

Vie industrielle

Intégration du produit
dans les logiciels
orientés objet
(2^{ème} partie)

Vie pédagogique

Une science nommée
TECHNOLOGIE

TECHNOLOGIES & FORMATIONS
REVUE DES ENSEIGNEMENTS TECHNOLOGIQUES, PROFESSIONNELS ET DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR
MAI - JUIN 2003
108
ISSN 0297-1074

Examens & concours

Concours général
des lycées - 2003
Génie des matériaux
classe de terminale STI

Formation aux automatismes

La palette des actionneurs pneumatiques
section 2

Dossier

**CAO
& démarche
de conception**

La conception détaillée et la pré-industrialisation de pièces en matières plastiques

Bernard GILBERT,
chef de travaux
avec la contribution de
Jacques DAURES,
Guy ESTADIEU,
Jacques MAGOT,
Jean-C. TACHOIRE,
professeurs au Lycée
Louis Rascol d'ALBI.

Le présent article reprend la démarche générale suivie par l'équipe d'Albi, puis présente un exemple d'études de pré-industrialisation assistée par ces nouveaux outils, et propose enfin de nouvelles perspectives pédagogiques dans des domaines où actuellement les savoirs sont plus souvent issus de cumuls d'expériences que construits.

La démarche de conception détaillée (voir figure 1)

La démarche de conception d'un produit conduit d'une expression du besoin à la définition spécifiée de ses différentes pièces. La première étape d'analyse fonctionnelle externe permet de transformer le besoin en cahier de charges fonctionnel. L'étape suivante, la conception préliminaire, qui s'appuie sur des outils de description fonctionnelle internes tels que le FAST, associés à des méthodes de créativité, conduit aux principes et à l'architecture du produit ainsi qu'à la pré-conception de chaque pièce assemblée dans la maquette numérique. Les calculs de mécanique et les

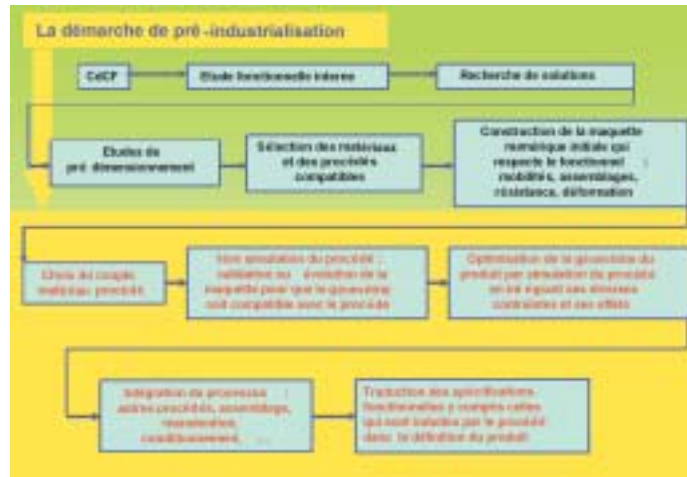


Figure 1 : la démarche de conception détaillée passe par les études de pré-industrialisation avec une approche progressive de l'adéquation entre pièce, matériau et procédé

Une équipe d'enseignants de STS CPI du Lycée Louis Rascol d'Albi a réalisé plusieurs travaux sur le sujet, coordonnés par Bernard Gilabert, chef de travaux et supervisés par Michel Aublin, IGEN. Des activités pédagogiques relatives à plusieurs études de cas seront bientôt disponibles au CNR-CMAO de Cachan. Elles permettent d'aborder le procédé d'injection des matières plastiques et le forgeage des métaux. L'exploitation des fonctionnalités des outils logiciels utilisés ouvre des pistes pour l'enseignement de conception et d'industrialisation dans les formations à bac+2, mais également en pré-bac.

