

Injection et Moulage de Mousse :

Comprendre et Analyser grâce aux Logiciels de Rhéologie

S. Andrietti¹, R. Ducloux¹, L. Ville¹, V. Royer¹

1: TRANSVALOR, Parc de Haute Technologie - 694 avenue Dr Maurice Donat – 06255 Mougins - FRANCE

Abstract: Les mousses PU sont largement utilisées dans plusieurs secteurs dont l'automobile, l'électroménager et les loisirs. Le logiciel REM3D® permet de simuler finement le procédé d'injection et de moulage de mousse et de vérifier ainsi l'influence des conditions de mise en œuvre. Cet article présente tout d'abord l'apport de la simulation pour les procédés d'injection, puis il détaille les caractéristiques novatrices du logiciel développées afin de répondre aux exigences du procédé. Les données matière étant essentielles, nous décrivons ensuite une méthodologie de caractérisation des mousses PU. A partir de propriétés physiques & thermo-cinétiques mesurées expérimentalement, une méthode numérique d'optimisation automatique permet d'obtenir les paramètres de la fiche matière. Exploitées par l'outil de simulation, ces données conformes aux formulations réelles permettent d'accroître la qualité des résultats. En conclusion, plusieurs exemples illustrent l'apport de la simulation sur des pièces industrielles et montrent l'étendue des résultats parmi lesquels la densité de mousse en chaque zone de la pièce ; un indicateur essentiel pour estimer la qualité des pièces et leur performance.

Keywords: mousse polyuréthane, simulation, rhéologie, injection expansion, remaillage adaptatif

1. Introduction

Depuis de nombreuses années, la simulation est un outil essentiel exploité à l'origine dans deux secteurs préférentiels : les écoulements de fluides et le dimensionnement des pièces mécanique. Mais pour aller plus loin dans la compréhension des phénomènes et en vue de prédire des propriétés d'usage des pièces, les ingénieurs se sont tournés peu à peu vers la simulation des procédés de fabrication.

On parle ainsi de 'Virtual Manufacturing' et il existe désormais de nombreuses solutions logicielles adaptées à chaque type de procédé de mise en forme aussi bien pour les métaux que pour les plastiques voire d'autres matériaux encore.

Cet article a pour objectif de présenter une étendue des possibilités offertes par la simulation en matière d'étude rhéologique et plus particulièrement dans le

cadre de l'injection et du moulage de mousse polyuréthane utilisées dans le secteur automobile.

2. La simulation rhéologique

2.1 Application aux procédés d'injection standard

La simulation du procédé d'injection plastique permet de visualiser virtuellement l'avancée du front de matière durant le remplissage du moule. L'objectif est de détecter avant mise en production tout type de défaut pouvant altérer les propriétés des pièces injectées et de proposer des solutions pour garantir une meilleure qualité et une plus grande productivité.

La technique s'applique aussi bien à des designs existants qu'à de nouvelles configurations. Dans les deux cas, il est aisé de tester plusieurs conditions de mise en œuvre (régulation thermique des moules, pression de maintien, position des canaux d'alimentation, force de fermeture, ...).

Les éventuels défauts (incomplets, lignes de soudure, retassures, brûlures, déformations excessives au retrait) sont identifiés et le process peut être optimisé (force de fermeture, temps de cycle, pression de packing ...).

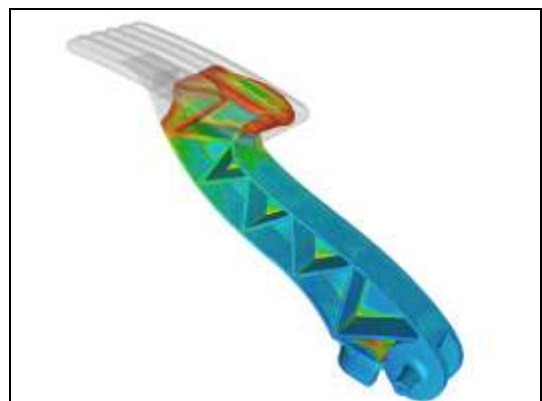


Figure 1 : Distribution de température durant l'injection d'une pédale en PA66 renforcé

