réaliser de faibles économies de matière. L'intérêt de l'IAG est d'augmenter l'économie matière et de substantiellement diminuer le temps de cycle. Par rapport à une pièce équivalente au niveau design, les gains suivants ont pu être réalisés sur cette pièce:

- réduction de poids (35%)
- réduction du coût de l'outillage
- réduction du temps de cycle
- diminution de la force de fermeture

Figure 17c: Grappe d'injection



Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	polypropylène
Alimentation matière	1 busette chaude sur canal froid
Injection de gaz	1 busette
Temps de cycle:	42 s
Pression de gaz:	45 bar

## 2.42 Raclette de dégivrage

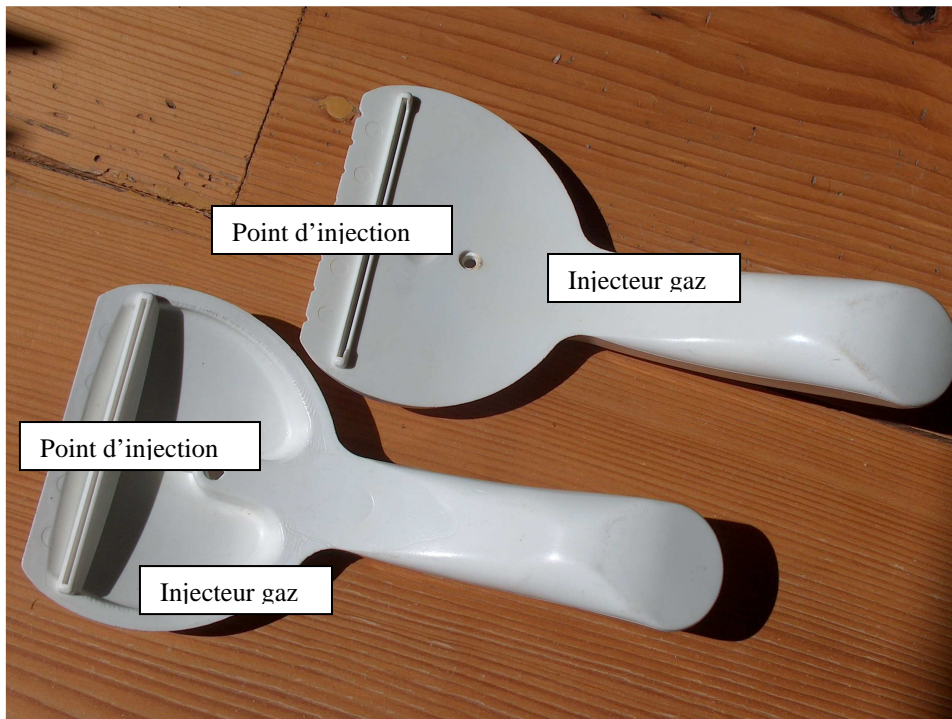


Figure 18a: Géométrie d'origine en haut à droite, géométrie optimisée en bas à gauche

### But recherché:

Par rapport à une pièce équivalente au niveau design, les gains suivants ont pu être réalisés sur cette pièce:

- réduction de poids (45%)
- réduction du coût de l'outillage
- réduction du temps de cycle
- diminution de la force de fermeture



Figure 18b: Coupe longitudinale avec visualisation d'un amas matière important sur la pièce du haut

<u>Procédé utilisé:</u>	Remplissage partiel
Matière:	Acrylonitrile Butadiène Styrène
Alimentation matière	1 busette directe
Injection de gaz	1 busette
Temps de cycle:	82 s
Pression de gaz:	15 bar