simulations de fonctionnement ayant validé le pré-dimensionnement, il est donc nécessaire de se préoccuper de la faisabilité technique des pièces, d'autant plus que la production imposera des outillages spécifiques, souvent coûteux, et pénalisants pour les délais. Il faut donc faire "bon du premier coup". A cet effet, il convient de s'assurer progressivement, pour chaque pièce, de l'adéquation entre le produit (sous-entendu : ses fonctions, sa géométrie), le matériau, le ou les procédés d'obtention et éventuellement le processus. La très grande diversité des matériaux associée à l'évolution permanente des procédés de transformation complique le choix, mais constitue un élément favorable à la compétitivité des produits, pourvu que les critères techniques et économiques soient satisfaits au mieux. Ces obligations imposent une pro-

gression dans des décisions, difficiles à prendre, qui sont le résultat d'un travail d'équipe impliquant concepteur et fabricant :

- un premier niveau vise le choix du couple matériau-procédé,
- la deuxième étape consiste à valider la compatibilité des formes générales de la pièce au regard du procédé choisi,
- enfin, il faut affiner la définition des formes, valider le procédé et le principe des outillages.

Il est évident que le niveau de maîtrise du métier lié au procédé augmente à chacun des niveaux. Toutefois, l'aide au choix, comme la validation des décisions, sont de plus en plus facilitées par des logiciels spécifiques. Certains sont directement utilisables par les techniciens et ingénieurs de conception, d'autres sont des outils métiers conçus pour des spécialistes, et constituent un moyen essentiel de dialogue dans le travail des équipes "projet".

CAO ET DÉMARCHE DE CONCEPTION PRÉ-INDUSTRIALISATION & INTÉGRATION INFORMATIQUE

Un exemple d'études de pré-industrialisation de pièces en matières plastiques obtenues par injection

Le produit et son contexte industriel

Les correcteurs de phares équipant les gammes Mégane et Laguna sont fabriqués par l'entreprise Valeo Eclairage et Signalisation en très grande série : 11000 ensembles/jour, soit 2,5 millions de pièces/an. Le bureau d'études est situé dans la région parisienne et l'unité de production d'injection et assemblage se trouve à 200 km environ.

Le produit présenté **figure 2** permet deux types de réglages du faisceau lumineux :

- par le conducteur pour diminuer sa longueur lors d'une circulation en pleine ville, le retour en position préréglée s'effectuant dès la coupure de la commande,
- par un spécialiste depuis le caisson moteur pour répondre aux règles d'ergonomie et de sécurité routière.

Première étude d'amélioration du produit à l'aide des outils CES 4 et CADMOULD RAPID

Problème posé par les coûts d'assemblage

La fonction de réglage manuel par le technicien impose une solution constructive avec un limiteur de

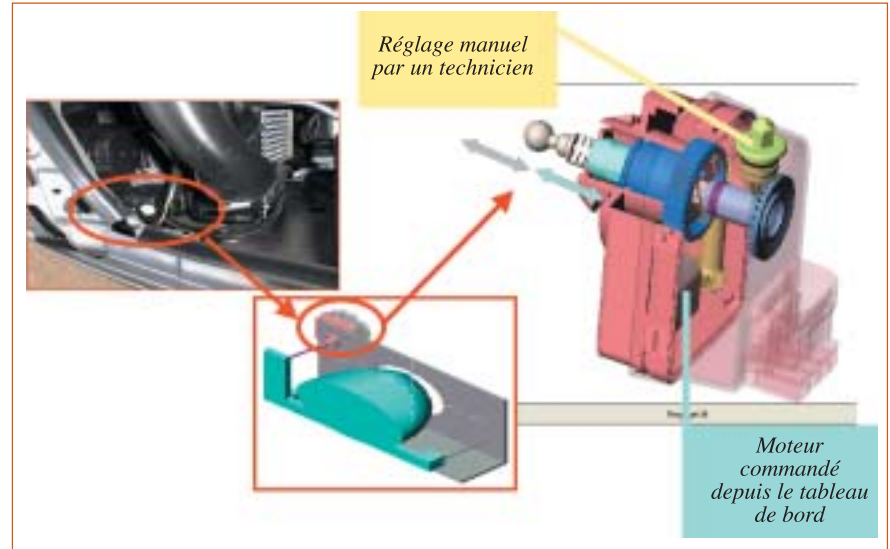


Figure 2 : le produit : sa mise en situation et ses deux systèmes de transformation de mouvement correspondants aux deux types de réglages.

couple (voir **figure 3**). L'arbre creux de la roue conique, réalisée à partir d'un polymère, dispose de trois fentes qui assurent sa déformation, l'élasticité étant assurée par un ressort enroulé dont le montage est excessivement coûteux et pénalisant pour les délais.