La figure 1 présente une application relativement simple qui correspond à une utilisation très répandue dans les bureaux d'études. Aujourd'hui, les progrès des logiciels permettent d'aller plus loin en adressant des problématiques plus complexes :

- Optimisation du séquençage lors d'une injection multi-points
- Equilibrage des canaux pour les injections multi-empreintes
- Contrôle de l'épaisseur de paroi pour les pièces creuses produites en injection assistée (eau ou gaz)
- Répartition des matières en co-injection pour éviter en particulier les phénomènes de perçage
- Prédiction de la distribution et de l'orientation des fibres pour les matériaux chargés.

Ce dernier point est fondamental pour les pièces techniques pour lesquelles les propriétés d'usage doivent être garanties.

2.2 Application à l'injection et au moulage de mousse PU

La production de pièces en matières alvéolées (moussées) et un domaine en forte croissance aujourd'hui.

Le moussage peut être physique comme dans le procédé MuCell®. Le but est alors une réduction du poids qui peut atteindre quelques dizaines de pourcent, accompagnée d'une amélioration de la stabilité dimensionnelle.

Le moussage peut aussi être chimique. Il est produit par l'ajout d'un élément moussant au polymère de base. C'est le cas en particulier des mousses PU auxquelles nous nous intéressons dans cet article. Ce procédé permet l'obtention d'un matériau alvéolaire beaucoup plus aéré. La structure est obtenue grâce à un dégagement gazeux résultant de la réaction de polymérisation exothermique d'un isocyanate associé à un polyol [1].

Les mousses PU permettent de produire généralement des semi-produits (blocs, boudins) ou bien directement des pièces moulées à la géométrie désirée. On parle alors de moussage « in situ ». Le secteur automobile exploite ce procédé plus particulièrement pour les pièces d'intérieur avec des mousses rigides pour tableaux de bord (Figure 2) ou volants, et des mousses souples pour les sièges ou certaines garnitures.

Pour l'outil de simulation, ce procédé demeure relativement complexe car plusieurs phénomènes physiques interviennent en même temps. Par exemple, la simulation doit pouvoir considérer les couplages forts entre la mécanique, la thermique et la cinétique chimique.

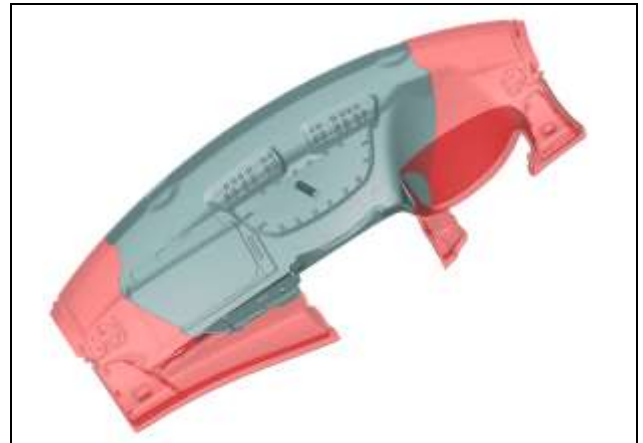


Figure 2 : Expansion de mousse PU avec front de matière durant le remplissage d'un tableau de bord

Ainsi, l'étude rhéologique doit prendre en compte les différentes conditions de moulage et satisfaire des besoins bien spécifiques parmi lesquels :

- Gérer les mousses flexibles, semi-rigides et rigides au travers de lois rhéologiques adaptées
- Prendre en compte la phase initiale de dépose de mousse suivie de la phase d'expansion
- Evaluer l'écoulement dans la cavité en modifiant les seuils d'injection, l'équilibrage et l'inclinaison du moule
- Déterminer la masse minimale à injecter et le overpacking
- Optimiser le nombre et l'emplacement des événements afin d'éviter les moulages incomplets
- Prédire la densité finale à la fois en valeur moyenne et plus localement
- Identifier des défauts de surface
- Limiter les chutes et les découpes finales

