

Comment réduire le temps de vulcanisation sans endommager le mélange caoutchouc pendant la phase de moulage?

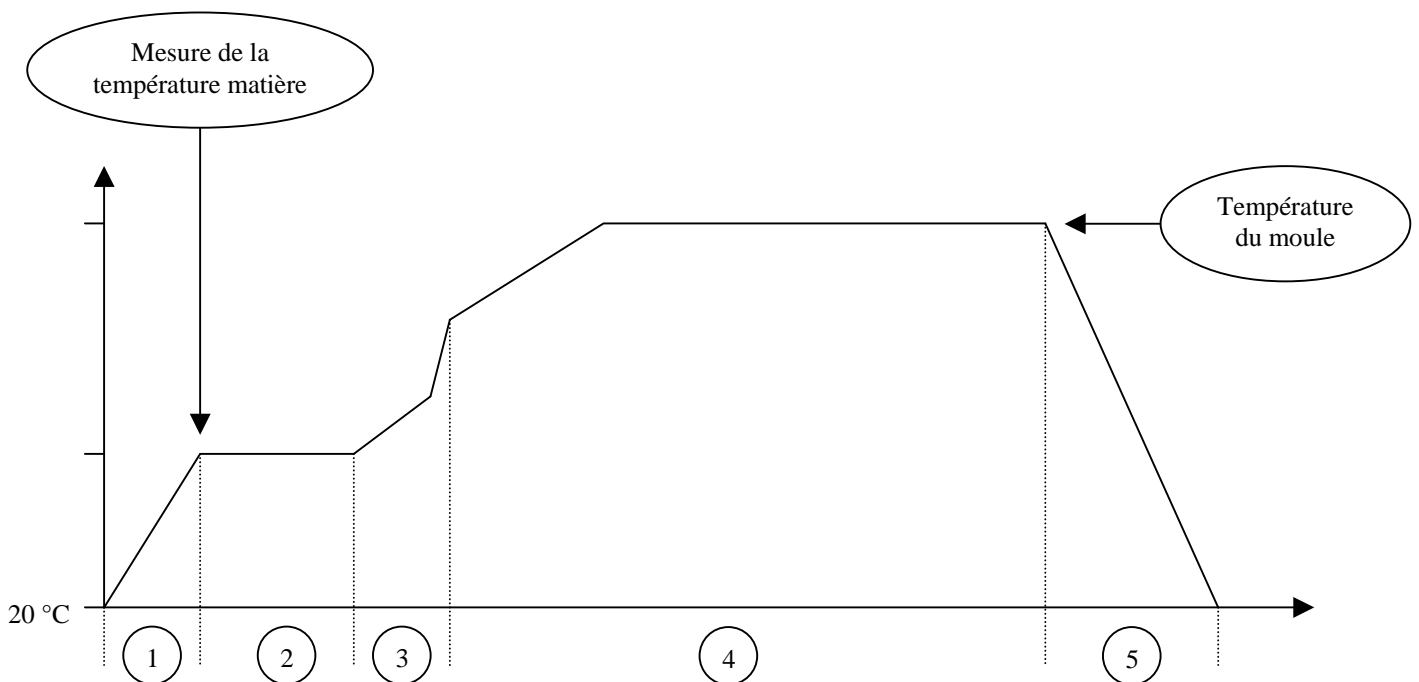
Introduction

Le présent article a pour objectif d'analyser le procédé d'injection du caoutchouc et de mettre en évidence les limites qui empêchent la réduction du temps de vulcanisation. Ensuite, nous proposerons quelques solutions dont l'objectif consiste à contourner ces limites avec quelques exemples d'applications industrielles s'appuyant sur des valeurs d'amélioration.

Le procédé d'injection

Dans le procédé d'injection du caoutchouc, le mélange mis en oeuvre parcourt un historique thermique, lequel démarre à température ambiante, dès lors que la bande caoutchouc entre dans la boudineuse, avec évolution de la température jusqu'à la pièce finie, lorsque cette dernière est refroidie à température ambiante. Dans certains cas, un procédé de post-vulcanisation est réalisé en mettant la pièce en étuve pendant un certain temps. Il s'agit d'un procédé secondaire non abordé dans le présent document.