Proposition de nouvelle solution

Le bureau d'étude propose d'éliminer le ressort en créant une forme assurant la fonction limiteur par déformation et élasticité. Il s'agit donc de s'assurer du respect du "fonctionnel" et de la compatibilité avec le matériau et le procédé. Une étude à l'aide des éléments finis (**figure 4**) permet de prédéterminer les formes et les caractéristiques mécaniques du

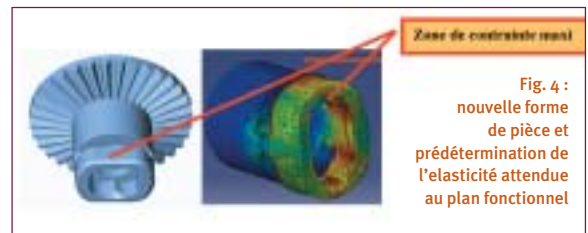


Fig. 4 : nouvelle forme de pièce et prédétermination de l'élasticité attendue au plan fonctionnel

matériau pour satisfaire les fonctionnalités.

Choix du couple matériau/procédé

Les contraintes fonctionnelles imposent les critères suivants pour le matériau :

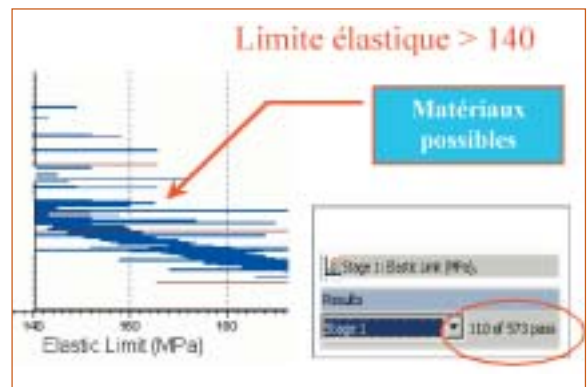
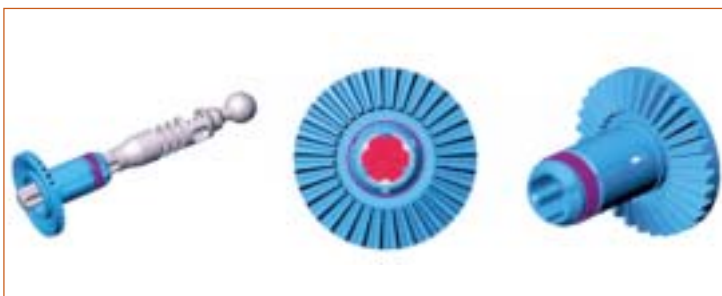
- limite élastique ≥ 140 MPa,
- module de Young réduit,
- coût limité en raison de la très grande série.

L'utilisation du logiciel CES 4 conduisant à la famille des matières possibles est illustrée sur les **figures 5, 6, 7 et 8**.

Elle aboutit à un choix d'un polyamide élastomérisé PA 6.6.

Fig. 5 : choix des matériaux répondant au critère de limite élastique

Figure 3 : la solution constructive relative à la fonction technique "limiteur de couple" dans la solution initiale