3. Des fonctionnalités avancées

Comme énoncé précédemment, le procédé reste complexe à simuler. C'est pourquoi nous allons exposer dans ce paragraphe les points essentiels qui caractérisent le logiciel REM3D® et qui lui confèrent la possibilité de simuler avec précision le procédé d'injection-expansion des mousses PU. Comme souvent la qualité du résultat s'appuie sur :

- une description fine du comportement du matériau
- la capacité du logiciel à prendre en compte les spécificités du procédé
- Le choix de techniques numériques adaptées à la complexité du problème.

3.1 Un modèle rhéologique complet

Comme la plupart des polymères, l'écoulement des mousses polyuréthane est gouverné par les équations classiques de Navier-Stokes et par l'équation de la chaleur :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v \right) - \nabla (2\eta \varepsilon(v)) + \nabla p = f^v \quad [1]$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad [2]$$

$$\frac{d(\rho c_p T)}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad [3]$$

Avec les termes : vitesse v , pression p , densité ρ , viscosité dynamique η , fonction de stabilisation f , température T , chaleur spécifique c_p , conductivité thermique k et un terme source S pour la dissipation visqueuse et la réaction de polymérisation [2].

L'évolution du taux de gaz est calculé selon

$$\text{l'expression : } \frac{d\phi}{dt} = G(\phi, t, T) - \chi_p f \frac{dp}{dt} (1 - \phi) \quad [4]$$

La génération du gaz dans la mousse entraîne une évolution de la densité qui est prise en compte dans l'équation de conservation de Navier-Stokes :

$$\nabla \cdot v = - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \chi_p \frac{dp}{dt} - \frac{1}{(1 - \phi)G(\phi, t, T)} \quad [5]$$

3.2 La prise en compte couplée de l'injection et de l'expansion

La résolution couplée des équations ci-dessus permet de modéliser le procédé en prenant en considération le phénomène d'expansion dès la phase d'injection. Ceci est primordial car l'expansion débute progressivement dès la dépose de mousse.

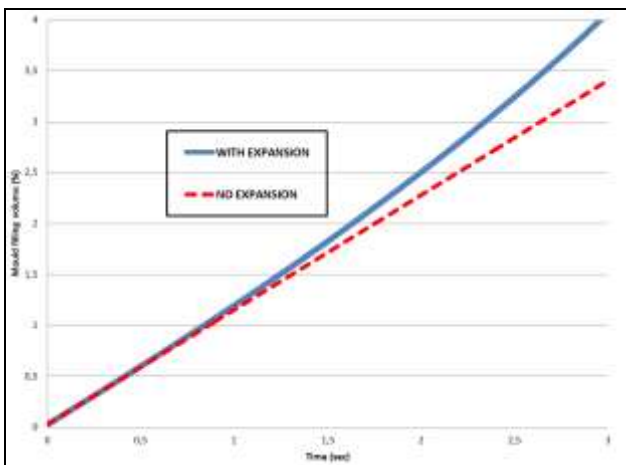


Figure 3 : Variation du taux de remplissage avec ou sans expansion dès la phase d'injection

Considérer les deux phases comme étant totalement indépendantes peut conduire à une estimation erronée de la masse de mousse nécessaire et à des temps de remplissage surestimés.

La figure 3 illustre des résultats de simulation avec la variation du taux de remplissage dans le moule durant la phase d'injection de mousse. La courbe inférieure correspond au volume théorique suivant le débit constant imposé. La courbe supérieure montre le volume total simulé avec une nette augmentation liée à l'expansion qui débute durant l'injection.