L'historique thermique du mélange est représenté de manière succincte dans le diagramme simplifié ci-dessous. Ce diagramme est simplifié, étant donné que l'on part de l'hypothèse que toutes les pièces ont le même historique, ce qui n'est pas le cas, comme démontré par la suite:



Zone 1 : préparation de la matière (le boudinage). Le mélange est boudiné et chauffé de manière à atteindre la température optimale. Cette température doit faire l'objet de mesures, permettant de pouvoir l'optimiser et de la maintenir dans la phase suivante du procédé.

Zone 2 : le stockage. La matière se trouve dans le pot d'injection, prête à être injectée. Sa température doit être constante.

Zone 3 : remplissage du moule (l'injection). Le passage du mélange dans les canaux provoque l'échauffement de celui-ci. L'échauffement du mélange est pour la plupart généré par le cisaillement du mélange, mais également par le contact de ce dernier avec les parois du moule.

Zone 4 : la vulcanisation. Une fois l'empreinte remplie, la matière n'est pas encore à la température du moule, même si elle a subi un auto-échauffement. Elle va donc continuer à chauffer pendant le début de la phase de vulcanisation (zone 4) jusqu'à atteindre la température du moule. En fonction de l'épaisseur de la pièce, le procédé d'échauffement sera plus ou moins rapide.

Zone 5 : le refroidissement. Une fois la pièce évacuée du moule, celle-ci a besoin d'un certain temps de refroidissement tout en continuant sa vulcanisation. La maîtrise totale du procédé implique également la maîtrise des conditions de refroidissement des pièces.

Qu'a-t-il été fait dans le passé pour réduire le temps de vulcanisation?

Les orientations suivantes ont été suivies au cours des dernières années avec pour résultat les améliorations suivantes:

Séparation de la vis et du piston

C'était la première étape qui a permis une optimisation des conditions process, grâce à une meilleure adaptation des conditions de boudinage et au contrôle du procédé par des mesures de température du mélange en temps réel.

Régulation de la température

Une boucle de régulation de température précise est indispensable pour obtenir une température stable au niveau de l'unité d'injection et du moule. Compte-tenu de la distance entre le plateau chauffant et l'empreinte du moule, il peut y avoir des écarts de température énormes et variables entre les deux. Pour maîtriser le procédé, il est très important de réguler en température l'empreinte, dans laquelle se trouve le mélange. Bien que cet impératif rende la réalisation de la boucle de régulation plus difficile, nous obtenons un procédé plus constant, permettant des températures de moule plus élevées et une réduction du temps de vulcanisation. C'est précisément le rôle de ThermoTrac.

Equilibre de la température du moule

Les surfaces extérieures du moule génèrent une perte de chaleur avec pour conséquence le refroidissement des parois du moule. Ce phénomène appelé "effet de bords" induit une température de moule inférieure sur les côtés et dans les angles qu'au centre du moule. La température du moule est limitée par les empreintes de température la plus élevée et le temps de vulcanisation est donné par les empreintes de température la plus faible, générant un temps de vulcanisation plus long que nécessaire. Isothermould a été développé pour compenser "l'effet de bords" et pour maintenir l'ensemble des empreintes à la même température, réduisant ainsi le temps de vulcanisation.

Suppression de la marge de sécurité

Pour obtenir un procédé plus sûr et pour compenser l'ensemble des variations générées par le mélange et le procédé, tous les transformateurs de caoutchouc ajoutent une marge de sécurité au temps de vulcanisation. CureTrac a été développé pour compenser ces variations dans un modèle à boucle fermée. Ce développement a permis de supprimer les marges de sécurité et d'obtenir un état de vulcanisation stable au lieu d'un temps de vulcanisation stable. De cette manière, le temps de vulcanisation moyen a pu être réduit.

Augmentation de la pression d'injection

Comme déjà mentionné plus haut, le mélange est chauffé pendant le moulage par injection dû au cisaillement, à savoir le frottement entre les différentes couches du mélange à l'intérieur du flux. Ce principe général est basé sur le fait que plus la pression est élevée, plus la température du mélange est élevée lorsque ce dernier entre dans l'empreinte. Un mélange avec une température plus élevée vulcanisera plus rapidement. Nous avons conçu des unités d'injection jusqu'à 3 000 bars pour être en mesure de diminuer le temps de vulcanisation. Il s'agit de l'approche la plus commune de ces dernières années, laquelle est toujours répandue sur le marché.