## 2.43 Pelle à neige

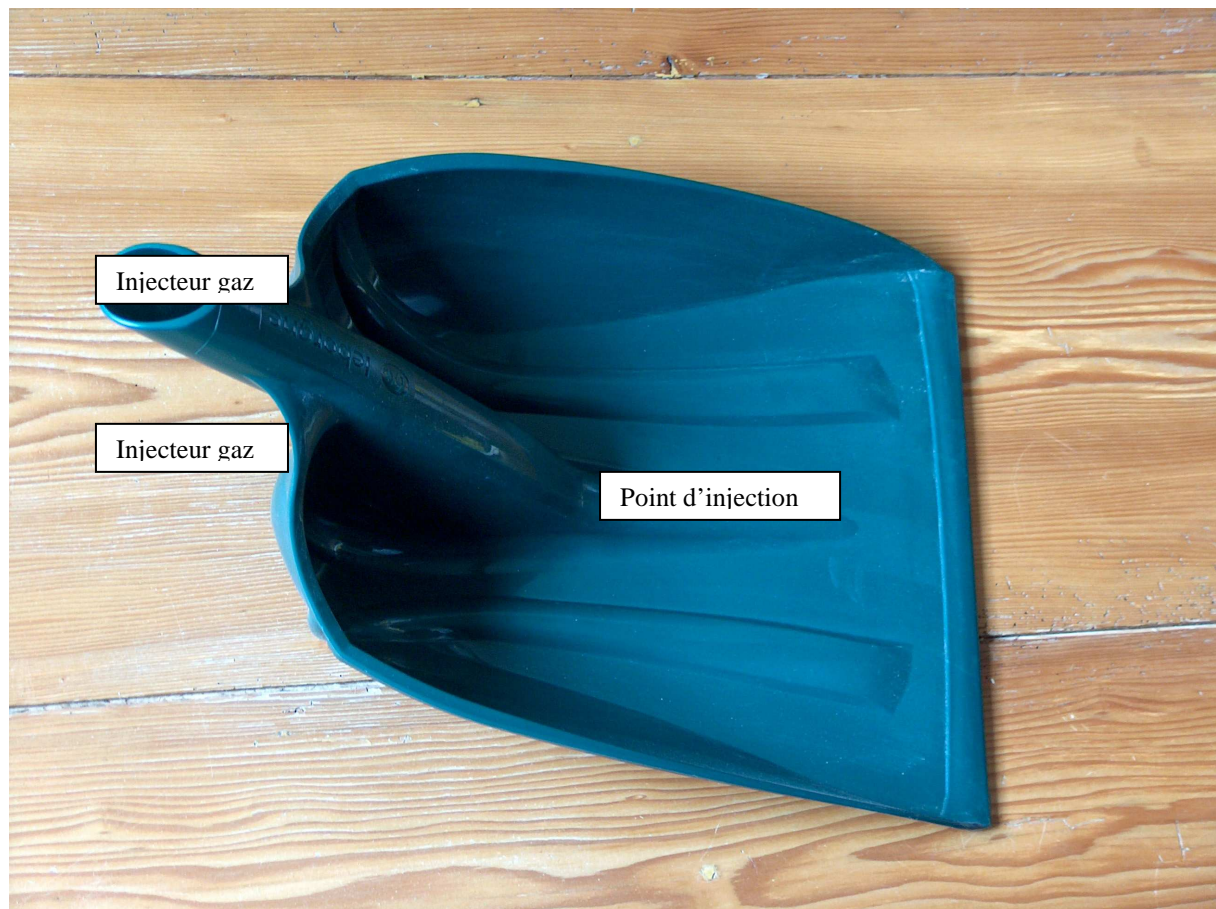


Figure 19

### But recherché:

Afin d'obtenir la meilleure rigidité, la veine gaz ceinture la pièce sauf sur la lame d'attaque. L'épaisseur générale de cette pièce est de 3 mm. Le gaz a été utilisé pour obtenir l'effet tube près de la zone de l'emmanchement.

Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	polypropylène
Alimentation matière	1 busette directe
Injection de gaz	2 injecteurs
Temps de cycle :	
Pression de gaz :	

## 2.44 Caisse de bouteilles

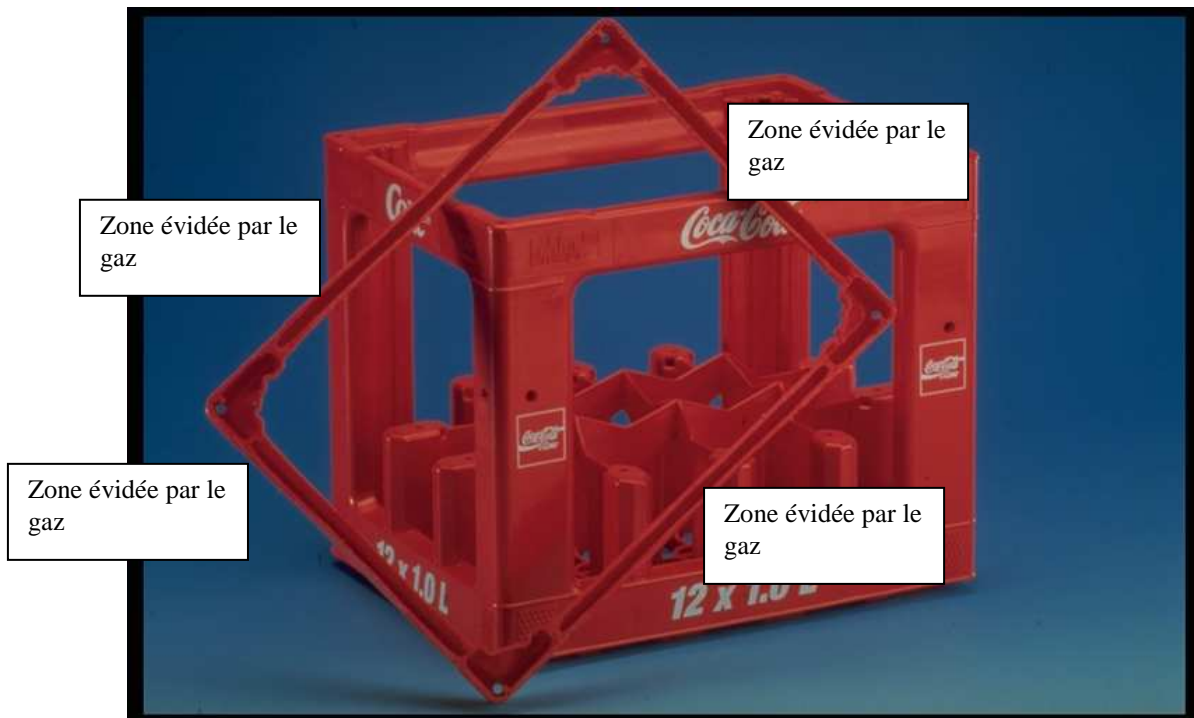


Figure 20  
Document Battenfeld

### But recherché:

Afin d'obtenir la meilleure rigidité et un meilleur toucher pour l'utilisateur, toutes les zones de préhension sont évidées par 4 noyaux mobiles.