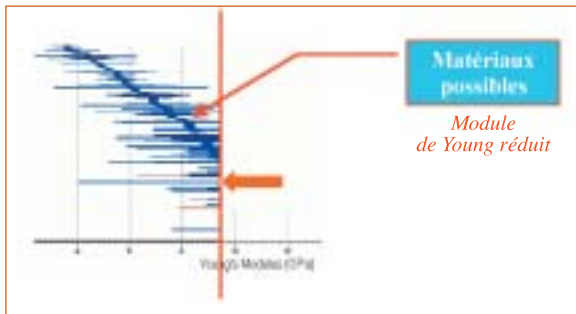


Fig. 6 : choix des matériaux répondant au critère de raideur

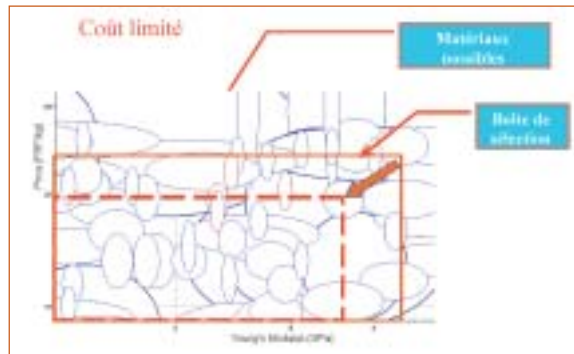


Fig.7 : choix des matériaux répondant au critère de coût limité

Exploitation des résultats de la 1^{ère} simulation d'injection

A ce stade de l'étude, il s'agit de se préoccuper de la compatibilité du procédé avec la nouvelle pièce et son matériau.

Compte tenu de la série, l'injection n'est pas remise en cause et l'étude d'industrialisation de la pièce précédente est disponible. Le logiciel CADMOULD RAPID, très facile d'accès permet, à partir du fichier STL de la pièce, de préciser le plan de joint, le ou les points d'injection, le matériau choisi, puis à partir de caractéristiques du procédé qu'il propose par défaut, on peut lancer la simulation de l'injection.

Cela conduit à une série de résultats très intéressants pour le concepteur comme pour le fabricant. Le premier essai consiste à placer le point d'injection là où il se trouvait sur la pièce précédente (figure 9) et les divers résultats sont présentés sur les figures 10 et 11.



Fig. 9 : modèle associé au premier essai de simulation

L'analyse rapide des résultats de la simulation démontre l'incompatibilité de cette solution avec le "fonctionnel", il faut donc se diriger vers une autre proposition pour le ou les points d'injection.

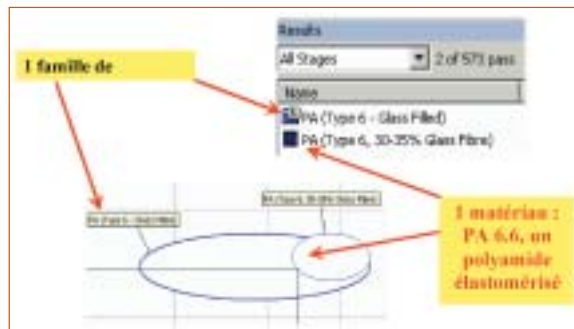


Fig. 8 : synthèse des critères et résultats du choix de la famille de matériaux possibles

Exploitation des résultats de la 2^{ème} simulation

Une approche plus logique consiste à placer deux points d'injection proches des zones fortement sollicitées (figure 12) et à effectuer une nouvelle simulation dont l'essentiel

des résultats sont présentés aux figures 13, 14, 15 et 16 (pages suivantes). D'autres résultats plus orientés "métier", non présentés ici, sont fournis par le logiciel : pression, température, viscosité, vitesses du front de matière.