Ce principe par contre présente une limite dangereuse, à savoir le degré de cisaillement que le mélange est capable de supporter. Un cisaillement et des contraintes trop importants pour le mélange auront un impact aussi bien sur le mélange que sur les caractéristiques de la pièce caoutchouc finie. Ces conséquences sont mesurables immédiatement au niveau des caractéristiques, mais risquent également de diminuer la durée de vie des pièces. En cas de présence de canaux, il y a un risque de grillage avant que le mélange entre dans l'empreinte.

Le fait d'augmenter la température du mélange par un cisaillement excessif risque de détériorer le mélange, de se répercuter sur les caractéristiques de la pièce et de diminuer la durée de vie du produit

Quelles sont les limites qui empêchent la réduction du temps de vulcanisation?

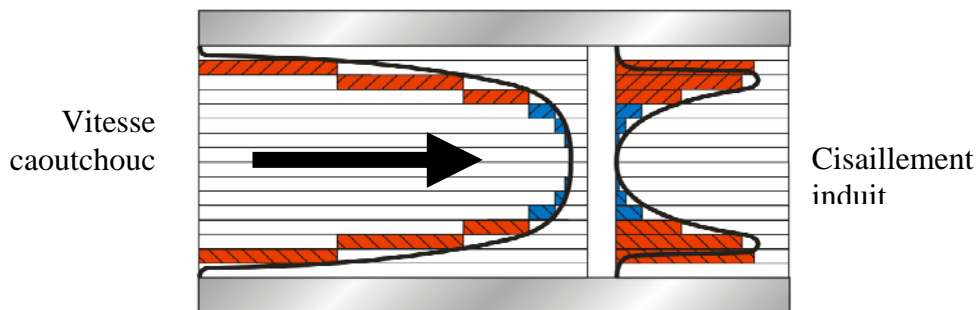
L'analyse du flux pendant le moulage par injection montre que le cisaillement et l'échauffement sont très différents en fonction de la localisation du mélange dans le flux.

Cet échauffement hétérogène a pour conséquence que la chaleur se concentre dans certaines zones qui seront les premières à être touchées par le cisaillement excessif, la dégradation du mélange et le risque de grillage. Ces zones limiteront l'échauffement global possible.

De l'autre côté, certaines parties du mélange subiront un cisaillement très faible et donc un échauffement très faible pendant le procédé de moulage par injection. Etant donné que ces parties du mélange sont les plus froides, le temps de vulcanisation finale dépendra de ces dernières.

L'effet du flux laminaire

Pour comprendre cet effet, regardons en quoi consiste le flux laminaire.



La vitesse et le cisaillement du mélange dans un flux

Le mélange se colle (à vitesse zéro) contre les parois des canaux, contrairement au centre du flux où il est le plus rapide. Le cisaillement est la différence de vitesse entre les couches générant une friction entre ces dernières. D'un côté, les laminats adjacents présentent un très gros écart de vitesse, générant un cisaillement et un échauffement importants sur les couches extérieures du flux. De l'autre côté, au centre du flux, les couches adjacentes passent pratiquement toutes à la même vitesse, générant ainsi un faible cisaillement et un faible échauffement. Le résultat est une température élevée sur la face extérieure par rapport à une basse température au centre du flux.

Cet effet de flux laminaire se confirme dans chaque flux de caoutchouc, dans l'unité d'injection, dans un bloc à canaux régulés ou dans le moule.

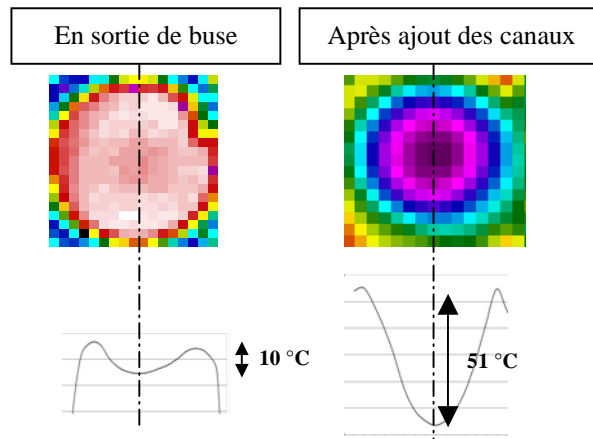
Lorsque nous examinons plus en détail ce qui se passe à l'intérieur du moule, les parois des canaux présentent également une température élevée, ce qui ajoute un échauffement supplémentaire par contact (conduction) aux couches extérieures du flux et non pas à l'intérieur.