3.3 Les spécificités du procédé

L'injection-expansion de mousse PU présente certaines spécificités et il est important que l'outil de simulation soit à même de les représenter.

La phase de dépose de mousse: elle peut être réalisée avec des injecteurs mobiles qui sont robotisés ou bien simplement manipulés par un opérateur. L'outil de simulation doit être capable de restituer cette réalité en permettant la définition d'une trajectoire pour un ou plusieurs injecteurs. La phase de dépose de mousse est ainsi cadencée dans le temps et dans l'espace.

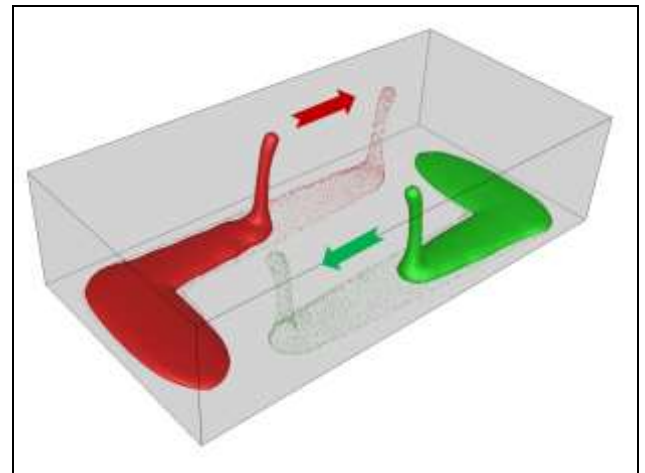


Figure 4 : Simulation sur géométrie 'test' illustrant la dépose de deux mousses par des injecteurs mobiles

Des moules à inclinaison variable: cette option de réglage permet de mieux contrôler la direction d'expansion de la mousse en privilégiant une expansion de bas en haut. Sur des lignes de production pour des pièces type siège automobile, cet angle d'inclinaison pourra se situer par exemple entre 30° et 45°. Les faces 'esthétiques' de la pièce sont traditionnellement orientées vers la partie inférieure du moule pour éviter les risques de défaut de surface (bulles, ...).

En outre, la simulation inclut la définition des événements qui ont un double rôle : - éliminer les défauts liés aux phénomènes de piégeage d'air et - permettre l'évacuation d'éventuels surplus de matière.

Les résultats de simulation (cf figure 5) montrent l'impact de l'angle d'inclinaison sur le remplissage du moule. Sous l'effet combiné de la réaction d'expansion et de la gravité, la mousse n'occupe pas les mêmes parties du moule.

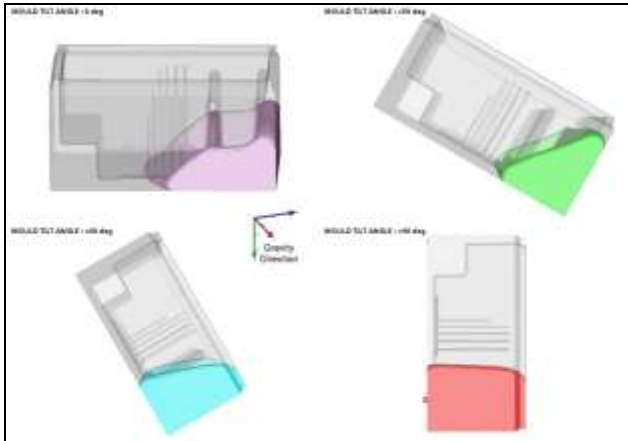


Figure 5 : Impact de l'angle d'inclinaison du moule durant la phase d'expansion (30% de remplissage)

On peut aussi observer sur la figure 6 que le temps nécessaire pour remplir un pourcentage donné de la cavité diminue lorsque l'angle d'inclinaison augmente.