Procédé utilisé: Création de la bulle de gaz par déplacement de noyaux mobiles

Matière:	polyéthylène haute densité
Alimentation matière	4 busettes directes
Injection de gaz	4 injecteurs ( un injecteur par noyau mobile)
Temps de cycle :	
Pression de gaz :	

## 2.5 PUERICULTURE

### 2.51 Poignée de siège bébé

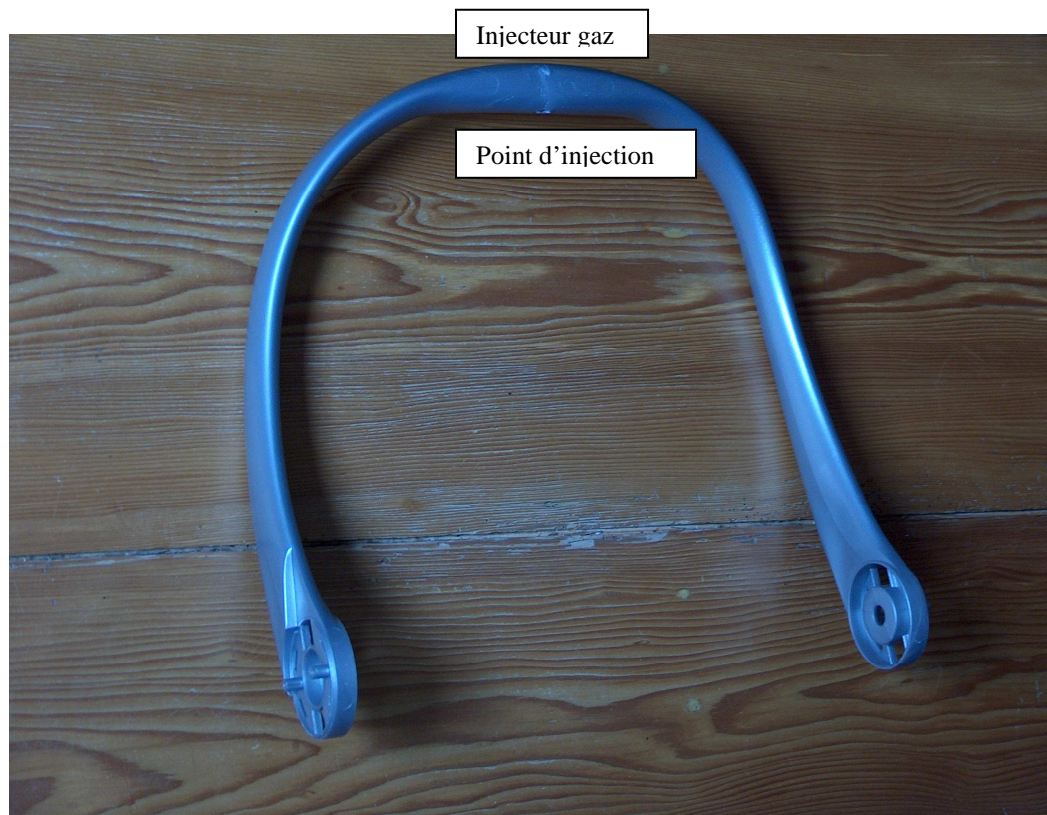


Figure 21a

#### But recherché:

Par rapport à une pièce équivalente au niveau design, les gains suivants ont pu être réalisés sur cette pièce:

- réduction de poids (25%)
- réduction du coût de l'outillage
- réduction du temps de cycle
- diminution de la force de fermeture



Figure21b: Coupe transversale

Procédé utilisé: Remplissage partiel

Matière:	polypropylène
Alimentation matière	1 busette chaude sur canal froid
Injection de gaz	1 injecteur
Temps de cycle:	42 s
Pression de gaz:	145 bar



**Jean-Luc DREYER**

SIMPLAST

# Réduire les coûts de production en injection : l'Injection Assistée par Gaz peut être une solution !

## Il y a déjà 20 ans,...

Ce procédé provoquait une certaine euphorie auprès des transformateurs de matières plastiques qui voyaient là une technologie innovante et qui permettait de se démarquer commercialement par rapport aux concurrents.

Vint ensuite une période de désillusions causées essentiellement par des arcanes juridiques liées au procédé faisant appel à des masselottes. Bien sûr, il y a aussi eu des désillusions dues aux problèmes techniques liés à la mise en œuvre du procédé en particulier pour les pièces d'aspect.

## De nouvelles applications

Aujourd'hui, les applications de l'IAG se diversifient et l'on trouve des applications dans des domaines aussi variés que le médical, le bricolage et l'ameublement. Il y a encore

10 ans, on considérait que le procédé était «réservé» à l'automobile et aux façades de téléviseurs. Cette récente évolution est due à la créativité dont ont fait preuve les designers et bureaux d'études.