Le résultat global est une température bien plus élevée sur les laminats extérieurs qu'au centre du flux.



La température dans un flux caoutchouc

Nous avons mesuré cette différence avec une caméra thermique basé sur un cas moyen (NBR 75 Sh). Nous avons trouvé un écart de 10°C lors de la sortie du mélange d'une buse de diamètre 5mm et de 51°C après avoir ajouté des canaux d'une longueur de 250 mm et d'un diamètre de 8 mm.

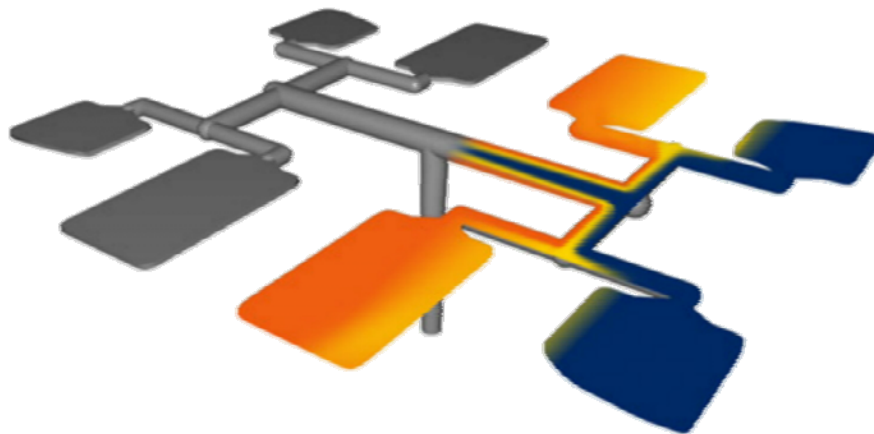


Répartition de la température mesurée à l'intérieur du flux

Le flux laminaire ne permet aucun mélange des couches extérieures et intérieures; cet écart de température augmente alors sur toute la longueur du flux et entraîne une grande hétérogénéité de température dans l'empreinte à la fin de l'injection.

Seule une portion du mélange dicte le temps de vulcanisation: la partie basse température

L'effet de division des canaux



La température du mélange à l'intérieur du flux dans un moule multi-empreintes

Etant donné que le mélange à température la plus élevée se trouve à l'extérieur du flux, cette partie chaude du mélange se retrouvera à l'intérieur du coude secondaire dans le cas d'une division des canaux et le mélange du centre se retrouvera à l'extérieur du coude secondaire. A la prochaine division, le mélange chaud se dirigera entièrement vers les empreintes intérieures, tandis que le mélange froid se dirigera vers les empreintes extérieures.

Nous avons un écart de température du mélange entre les empreintes. Tout transformateur de caoutchouc mettant en oeuvre des moules multi-empreintes a pu constater un déséquilibre lors du remplissage des empreintes, même lorsque la température du moule était parfaitement équilibrée et les canaux et seuils de taille identique. Le fait est que cette différence de température modifie la viscosité du mélange d'une empreinte à l'autre.

Une approche générale pour pallier à ce déséquilibre consiste à ajuster les tailles des seuils et à limiter le flux des seuils. Un flux élevé présente une température élevée; le fait de diminuer la taille du seuil de l'empreinte concernée se répercutera sur le remplissage, mais accroîtra le déséquilibre thermique.

Etant donné que l'ouverture du moule se fait pour toutes les empreintes à la fois, seule l'empreinte contenant le mélange basse température déterminera le temps de vulcanisation, tandis que l'empreinte contenant le mélange haute température déterminera la pression d'injection et la limite de température du moule.

Seules quelques empreintes déterminent le temps de vulcanisation: il s'agit des empreintes contenant le mélange basse température.