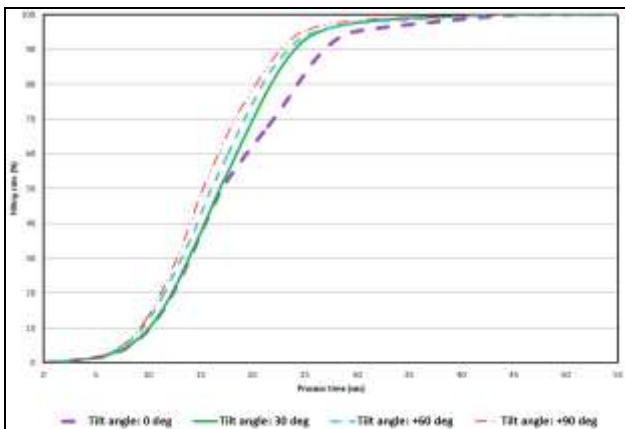


Figure 6 : Variation du volume rempli (en %) selon l'angle d'inclinaison du moule (0-30-60-90 deg)

L'outil de simulation permet donc au concepteur de tester virtuellement l'inclinaison du moule pour garantir la qualité du remplissage et optimiser les temps de cycle.

3.4 La technique de remaillage AAA

De manière générale, l'écoulement est calculé au sein de la cavité suivant une approche 3D eulérienne. Le volume total calculé inclut à la fois le volume occupé par la mousse mais aussi celui occupé par l'air ambiant. Pour distinguer chacun de

ces domaines, une fonction de présence est calculée en utilisant une approche type level-set [3].

Par ailleurs, les aspects thermiques sont prépondérants en injection et il est absolument nécessaire d'avoir un maillage adapté pour bien délimiter les frontières de chaque domaine et pour avoir une résolution fine dans toutes les zones critiques (front de matière, parois du moule, gradients locaux). En ce sens, REM3D® dispose d'une fonctionnalité unique dite de remaillage automatique, adaptatif et anisotrope [4].

Remaillage automatique: totalement intégré au calcul et parallélisé, il est très efficace sur des architectures multi-cœurs. La fonction de remaillage est tout d'abord automatique c'est-à-dire qu'elle se déclenche automatiquement au cours du calcul en fonction de variations locales ou pour une amélioration topologique globale.

Remaillage auto-adaptatif et anisotrope: en cours de calcul, le maillage est densifié et optimisé localement pour des évolutions d'interfaces complexes et pour rendre compte des forts couplages entre écoulement - thermique - rhéologie.

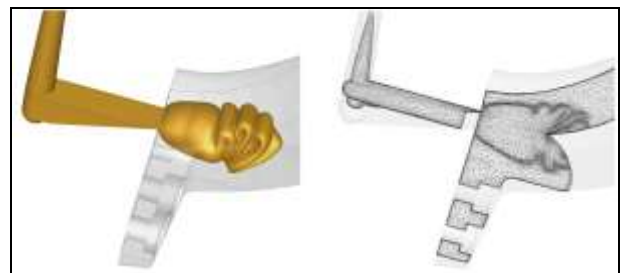


Figure 7 : Exemple de remaillage auto-adaptatif en accord avec l'évolution du front de matière

La figure 7 illustre le fort raffinement appliqué à l'interface polymère/air. Une méthode avec estimateur d'erreur permet d'optimiser à chaque pas de temps le maillage selon une ou plusieurs fonctions d'adaptation. On obtient ainsi une grande précision de calcul dans les zones sensibles tout en conservant un nombre limité de nœuds dans le modèle éléments finis.

Plusieurs fonctions d'adaptation sont ainsi combinées pour un raffinement optimisé :

- Une fonction caractéristique des interfaces et du front de matière
- Une fonction caractéristique selon la norme de la vitesse et la température
- Une fonction caractéristique selon au contact aux parois

4. L'intérêt de procéder à une caractérisation des mousses

Quel que soit la qualité des modèles implémentés, la simulation fournira des résultats prédictifs sous condition d'être alimentée avec des données matière totalement maîtrisées. Il s'avère que pour les mousses PU, il existe peu de données disponibles dans la littérature et la variété des formulations complexifie encore la tâche.