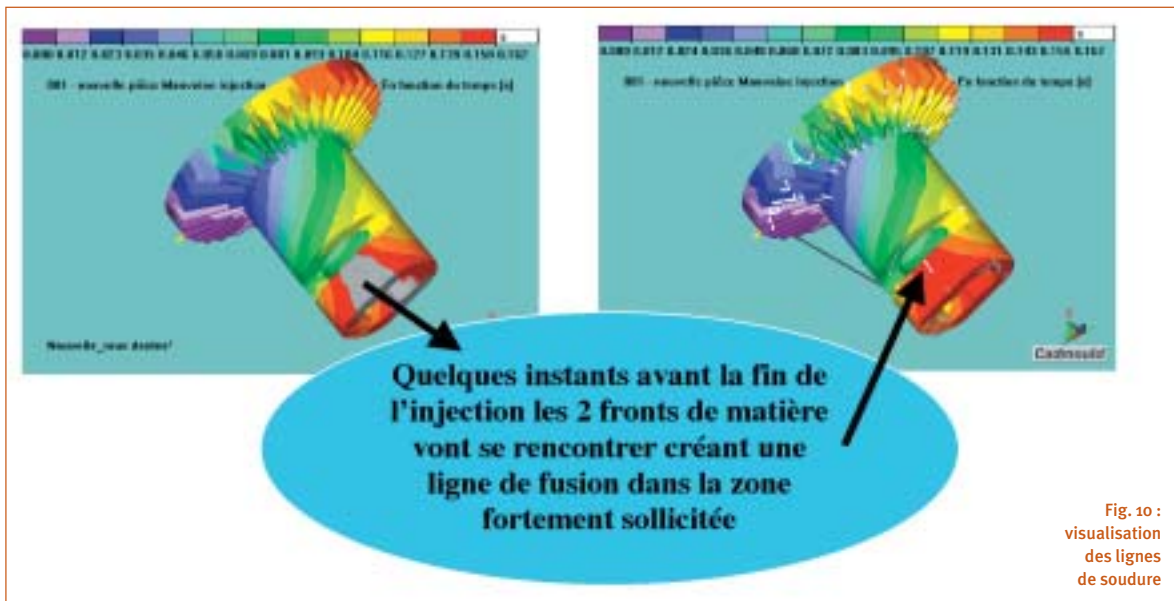


Fig. 10 : visualisation des lignes de soudure

CAO ET DÉMARCHE DE CONCEPTION PRÉ-INDUSTRIALISATION & INTÉGRATION INFORMATIQUE

Fig. 11 :
visualisation
des inclusions
d'air qui
peuvent
détériorer la
matière en la
brûlant dans la
zone critique

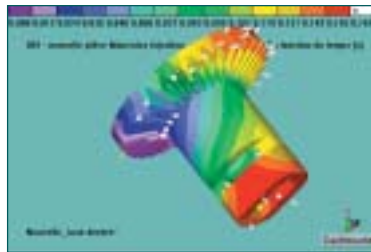


Fig. 12 :
modèle associé
à la deuxième
simulation



Fig.13 :
visualisation
de gaine solide
qui garantit
un bon
déroulement
de la matière

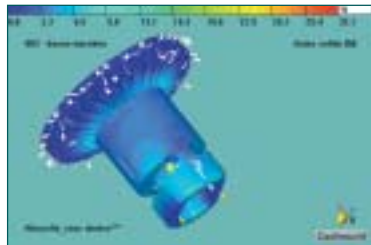


Fig.14 :
visualisation
des lignes de
soudure et des
inclusions d'air
qui ne
perturbent plus
la zone
critique

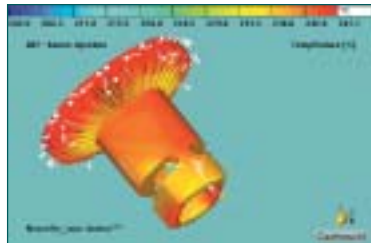


Fig.15 :
visualisation
des pertes de
charges dans
les zones
rétrécies

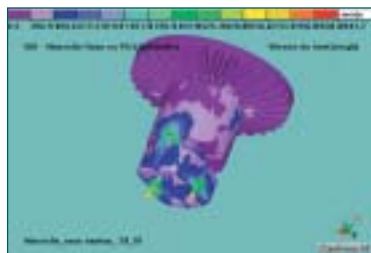
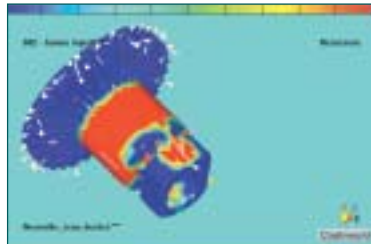


Fig.16 :
visualisation
des zones à
risques de
retassures



Etude de faisabilité du moule

Le principe du moule doit être validé au regard des critères géométriques (absence de contredépouilles, épaisseurs, congés) et des critères technico-économiques du procédé (nombre de pièces par grappes, géométrie des canaux de coulée...)

Conclusion

Cette deuxième solution a été validée par le groupe "projet" de chez VALEO en dépit de la complexité supérieure du moule. Le BE a modifié en conséquence les formes de la pièce sur le dessin de définition, il a déterminé les dimensions de la forme fonctionnelle où se trouve la contrainte maxi (figure 4), sachant qu'il faut établir un compromis entre une forme qui oriente la déformation temporaire et une épaisseur minimale qui assure l'écoulement correct de la matière pendant l'injection. La zone où les lignes de soudure sont prohibées ainsi que les zones où peuvent se trouver les points d'injection ont été également spécifiées sur le document de définition du produit fini (figure 17).