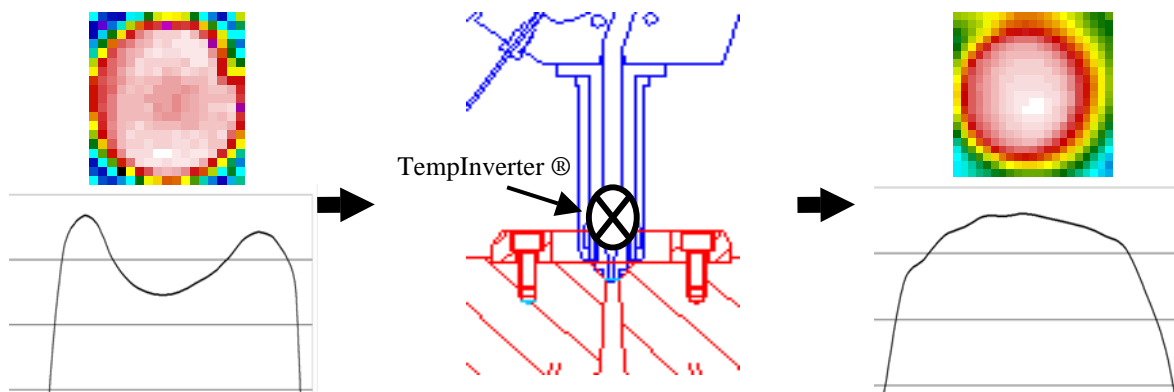
Solutions

Comme nous avons pu le constater plus haut, le temps de vulcanisation est déterminé par le caoutchouc au centre du flux, tandis que la limite est déterminée par le caoutchouc se trouvant à l'extérieur du flux.

La solution globale, appelée TurboCure®, est composée de 3 modules différents: TempInverter® à l'intérieur de l'unité d'injection, FillBalancer® au niveau de la division des canaux et FillBalancer® Max avant l'entrée dans l'empreinte.

TempInverter® (brevet en cours)

La première partie de la solution consiste à permettre une augmentation de la température extérieure et ensuite à inverser le centre et l'extérieur du flux. Ce rôle est assuré par le module TempInverter® en dirigeant le mélange extérieur au centre du flux et inversement en dirigeant le mélange intérieur du centre vers l'extérieur. Ce système est mis en oeuvre en amont de la buse, étant donné qu'à ce stade, la température extérieure est déjà plus chaude (au niveau de l'entrée de buse), de manière à diriger le mélange extérieur au centre du flux. Il permettra ainsi une augmentation de la température au centre d'environ 10°C.

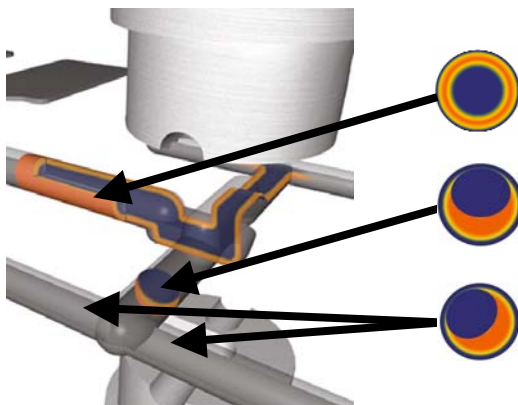


Mesures de température réalisées à l'intérieur du flux sortant de la buse sans et avec TempInverter®

Une augmentation de la température au centre du flux permettra de réduire le temps de vulcanisation.

FillBalancer® (brevets 6.077.470 & 6.503.438)

Le déséquilibre au niveau des divisions des canaux est dû à la température asymétrique à l'intérieur du flux après la division. En retournant le flux, nous retrouvons la symétrie dans le canal secondaire. Ce retournement est réalisé par le module FillBalancer®.



La forme au niveau de la division des canaux permet au flux d'arriver par le bas au lieu d'arriver par le côté. Le mélange haute température se trouvera alors en bas et non pas sur le côté, donc symétrique par rapport à la division suivante. Étant donné que l'ensemble du mélange passant dans les différentes sections des canaux se trouve dans la même condition, nous obtenons ainsi une température et un flux équilibrés entre les empreintes.

Le temps de vulcanisation est réduit grâce au nombre accru d'empreintes à mélange basse température.

FillBalancer® est basé sur un brevet mondial de la société Beaumont Technology Inc., mis en oeuvre dans la technologie des thermoplastiques pendant de nombreuses années sous l'appellation commerciale MeltFlipper®. La forme dépend fortement de la configuration du moule et varie en fonction de l'effet de séparation des carottes, du nombre d'empreintes et de la forme des canaux. Beaumont a une grande expérience dans la conception de telles formes et REP possède le savoir-faire en matière de spécificités du caoutchouc: ensemble, ces deux entreprises offrent une solution associant l'ingéniosité de la forme la plus adaptée pour une application donnée et la mise à disposition de la licence nécessaire pour ce type de technologie.

Avantages d'un remplissage équilibré

L'avantage de l'équilibre thermique réside dans la réduction du temps de vulcanisation, cependant un remplissage équilibré apporte également un grand nombre d'avantages.