Ce procédé est arrivé aujourd'hui à maturité et l'on commence à lui redécouvrir un intérêt économique. Les gains traditionnellement reconnus de l'IAG sont:

- amélioration de la qualité par la suppression de retassures
- gain matière
- renfort mécanique
- diminution de la force de fermeture

## Toujours plus de gains

Aujourd'hui, on pourra ajouter à cette liste:

- amélioration de la phase de compactage
- utilisation possible de bloc chaud
- possibilité de concevoir des moules multi-empreintes
- simplification de l'outillage

par suppression de mouvements

Cependant, ces gains ne peuvent être réalisés qu'en mettant en œuvre le procédé de remplissage partiel de l'empreinte. Parmi tous les procédés d'injection du gaz, il est aujourd'hui admis que l'emploi des masselottes était une fausse bonne idée et présente bien plus d'inconvénients que d'avantages:

- aucune réduction de force de fermeture
- recyclage des masselottes quand cela était nécessaire
- augmentation du temps de cycle car nécessité de refroidir les masselottes
- quasi-impossibilité d'avoir plus de 4 empreintes
- pression d'injection de gaz très importante

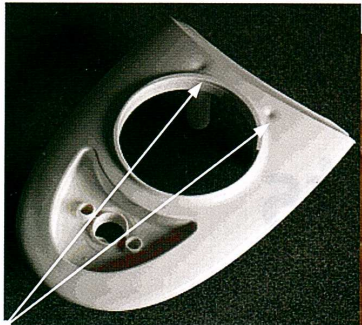
Une expérience récente a montré un gain cumulé de 22% entre la pièce produite en injection classique et la pièce réalisée en injection assistée par gaz.

## Comment est-ce possible ?

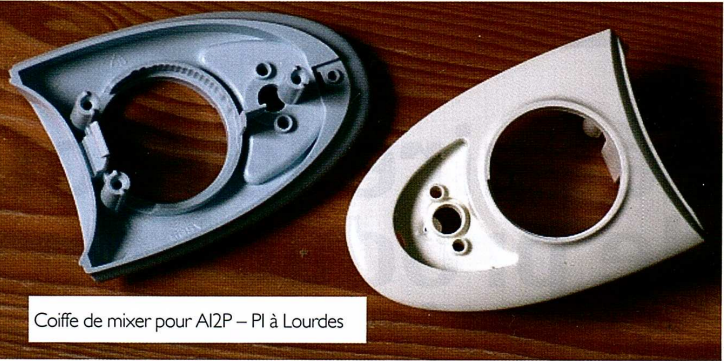
### Améliorer la phase de compactage

En fin d'injection dynamique, la commutation en pression est généralement réalisée entre 96% et 99% du volume de la cavité. C'est lors de cette phase de compactage que la force de fermeture va croître de près de 30%. Par ailleurs, on provoquera un gradient de pression entre le point d'injection et la dernière zone remplie. L'idée est de remplacer le champ de pression classiquement appliqué par la vis par une injection d'azote sous pression. On aura bien sûr pris la précaution d'aménager une légère surépaisseur de façon à guider le gaz dans la veine chaude. C'est ce qui est plus ou moins bien réalisé sur les façades de téléviseurs.

Par ailleurs, tout transformateur sait que la phase de compactage est une des causes



Phénomènes de retassures dues à un manque de maintien en pression



Coiffe de mixer pour AI2P – PI à Lourdes

principales des déformations d'une pièce injectée. Le gaz s'infiltrant jusqu'aux extrémités permettra un compactage à pression homogène dans toute la pièce. Le gradient de pression étant alors considérablement réduit, on diminuera d'autant les déformations dues aux conditions d'injection.

Mais ce gain n'est réalisable qu'en utilisant le procédé de remplissage partiel par opposition aux procédés qui demandent un remplissage complet de la cavité. Bien évidemment, le gaz pourra être maintenu pendant la totalité du cycle d'injection avec une évacuation quelques secondes avant l'ouverture du moule. Cette injection de gaz maintenue permet de supprimer des phénomènes de décollement de la matière de la paroi du moule lors de la phase de refroidissement. Certains phénomènes de brillance peuvent être supprimés simplement en injectant un peu de gaz en toute fin d'injection dynamique.

Pour avoir un champ de pression parfaitement homogène dans une pièce IAG, la solution idéale est de connecter toutes les veines gaz de façon à ce qu'elles communiquent entre elles annulant ainsi le gradient de pression. Il est intéressant

de remarquer que le niveau de pression du gaz aura alors une influence directe sur le dimensionnel de la pièce.

Pourtant, aujourd'hui encore, on trouve dans la littérature l'affirmation que deux bulles de gaz ne peuvent se rencontrer et laissent entre elles un matelas matière générateur de retassures. Mais, lorsque la géométrie de la pièce a été optimisée, lorsque les injecteurs ont été positionnés et raccordés de façon optimale, on peut observer la connexion quasi parfaite des différentes bulles de gaz. Une bulle repoussera l'autre en retapissant le matelas de matière contre les parois. Le résultat le plus spectaculaire avait été

	injection classique	injection assistée par gaz
Poids pièce	42,4 g	36,2 g
Temps de cycle	47 s	28 s

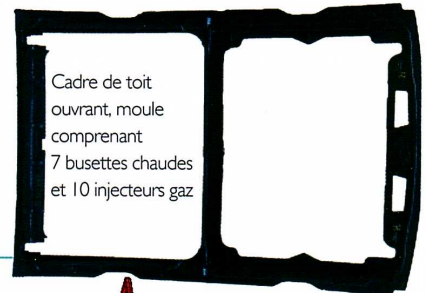
obtenu sur la tablette arrière de l'AUDI TT transformée chez JOHNSON CONTROLS Wüppertal (D). Cette pièce de 864 mm de longueur est parfaitement plane et ne présente aucune déformation.

certaines versions d'un grill de table et de coiffe de mixer.