Un travail en équipe dans lequel le technicien du BE doit connaître des éléments relatifs aux matériaux et au procédé et être capable de dialoguer avec le spécialiste "métier".

Deuxième étude de modification de produit à l'aide des outils CES 4 et CADMOULD PRO Problème posé

La pièce précédente a pu être entièrement définie à l'aide de simulations avec CADMOULD RAPID, et cela de manière très satisfaisante. Pour les pièces plus complexes ou de formes "caisson", l'optimisation doit passer par un outil de simulation plus complet : CADMOULD PRO (comme son concurrent MODFLOW) assure cette assistance. L'outil prend en compte l'ensemble des étapes du procédé :

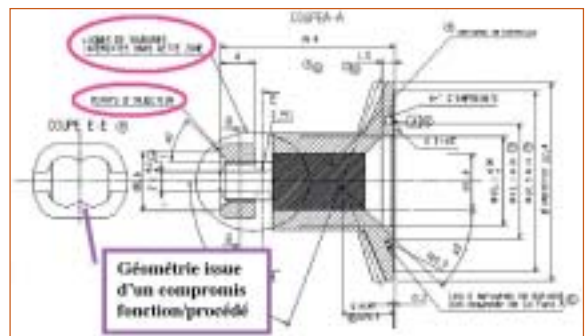
- injection de la matière,
- compactage de la matière,
- refroidissement du moule entraînant un retrait,
- éjection de la pièce.

Il s'agit de visualiser les mêmes paramètres qu'avec CADMOULD RAPID, mais aussi la déformation après compactage et démoulage, les diverses pressions et les temps d'injection et de compactage, la force de fermeture du moule, etc... Sachant que le refroidissement du moule pendant l'injection est un moyen que les professionnels utilisent pour limiter le retrait, la modélisation thermique



Fig. 18 :
demi-boîtier
du correcteur
de phare

Figure 17 : extrait du dessin de définition de la pièce



aidera à valider la géométrie de la pièce. La petite étude suivante sur un demi-boîtier du correcteur de phare (figure 18) a permis à l'équipe albigeoise de valider une évolution de forme.

Choix du couple matériau/procédé

Toujours à l'aide du logiciel CES 4, le choix des matériaux pour chacun des deux demi-couvercles peut se faire suivant la démarche indiquée figure 19 : démarche de choix des matériaux des demi-couvercles à l'aide du logiciel CES 4.

Contraintes

Contraintes communes aux 2 pièces :

- température environnante,
- résistance mécanique,
- résistance au déchirement,
- masse mini.

⇒ Sélection 1

Contraintes spécifiques au carter inférieur :

- aptitude à la déformation,
- masse minimale.

⇒ Sélection 2

Affinage de la sélection du couvercle supérieur :

- coût minimal

⇒ Sélection 3

Le détail de l'étude, similaire à l'étude précédente et non présenté ici, conduit au choix d'un PP (polypropylène) chargé à 20% de fibres de verre pour cette pièce.

Dialogue avec les spécialistes du procédé d'injection

Il s'agit, à partir de la géométrie et du matériau de la pièce, de définir la température du moule, le temps d'injection, et d'évoquer les cadences de production (nombre de pièces par grappes), ainsi que leurs conséquences sur l'outillage. Le spécialiste fournira tous les éléments de la simulation ou la réalisera lui-même. Le technicien du BE se limitant à valider les fonctionnalités de la pièce et sa géométrie.