Dans le cas d'un déséquilibre, la pression à l'intérieur de la première empreinte à remplir continue d'augmenter, étant donné que la pression est nécessaire au remplissage des autres empreintes. Cette pression excessive génère des bavures au niveau des plans de joint et des fuites de mélange au niveau des inserts. L'ébavurage des pièces prend souvent beaucoup de temps et le nettoyage du moule à chaque cycle est plus laborieux et plus long. D'autre part, nous avons moins de pression de maintien dans la dernière empreinte à remplir, laquelle risque donc de présenter des parties non remplies ou une mauvaise liaison au niveau des inserts.

Les parties non remplies génèrent l'encrassement du moule et les impuretés accumulées nécessitent à leur tour le démontage fréquent du moule de la presse pour nettoyage. Le paramétrage de la presse devient dans ce cas un compromis entre la première et la dernière empreinte à remplir, rétrécissant ainsi la fenêtre process, qui n'est donc plus très sûr.

Obtenir un remplissage équilibré grâce à la mise en oeuvre du module FillBalancer® permettra une amélioration de tous les éléments abordés plus haut en vue de la réduction du temps de vulcanisation:

- Formation de bavures réduite
- Temps opérateur sur la presse réduit (nettoyage réduit du moule), donc réduction du temps de cycle total
- Main d'œuvre réduite pour la finition de la pièce (ébavurage plus facile)
- Economie de mélange (les bavures et fuites)
- Augmentation du nombre de cycles entre les nettoyages (moins de bavures et moins de parties non remplies, donc moins d'impuretés)
- Réduction des déchets (fenêtre process plus large, donc process plus sûr)
- Meilleure homogénéité des caractéristiques de la pièce entre les empreintes et meilleure stabilité au niveau de la production globale

Dans l'ensemble, ce système permet une augmentation de la productivité associée à une réduction des coûts de la main d'œuvre, de l'énergie, du mélange et de la maintenance. Le retour d'investissement est généralement obtenu au bout de quelques semaines ou mois.

Le retour d'investissement du système
FillBalancer® est généralement obtenu au bout
de quelques semaines ou mois.

FillBalancer Max® (brevets 6.077.470 & 6.503.438)

L'objectif de ce système consiste à assurer que le mélange à température la plus élevée se trouve dans la zone critique de la pièce pendant le procédé de moulage par injection. Etant donné que le centre de la pièce est la dernière zone à vulcaniser, le fait d'avoir le mélange à température la plus élevée au centre de la pièce permettra une réduction globale du temps de vulcanisation.



Système conventionnel



FillBalancer Max®

La répartition de la température à l'intérieur du flux et l'effet sur l'équilibre de remplissage

Le système est basé sur le même principe que celui spécifié auparavant, mais avec une configuration différente. En divisant le flux, en le retournant et en le rassemblant à nouveau, le mélange haute température qui se trouvait à l'extérieur est mis au centre du flux. Une fois de plus, l'augmentation de la température au centre du flux entraîne une réduction du temps de vulcanisation.

Perte de pression

Avec la mise en oeuvre du module TempInverter®, le mélange frais est dirigé vers l'extérieur du flux lorsque ce dernier entre dans le moule, ce qui lui permet un temps de flux plus long avant d'être prévulcanisé. Nous avons un meilleur flux et une perte de pression globale inférieure comparés aux systèmes conventionnels.

En pratique, TempInverter® permet d'obtenir un flux de 10 % plus long dans les mêmes conditions.

FillBalancer® permet d'autre part de diminuer la viscosité du mélange envoyé dans la dernière empreinte à remplir, permettant ainsi un flux plus fluide et une demande de pression réduite.

BCR

En cas d'utilisation d'un BCR, le module TempInverter® doit être implanté ailleurs. Il peut être facilement intégré dans la busette du BCR.

FillBalancer® peut toujours être utilisé dans les canaux secondaires, si présents. Il peut également être intégré dans le BCR pour un meilleur équilibre.

Economies d'énergie

Cette approche permet d'optimiser l'utilisation d'énergie en équilibrant la répartition d'énergie et en la dirigeant vers les zones critiques. En plus, la réduction du temps de vulcanisation aura pour conséquence une réduction du temps d'affectation de la machine à la même production et donc du temps pendant lequel la machine consomme de l'énergie. Globalement, nous obtenons une réduction d'énergie considérable sur une production donnée.