#### Utiliser un bloc chaud

Contrairement à des idées reçues, utiliser un bloc chaud en IAG est tout à fait possible, il suffit de prendre des précau-

A chaque fois que nous avons réussi à reproduire ce phénomène, nous obtenions une pièce sans la moindre déformation et sans la moindre retassure. On pourra citer



Cadre de toit ouvrant, moule comprenant 7 buses chaudes et 10 injecteurs gaz



tions et en particulier munir les busettes d'obturateurs. Par contre l'utilisation d'un bloc chaud pour un moule multi-empreintes présente plus d'inconvénients que d'avantages. En effet, il est quasiment impossible d'équilibrer parfaitement des busettes chaudes et un écart de plus de 0.5% en masse injectée entre les empreintes aura pour conséquence un taux de rebut important.

#### Utiliser des moules multi-empreintes

Mettre en œuvre l'AG en remplissage partiel sur des outillages multi-empreintes présente de nombreuses difficultés. La principale difficulté est d'équilibrer parfaitement le remplissage. Sur des pièces de 15 g, on ne peut accepter que 0.5% d'écart d'une cavité à l'autre au risque d'avoir des défauts d'aspect ou des taux de rebuts rédhibitoires. Cette formidable contrainte de précision dans le remplissage condamne les blocs chauds. L'équilibrage naturel est la solution la plus simple. Mais cela ne suffit pas, il faut appliquer exactement les mêmes règles pour la partie gaz et pour la partie circuits

de refroidissement. Il faut que toutes les empreintes soient refroidies exactement de la même façon pour ne créer ni point chaud, ni point froid pouvant ralentir ou accélérer le flux matière.

#### Simplifier l'outillage

Une autre application de l'AG peut être de supprimer des mouvements dans un outillage, pour sortir une contre-dépouille par exemple.

une coque de rétroviseur dont une bande épaisse était évitée par une lame métallique. Malheureusement, cette lame se cassait de façon presque systématique. En la supprimant, et en injectant du gaz au bon endroit, non seulement le problème de casse du moule a été résolu, mais en plus on a amélioré le design de la coque.

#### Gagner encore plus et cette fois-ci, gagner en temps de développement

A l'apparition des codes de calculs de simulation, la majorité des transformateurs utilisaient les études de remplissage comme argument commercial. Cette démarche a perduré un certain temps mais maintenant tout bureau d'étude est pourvu de logiciels de simulation de remplissage. Ces outils de simulation ont bien évidemment un coût tant technique qu'humain et trouver une rentabilité n'est pas chose aisée sauf à y pratiquer de façon systématique.

Aujourd'hui, les transformateurs ne sont plus prêts à payer une étude de rhéologie aux belles couleurs.

La simulation comme chacun sait permet de valider la meilleure adéquation design, matière, procédé, avant tout engagement en outillages coûteux. La simulation permet de se passer de moules prototypes et de phases d'essais et de mises au point qui s'avèraient longues. Ces études

doivent permettre de faire mieux, plus vite et moins cher.

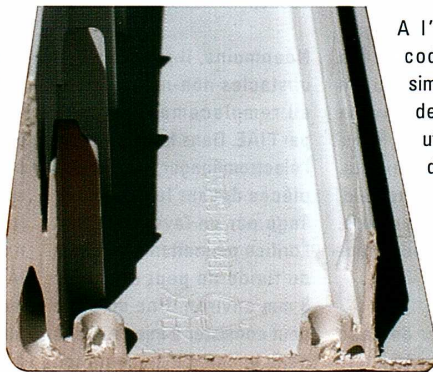
**Faire mieux**, c'est d'abord éviter toutes les modifications de position du ou des points d'injection et éviter les tâtonnements lors des phases de mise au point.

**Plus vite**, car les délais de développements imposés par les grands donneurs d'ordres ont été réduits considérablement ces dernières années.

**Moins cher**, pour conserver ses clients mais aussi pour montrer que l'innovation est une volonté constante.

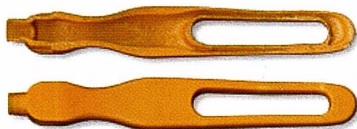
Autant en injection classique, tout ingénieur plasturgiste a suivi dans son cursus un module de formation aux outils de simulation lui permettant de prévoir avec une bonne précision le comportement de la matière lors du cycle d'injection.

Par contre, la mise en œuvre des procédés exotiques devient plus problématique. Produire des images en couleurs en montrant une bulle de gaz est à la portée de tout utilisateur de ces logiciels. Mais sans le recul de l'expérience, ces compétences théoriques s'avèrent souvent insuffisantes. Dans la littérature, rares sont les exemples d'applications expliquées et détaillées et même rien ne ressemble plus à une poignée de virage qu'une autre poignée et ce que l'on a appris sur la première n'est pas forcément applicable à la suivante. Ainsi, en injection assistée par gaz, il faut prendre en compte dans le polymère l'écoulement d'un fluide avec une viscosité quasi nulle.