Exploitation des résultats de simulation

Le point d'injection situé sur la base ouverte du demi-couvercle est satisfaisante au regard du remplissage (figure 20), des risques de lignes de soudure, des inclusions d'air, des propriétés de l'écoulement. Le logiciel CAD-MOULD PRO donne de nom-

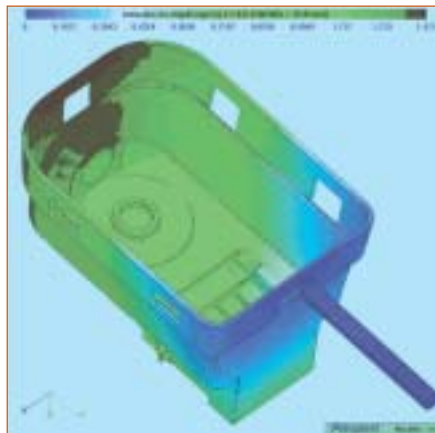


Figure 20 : visualisation du remplissage et de la température de la matière à la fin de l'injection

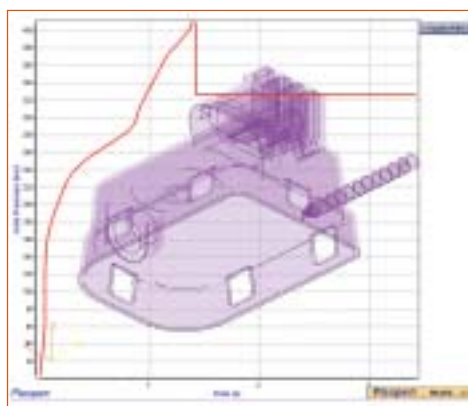


Figure 21 : visualisation de la force de fermeture du moule

breux éléments "métiers" intéressants tel que la force de fermeture du moule (figure 21).

Toutefois, le point important est ici l'examen du retrait de la pièce après refroidissement (figure 22).

Conclusion

La création de deux nervures (figure 23) et une modification de la "thermique" associée au refroidissement du moule conduisent à une solution satisfaisante comme le montre la simulation de la figure 24.

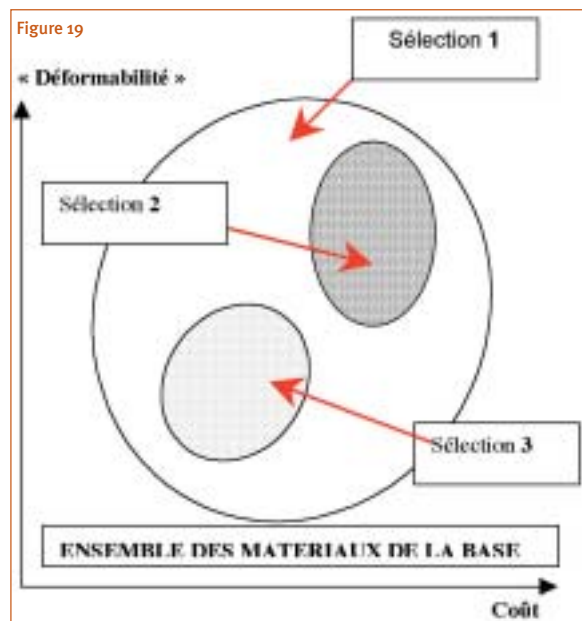
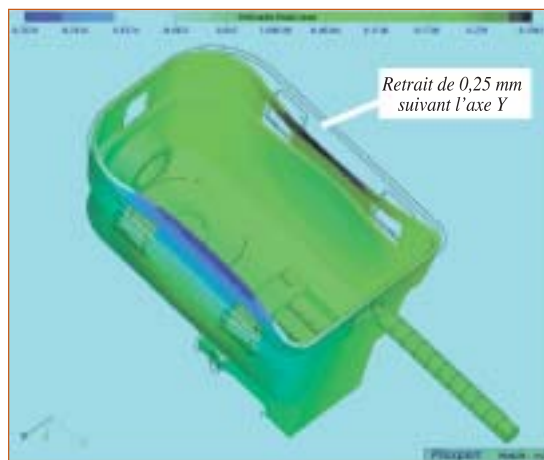


Figure 19

Figure 22 : visualisation du retrait et de l'effet "boîte" inacceptable



CAO ET DÉMARCHE DE CONCEPTION PRÉ-INDUSTRIALISATION & INTÉGRATION INFORMATIQUE



Figure 23 : modification de la géométrie de la pièce avec la création de deux berrures



Figure 24 : visualisation du nouveau retrait satisfait pour le "fonctionnel"