Logiciel de gestion du mélange

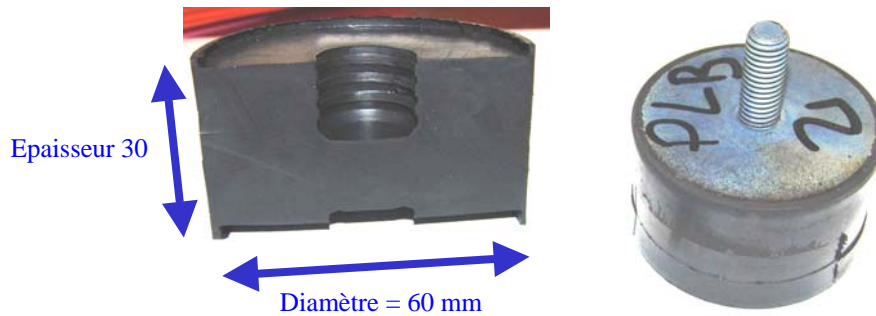
Tous les modules de la solution TurboCure® travaillent selon le même principe; ils gèrent la chauffe du mélange en vue d'obtenir une meilleure homogénéité de l'échauffement. TurboCure ne sert pas à augmenter la température maximum locale du mélange, mais au contraire la température minimum locale du mélange.

L'avantage obtenu en terme de temps de vulcanisation n'engendre ni contrainte ni dégradation du mélange.

TurboCure® permet une réduction du temps de vulcanisation sans contrainte ni dégradation du mélange.

Exemples d'applications industrielles

Ensemble silentbloc



Mélange: Caoutchouc naturel 50 Sh A

2 empreintes sur une totalité de 8 empreintes dans le moule utilisées pour ces essais

Température du moule: 187 °C

Temps de vulcanisation normal: 285 s

Critères de vulcanisation: obtention de caractéristiques statiques et dynamiques de la pièce + absence de partie à vulcanisation insuffisante visible lors de la découpe de la pièce + absence de marque de pré-vulcanisation

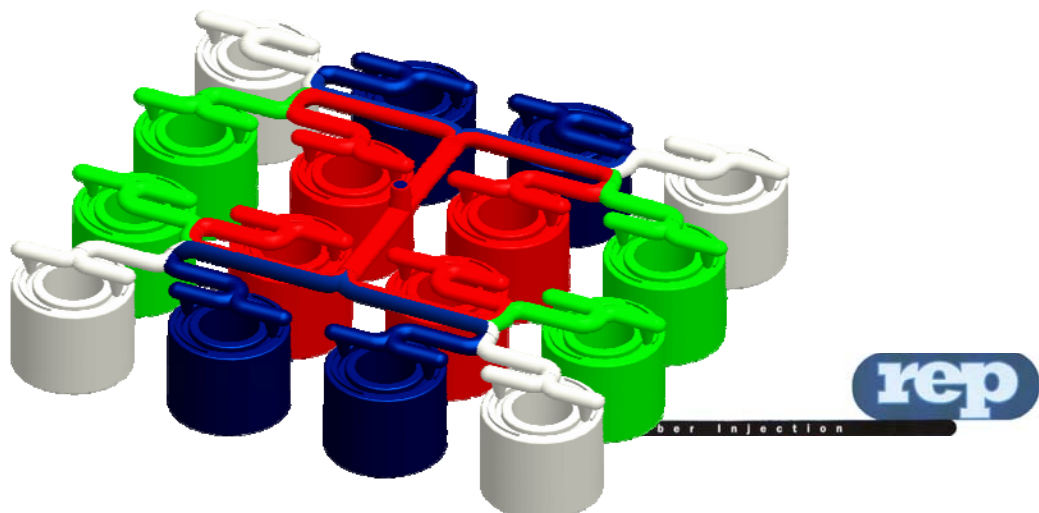
	Temps de vulca.	Amélioration	Variation
Référence	285 s		
TempInverter®	205 s	80 s	- 28 %
Fill Balancer®	170 s	115 s	- 40 %
TurboCure® intégral	140 s	145 s	- 51 %

Cet essai montre l'efficacité de la solution TurboCure® permettant d'obtenir une réduction du temps de vulcanisation de plus de 50 % et la possibilité d'association des différents modules pour obtenir un meilleur rendement général.