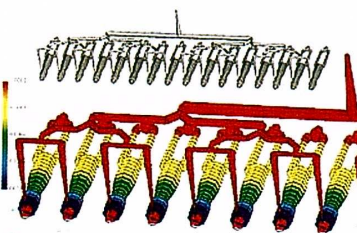


Enjoleur de réfrigérateur où la veine gaz a permis de supprimer un mouvement.

Tout le monde sait qu'un mouvement dans un moule coûte cher et injecter du gaz au bon endroit peut permettre de résoudre le problème. Très récemment, nous avons étudié



Pinceaux pour Hirson  
Injection en moule 16 empreintes



- > matière : PP
- > réduction du poids pièce : 30%
- > réduction du temps de cycle : 25%

La combinaison de ces deux écoulements est souvent très compliquée ; pour l'une ou l'autre pièce, l'étude de rhéologie a permis de conclure à la non-faisabilité de la pièce avec le procédé d'injection assistée par gaz. Il est tout de même plus économique de faire une étude pour valider les choix technologiques que de multiplier des modifications d'outillage et journées d'essais pour aboutir au même constat d'échec. Si l'étude de simulation en injection assistée par gaz est menée dans les règles et avec rigueur, deux à trois journées de mise au point suffisent pour valider la qualité de la pièce.

Les logiciels permettent ainsi de donner avec précision :

- la position exacte du ou des points d'injection matière
- la position exacte du ou des points d'injection du gaz
- le poids pièce
- le pourcentage de gaz
- la pression d'injection du gaz
- le temps de cycle

Ces informations sont suffisantes pour dimensionner l'installation des périphériques nécessaires à la mise en œuvre du procédé d'injection assistée par gaz. Ainsi, injecter le gaz à 50 bar n'a pas du tout les mêmes conséquences sur le prix final de la pièce que de devoir l'injecter à 150 bar. Entre les deux options, une installation type cadres suffit alors que l'option haute pression implique l'investissement d'un compresseur et peut être même d'un générateur sur site en fonction du volume.

#### Petite introduction à l'injection assistée par eau

Comme pour l'injection assistée par gaz il y a 20 ans, l'in-

jection assistée par eau est aujourd'hui à la mode et est même qualifiée de procédé miracle au vu des avantages qu'elle présente. Après l'engouement des deux premières années, le réalisme a prévalu et en pratique relativement peu de transformateurs ont franchi le pas: ils sont deux aujourd'hui en France et une quarantaine en Europe.

#### Qui ne parle pas d'Injection Assistée par Eau ?

Depuis 1999, date de la première publication faite par l'IKV de Aachen, la bibliographie concernant ce procédé s'est bien étoffée. Ainsi, on pourra signaler les travaux de Schulman, Bayer Polymers (aujourd'hui Lanxess), PME Fluidtec, DK, Battenfeld, Engel, Dupont de Nemours, Rhodia, CGI et Bauer Compresseurs.

L'intérêt d'injecter de l'eau est évidemment de réduire le

temps de cycle en évacuant de façon plus efficace les calories emprisonnées dans la bulle générée par le fluide. Contrairement au gaz qui présente une capacité calorifique quasi nulle et ne peut donc stocker cette énergie, l'eau peut emmener ces calories à l'extérieur et cela simplement par conduction.

En faisant le tour des grands salons professionnels, on pourra trouver beaucoup de pièces de démonstration, rares sont encore les pièces en production.

Néanmoins, il subsiste des obstacles non-négligeables au remplacement de l'IG par l'IAE. Dans le domaine de l'électroménager, et pour des pièces devant faire un passage par un lave-vaisselle, l'orifice permettant l'injection du fluide ne peut dépasser 3 mm environ. Une solution peut consister à injecter l'eau dans le canal d'alimentation

de la matière, mais alors il faut largement surdimensionner le seuil d'injection pour permettre un passage de l'eau. Des précautions sont donc à prendre avant de se lancer dans ce procédé très prometteur.

L'IAE, très attractive, présente aujourd'hui des difficultés techniques importantes.

- dimensions de l'injecteur eau
- régularité de l'écoulement de l'eau
- bulles parasites dans les zones de fortes épaisseurs
- montant de l'investissement
- qualité de l'état de surface en remplissage partiel

Une société allemande TiK a imaginé un procédé combinant IAG et IAE, un gaz (azote ou air) générant la bulle et l'eau refroidissant la matière. Obtenir des pièces d'aspect en IAG n'est pas toujours simple, mais avec de l'eau cela relève du cercle.



Poignée de mixer pour VORWERK-SEMCO  
Matière: PA 6-6 30%FV de SCHULMAN – Système IAE: PME FLUIDTEC

Lorsque l'on aura trouvé la solution pour mettre en œuvre le remplissage partiel en IAE tout en ayant un aspect de surface impeccable, on pourra alors imaginer des gains économiques considérables. Pour le moment, la mise en œuvre de l'IAE est majoritairement réalisée en intégrant une ou plusieurs masselottes.