C'est pourquoi nous présentons ci-après une méthodologie qui associe un équipement technique pour la mesure des paramètres physiques et une approche numérique pour convertir les paramètres mesurés en données exploitables par le logiciel REM3D®.

4.1 Le système de caractérisation Foamat®

Cet équipement illustré figure 8 permet de réaliser des caractérisations adaptées aussi bien à des mousses souples, semi-rigides ou rigides. A partir d'un échantillon de formulation, l'expansion est effectuée à volume contrôlé. La température de réaction est mesurée durant l'expansion via un capteur inséré au sein même de l'échantillon.

Plusieurs paramètres physiques sont ainsi mesurés simultanément :

- La température de réaction
- La hauteur de montée (ou vitesse d'expansion)
- La pression



Figure 8 : Description du système de caractérisation (avec l'autorisation de Format_Messtechnik GmbH)

Les formulations pouvant être assez variables, l'intérêt majeur réside dans la capacité de mesurer l'exacte formulation utilisée sur la pièce réelle. Ceci s'inscrit dans une vraie démarche de contrôle qualité permettant de mieux maîtriser la simulation au sein de la chaîne de conception.

4.2 Usage des données pour la simulation

La deuxième phase de la méthodologie consiste à utiliser un algorithme d'optimisation automatique couplé au logiciel de simulation. L'essai réel d'expansion contrôlée est simulé dans les mêmes conditions. Une fonctionnalité dite de 'suivi de points' permet à la simulation d'enregistrer les grandeurs telles que la température en tout point de la pièce. Cet enregistrement est donc comparable aux courbes enregistrées durant l'essai réel.

L'algorithme d'optimisation s'appuie sur un principe de minimisation. Le comportement rhéologique du matériau est décrit par près d'une dizaine de paramètres. Comme dans un plan d'expérience, les valeurs de ces paramètres sont automatiquement testées et une simulation est lancée pour chaque jeu de paramètres choisis.

L'optimisation consiste à minimiser une fonction coût qui calcule l'écart entre les courbes réelles et les courbes calculées à partir de la simulation :

- Ecart à la courbe pour l'évolution de la température en un point de référence
- Ecart à la courbe sur le profil de hauteur de montée

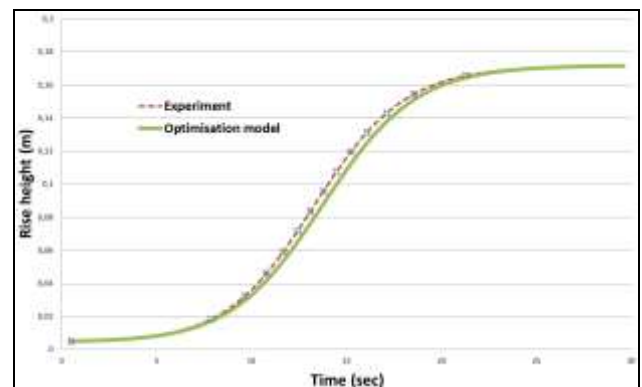


Figure 9 : Comparaison entre les profils de hauteur de montée (valeurs expérimentales et valeurs obtenues par optimisation)

Une fois l'optimisation terminée, les paramètres matériaux désormais identifiés sont intégrés dans un fichier matière qui sera utilisé dans toutes les simulations relatives à cette formulation précise.

5. Panorama d'applications industrielles

La simulation pour l'injection-expansion de mousse PU concerne un large panel de pièces automobiles dont voici quelques applications.

5.1 Tableau de bord

Dans cet exemple, nous présentons l'évolution du front durant le remplissage. L'injection est réalisée à

partir d'un seul point centré sur la pièce. La phase de dépose de mousse est relativement importante avec 1.25 kg de mousse déposé durant près de 30% du remplissage. La répartition de matière est relativement équilibrée avec néanmoins une prédominance de l'écoulement sur la partie gauche de la pièce.