51 % de réduction du temps de vulcanisation
avec TurboCure®

Manchon

Dans cet exemple, seul le module FillBalancer® est utilisé pour obtenir un meilleur équilibre entre les empreintes.



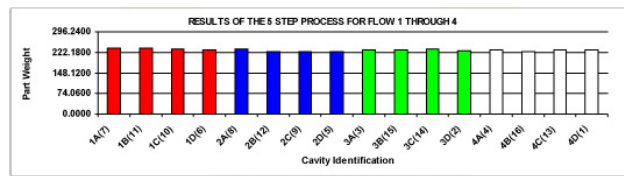
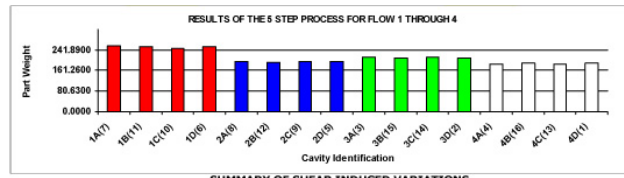
Machine V68 / 400 T
200 g de caoutchouc naturel par pièce
16 empreintes

L'équilibre du moule était le suivant:

25.6 % de déséquilibre
avec canaux conventionnels:



3.5 % d'équilibre
avec FillBalancer®:



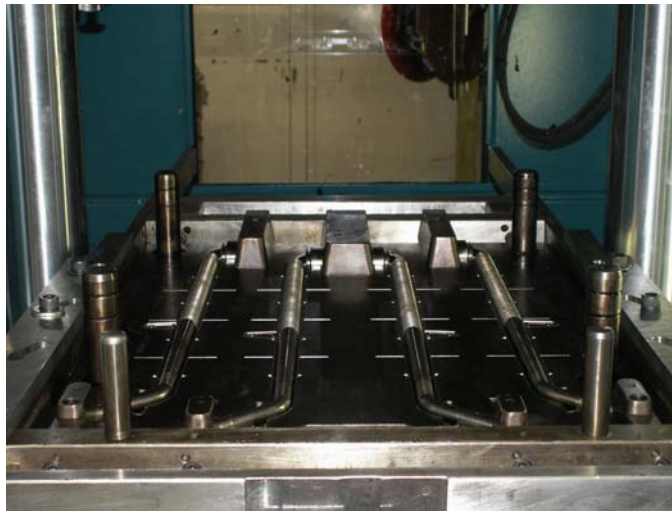
Nous avons obtenu les avantages suivants:

- Le temps de vulcanisation est passé de 510s à 300s avec FillBalancer®, permettant une réduction de 42 %.
- Les bavures et fuites au niveau des inserts ont pu être réduits, permettant une économie de mélange de 1 350 kg par an, avec une réduction du temps de démoulage et donc une augmentation de la productivité.
- Suppression d'un certain nombre d'opérations d'ébavurage, permettant une réduction du coût de la main d'œuvre.
- La stabilité en terme de rigidité statique de la pièce d'une empreinte à l'autre a pu être améliorée de 27 % et le facteur Cpk global sur la production de 29 %.

FillBalancer® a permis une réduction du temps de vulcanisation de 42 % avec une amélioration en terme de qualité, de volume de rejets et de coût de main d'œuvre.

Passe-fil

Dans cet exemple, nous avons utilisé TempInverter®.



La machine était du type V59 (250 T), le mélange du type EPDM 50 ShA et le moule à 4 empreintes avec une plaque canaux. Le temps de vulcanisation initial était de 100s qui a pu être réduit à 60s grâce à l'utilisation de TempInverter®. L'amélioration était de 40s.

TempInverter® a permis une réduction du temps de vulcanisation de 40 %.

Conclusion

TurboCure® est composé de 3 modules, lesquels peuvent être mis en oeuvre ensemble ou individuellement en fonction de l'application. Il permet une réduction du temps de vulcanisation allant jusqu'à 50%. Cette solution respecte l'intégrité du mélange, étant donné qu'il ne génère pas trop de cisaillement ni de contrainte. La qualité se voit également améliorée.

Ces modules sont basés sur des solutions brevetées représentant donc quelques frais minimes de licence. Ces derniers s'intègrent facilement dans le process.

Il s'agit d'une approche révolutionnaire. Cette solution peut être comparée en terme de gain de productivité et de qualité à l'existant au moment de l'invention du procédé de moulage par injection à une époque où seul le procédé de moulage par compression existait.