Lorsque l'on examine avec soin les coûts et les gains potentiels, on se rend compte que les gains obtenus en temps de cycle sont amputés par un surcoût lié aux difficultés à mettre en œuvre l'IAE. L'investissement en matériel et périphériques est sensiblement plus lourd que pour l'IAG d'autant plus que l'on ne peut bénéficier de la réduction de taille de presse dû à la mise en œuvre du procédé de remplissage partiel. L'IAE sera réalisée sur une presse de dimension équivalente à une injection standard mais équipée de

## Présentation

*Simplast est un bureau d'études créé en 1998 spécialisé dans la mise en œuvre des matières plastiques par des procédés d'injection assistées par fluides (gaz ou eau). Les prestations de Simplast sont très variées et peuvent débiter dès l'étude de faisabilité et se terminer au démarrage de la production en passant par une étape de simulation rhéologique, puis une phase d'essais sur site et même par des périodes de formation des personnels à ce procédé. Les études rhéologiques sont menées soit avec le logiciel Moldflow, soit avec le logiciel REM3D, et même avec ces deux outils si cela s'avère nécessaire. Pour la phase d'essais sur site, Simplast dispose des matériels de mise en œuvre pour valider le procédé et surtout pour quantifier les coûts induits par ce procédé de façon à dimensionner au coût le plus juste les périphériques inhérents à ce procédé. ([www.simplast.eu](http://www.simplast.eu)). Depuis 1998, plus de 180 pièces ont été étudiées et mises au point en injection assistée par gaz.*

commandes d'obturateurs de masselottes.

Le rebroyage des masselottes est alors difficile pour les pièces en polyamide.

C'est pour ces raisons tant techniques qu'économiques

que ce procédé ne se démocratise que très lentement. Aujourd'hui, ce procédé est parfaitement adapté à des pièces tubulaires de plus de 20 mm de diamètre n'ayant aucune contraintes d'aspect extérieures.

### Contact :

*Simplast Sarl  
9, rue des cigognes  
67140 BARR  
Tél. : 0033 (0)3 88 58 52 40  
Fax : 0033 (0)3 88 58 52 42  
[www.simplast.eu](http://www.simplast.eu)*



Guidon de Tricycle pour SMOBY  
Matière: PP chargé poudre aluminium de BASELL  
Système IAE: BATTENFELD

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Avenas ; J-Fr. Agassant ; J-Ph. Sergent ; Br. Vergnes ; M. Vincent . La mise en forme des matières plastiques, Technique et Documentation Lavoisier, 1996
- [2] David Daboussy, Thèse de doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2000
- [3] K.S Barton et L.S Turng. General design guidelines for gas-assisted injection moulding using a CAE Tool. In Antec Proceedings, pp. 421-425 Society of Plastics Engineers, 1994
- [4] Rémy Deterre, Thèse de doctorat, Ecole d'Application des Hauts Polymères de Strasbourg, 1984
- [5] S.C. Chen, N.T. Cheng et K.S. Hsu. Simulations of gas penetration in thin plates designed with a semi-circular gas channel during gas assisted injection moulding. Int. J. Mech. Sci. 38(3), pp. 335-348, 1996
- [6] S.C. Chen, K.F. Hsu, K.S. Hsu, Analysis and experimental study of gas penetration in a gas assisted injection moulding spiral tube. Journal of Applied Polymer Science, 58: pp. 793-799, 1995
- [7] F.S. Costa and W. Thompson. An adaptation of the boundary element method for modelling gas injection moulding. In Shen and Dawson, editor, Simulation of Materials Processing: Theory Methods and Applications, pp. 1113-1118, Balkema, 1995
- [8] D.M. Gao, K.T. Nguyen, A. Garcia-Rejon, and G. Salloum. Numerical modelling of the mould filling stage in gas assisted injection moulding. International Polymer Processing, XII(3), pp. 267-277, 1997
- [9] R.E. Khayat, A. Derdouri, and L.P. Hebert. A three-dimensional boundary element approach to gas assisted injection moulding. Journal of Non-Newtonian fluid Mechanics, 57, pp. 253-270, 1995
- [10] S.J. Liu and J.H. Chang. The occurrence of surface roughness in gas assisted injection molded nylon composites. Polymer Composite, pp. 82-88, 1999
- [11] T.C. Pearson, Gas Assisted Moulding, In Rapra review reports, volume 9
- [12] H. Potente and M. Hansen. The gas assisted injection moulding process, Comparison between experiment and simulation. International Polymer Processing VIII(4), pp. 345-351, 1993
- [13] C.T. Li and A.I. Isayev, Primary and secondary gas penetration during gas assisted injection molding, Polymer Engineering and Science 44(5), pp. 983-991, 2004
- [14] J. Avery, Gas assisted injection molding: principles and applications, Hanser, 2000