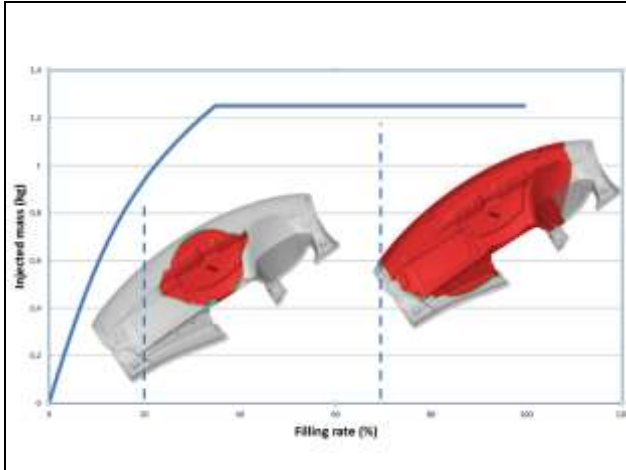


Figure 10 : Accroissement du front de matière (20% et 70% de remplissage) avec superposition de la masse injectée

5.2 Panneau d'équipement intérieur

Dans cet exemple, la simulation a permis de déterminer la masse minimale à injecter pour un large panneau intérieur mesurant plus de 2.5m de long. L'analyse au cours du remplissage permet de visualiser les compétitions d'écoulement et de détecter les éventuelles lignes de soudure.

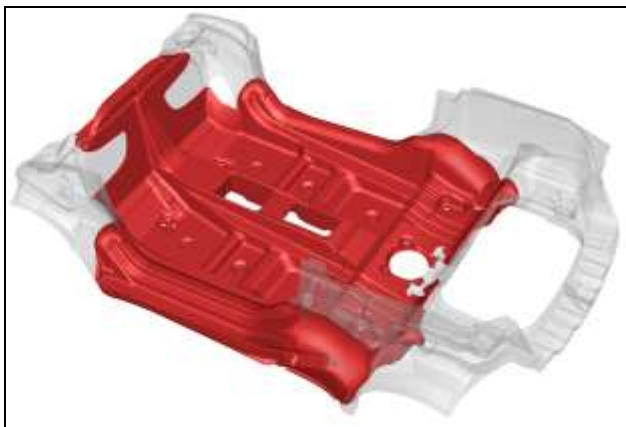


Figure 11 : Evolution du front de mousse durant la phase d'expansion

Pour ce type de pièce, la prédiction de la densité finale est très importante car elle conditionne les caractéristiques de la pièce. Suivant la masse

injectée, la simulation permet de quantifier la densité en tout point de la pièce. La figure 12 illustre l'utilisation de plans de coupe afin de mesurer localement la densité finale et de dresser des profils longitudinaux ou transversaux.

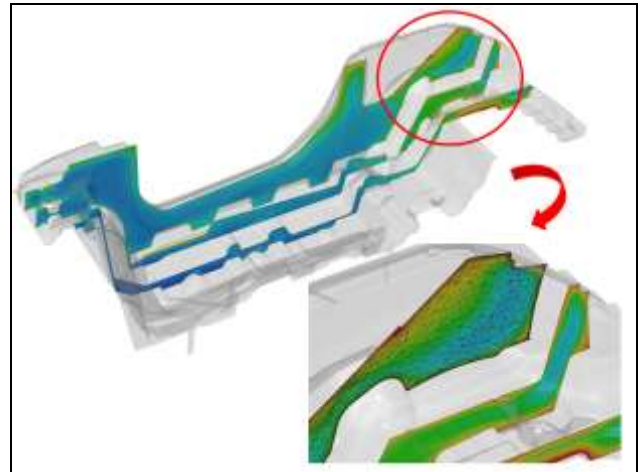


Figure 12 : Sections représentatives de la densité finale de mousse (100% de remplissage)

5.3 Siège de véhicule

Cet exemple illustre le moulage de mousse d'un siège de véhicule avec utilisation d'un moule incliné. On utilise souvent le terme 'Tilt' pour désigner cette bascule du moule. La simulation met en évidence les défauts de surface observés principalement sur la face inférieure du siège. Ces défauts sont liés à une évacuation insuffisante de l'air (phénomène de piégeage) ou à des lignes de soudure. Les tests sur la position des évènements permettront de corriger ce genre de situation et d'améliorer la qualité du produit fini.