- [15] S.C.Chen, N.T. Cheng, and S.M. Chao, International Polymer Processing XIV, 90, 1999
- [16] C.T. Li, J.W. Shin, and A.I. Isayev, Primary and secondary gas penetration during gas assisted injection molding, Polymer Engineering and Science 44(5), pp. 992-1002, 2004
- [17] B.G. Cox, On driving a viscous fluid out of a tube. Journal of fluid mechanics, 14: pp. 81-96, 1962
- [18] W.B. Kolb and R.L. Cerro. Coating the inside of a capillary of square cross-section. Chemical engineering science, 46(9), pp. 302-311, 1991
- [19] G.I. Taylor. Deposition of a viscous fluid on the wall of a tube. Journal of fluid mechanics, 10, pp. 161-165, 1961
- [20] D. Halpern and D.P. Gaver III. Boundary element analysis of the time dependent motion of a semi-infinite bubble in a channel. Journal of computational physics, 115, pp. 366-375, 1994
- [21] A.J. Poslinski, P.R. Oehler and V.K. Stokes. Isothermal gas-assisted displacement of viscoplastic liquids in tubes. Polymer engineering and science, 35(11), pp. 877-892, 1995
- [22] B. Magnin, Modélisation du remplissage des moules d'injection pour polymères thermoplastiques par une méthode Eulérienne-Lagrangienne arbitraire. Thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Janvier 1994
- [23] G. Schlatter, Injection bi-matière sandwich des thermoplastiques : simulation numérique et étude expérimentale de la phase de remplissage de moule. Thèse de doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1995
- [24] S.F. Shen, Grapplings with the simulation of non-newtonian flows in polymer processing . International journal for numerical methods in engineering, 34, pp. 701-723, 1992
- [25] Y.P. Chang, S.Y. Hu and S.C. Chen. Simulation of gas-assisted injection mold cooling process using line source model approach for gas channel Int. Comm. Heat Mass Transfer, 25(7), pp. 989-998, 1998
- [26] Y.K. Shen The study on polymer melt front, gas front and solid layer in filling stage of gas assisted injection molding, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 28(1) pp. 139-148, 2001
- [27] H. Zhou and D. Li; Filling simulation and gas penetration modelling for gas assisted injection molding; Applied Mathematical Modelling 27, pp. 849-860, 2003
- [28] L.S. Turng and V.W. Wang; Simulation of co-injection and gas-assisted injection molding; ANTEC, Conference Proceedings , 37, pp. 297-300; 1991
- [29] T. Pearson; Low pressure gas assisted injection moulding SPE Publication pp. 382-383 1987

- [30] H. Eckardt; Continuous internal gas pressure for injection moulding *Kunststoffe German Plastics*, 82(10), pp. 3-5, 1992
- [31] G.Q. Zheng, L. Huang, W. Yang, B. Yang, M.B. Yang, Q. Li, C.H. Shen; Hierarchical crystalline structure of HDPE molded by gas assisted injection molding; *Polymer* 48; 5486-5492, 2007
- [32] G.Q. Zheng, L. Huang, W. Yang, B. Yang, M.B. Yang, Q. Li, C.H. Shen; Flow induced fiber orientation in gas assisted injection molded part; *Materials Letters* 61; 3436-3439; 2007
- [33] J.C. Liang, Y. Li, D.H. Zhou, Z.R. Li, W. Zhang; analysis of diffusion mechanism between gas and melt in gas assisted injection molding; *Journal of Materials Processing Technology* 187-188, pp. 685-689, 2007
- [34] A. Marcilla, A. Odjo-Omoniyi ; R. Ruiz-Femenia, J.C. Garcia-Quesada ; Simulation of the gas assisted injection molding process using a mid-plane model of a contained-channel part; *Journal of Materials Processing Technology* 178; pp. 350-357, 2006
- [35] F. Belblidia, J.F.T. Pittman, A. Polynkin, J. Sienz; Gas displacing viscous shear thinning liquids from tubes: effect of cooling before gas injection; *Chemical Engineering Science* 60; pp. 4953-4956, 2005
- [36] A. Polynkin, J.F.T. Pittman, F. Belblidia, J. Sienz; 3D Simulation of gas assisted injection moulding, including cyclic thermal boundary conditions, and comparison with experimental results; *Proceedings of PPS18; Guimaraes (P) 2002*
- [37] A. Polynkin, J.F.T. Pittman, J. Sienz; Gas displacing liquids from tubes: high capillary number flow of a power law liquid including inertia effects; *Chemical Engineering Science* 59; pp. 2969-2982, 2004
- [38] A. Polynkin, J.F.T. Pittman, J. Sienz; 3D Simulation of gas assisted injection moulding, analysis of primary and secondary gas penetration and comparison with experimental results; *International Polymer Processing*, 2005
- [39] J-L Dreyer, *Les Techniques de l'Ingénieur*, AM3693, 4-2006
- [40] J-P. Trotignon, M. Piperaud, J. Verdu, A. Dobraczynski; *Précis des matières plastiques, Structures, Propriétés, Mise en œuvre et Normalisation*, Nathan, 1984
- [41] J. Terrisse, Ch. Lenfant; *Injection, Procédé, Rhéologie, Thermique*, document de cours à l'EAHP, 1992
- [42] L.S. Turng; Development and Application of CAE Technology for the gas-assisted injection molding process; *Advances in Polymer Technology*, Vol. 14, N°1, 1-13; 1995
- [43] Luisa Al. Rocha Da Silva, *Thèse de Doctorat en Sciences Fondamentales et Appliquées, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2004



[44] Y.Y. Nie, L.S. Turng, K.K. Wang, Structural analysis for gas-assisted injection molded parts; *Advances in Polymer Technology*, Vol. 16, 159-173; 1997