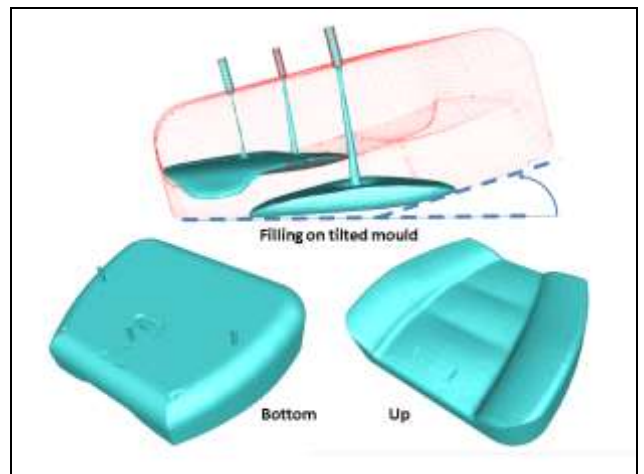


Figure 13 : Phase de dépose de mousse sur moule incliné – Forme finale avec défauts de surface apparents sur la face inférieure

6. Conclusion

Le procédé d'injection et de moulage de mousse PU est aujourd'hui un des procédés de fabrication utilisé dans le secteur automobile pour lequel la simulation demeure pas ou peu utilisée. Comme nous l'avons détaillé, ce procédé présente plusieurs spécificités et le logiciel REM3D® dispose d'un panel fonctionnel parfaitement adapté et qui autorise des études rhéologiques sur des configurations réellement industrielles.

Ainsi, la simulation pour le moulage des mousses peut être parfaitement intégrée dans la chaîne de conception et autorise une optimisation tout azimut :
- conditions d'injection, - équilibrage et inclinaison des moules, - variations thermiques du moule, - masse minimale à injecter, - réduction des pertes matière aux événements, - essai de mousses plus ou moins réactives, - réduction des temps de cycle. De surcroît, l'outil de simulation améliore la prédiction des propriétés d'usage car il offre une cartographie de densité en tout point de la pièce afin de répondre aux exigences d'un cahier des charges pour un comportement attendu soit au niveau isolation phonique ou thermique, soit en tenue structurelle, voir même en terme de confort à l'usage.

A plus long terme, le challenge pour la simulation de l'injection-expansion des mousses réactives consistera à accroître la qualité prédictive sur des géométries toujours plus complexes. Cela passera par une meilleure maîtrise des modèles numériques et des données associées, mais aussi par des évolutions fonctionnelles qui permettront de toujours mieux représenter la réalité du procédé.

7. Références

- [1] J. Bikard: "Fabrication des mousses en polyurethane", 1.2, 1-5, Techniques de l'Ingénieur, 2009
- [2] J. Claracq, G. François, L. Ville, L. Silva, Advanced simulation of PU foam mould filling, Int. Conf. Mech. Complex Solids Fluids Lille (2015)
- [3] L. Ville, L. Silva, T. Coupez, Convected level set method for the numerical simulation of fluid buckling, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 66(3), 324-344 (2011)
- [4] G. François, L. Ville, L. Silva, M. Vincent, Multi criteria adaptive meshing for polymers processing in REM3D®, Key Engineering Materials 554:1649-1657 (2013)

8. Glossary

PU ou PUR : Polyurethane

AAA : Automatique Adaptatif Anisotrope