Pistes et considérations sur les incidences pédagogiques en post-bac

En parallèle de l'intérêt de ces outils (CSE 4 pour l'aide au choix du couple matériau/procédé, CAD-MOULD RAPID/PRO, mais aussi FORGE 2 ou d'autres pour la simulation de procédé) pour les industriels qui gagnent du temps dans le développement des produits et qui limitent les risques d'investissements sur des outillages coûteux, les études de cas conduites par l'équipe d'Albi ont mis en évidence de nombreuses pistes pédagogiques :

- pour faire découvrir aux étudiants très concrètement la démarche d'optimisation de la relation produit (fonctions et géométrie)/matériau/procédé,
- pour étayer la construction et la structuration des savoirs sur le choix des matériaux,
- pour apporter et structurer des savoirs sur les procédés de base,
- pour la maîtrise de la définition des formes et des spécification de produit,
- pour l'accès à des compétences de travail en équipe "projet".

Il semble en particulier que, pour les étudiants de post-bac (STS CPI et DUT GMP), les divers savoirs

sur les matériaux peuvent être approchés par l'exploitation de banques de données industrielles associées à des données sur les normes, pourvu que leur structuration fasse bien apparaître :

• les types de caractéristiques des matériaux :

- physico-chimiques : masse volumique, conductibilité, résistance à la corrosion...
- mécaniques : résistance, dureté, résilience, élasticité, résistance à la fatigue...
- rhéologiques : viscosité...

• les familles de matériaux :

- désignation,
- caractéristiques principales,
- domaines d'utilisation,
- aptitudes à la modification de structure, de forme,
- coût estimatif.

Pour les classes suivantes :

- matériaux métalliques,
- matériaux polymères, élastomères,
- matériaux composites,
- céramiques, verres.

De même, les savoirs sur les principaux procédés (usinage, formage, injection, forgeage...) doivent être structurés avec attention afin que l'étudiant soit conduit à se poser les mêmes questions lorsqu'il découvrira un procédé non étudié. A cet effet, les synthèses peu-

vent être construites sur la trame suivante :

- le principe : description du processus associé au procédé identifiant les transformations physico-chimiques successives de la matière,
 - les contraintes économiques : taille des lots, fréquence de production, coûts des outillages, performances des équipements, tolérances économiques,
 - les contraintes techniques de l'interface produit/procédé : porte-pièce ou empreinte, approvisionnement en matière, récupération et parachèvement de la pièce,
 - les paramètres du procédé : relatifs au matériau de la pièce, à l'outillage, à la machine,
 - les incidences du procédé : sur l'homogénéité de la matière, sur les caractéristiques mécaniques de la pièce, sur la géométrie de la pièce.
- Ces derniers éléments ayant une incidence directe sur les fonctions, la géométrie, les spécifications du produit qu'il faut concevoir et fabriquer.

Au regard de la grande diversité des matériaux et des procédés de mise en œuvre, l'accès aux bases de données est une nécessité qu'il faudra accompagner par des manipulations, des expérimentations et quelques données vidéo

pour construire les savoirs de base.

Tous ces enseignements, actuellement assurés par transfert d'expériences dans des leçons souvent proches d'un "catalogue", peuvent plus efficacement être abordés par l'étude de quelques procédés "clés" et par la réalisation de petits problèmes de pré-industrialisation.

Des exemples de séquences pédagogiques à destination de STS CPI, proposées dans cet esprit par l'équipe d'Albi, sont présentés sur le site du CNC-CMAO de Cachan.

Réflexions sur le pré-bac

Les formations pré-bac n'échappent pas aux évolutions des matériaux et des procédés et le potentiel de ces nouveaux outils offre des nombreuses possibilités aux enseignants pour construire des activités pédagogiques. Il ne s'agit surtout pas de maîtriser ces outils, mais de s'en servir pour amener les élèves à comprendre les interactions entre la géométrie d'une pièce et le procédé d'obtention. Dans l'esprit du travail présenté en 2002 par une équipe de Saverne dans "Technologies et Formations" et également présent

au CNR-CMAO, quelques simulations préparées à l'avance sous forme de fichiers vidéo doivent remplacer avantageusement un cours écrit. Dans ce cadre, des outils tels que

CADMOULD PRO peuvent constituer un moyen simple de découvrir quelques caractéristiques des matériaux et de construire des images mentales exactes sur les procédés.

Références des logiciels utilisés

CES 4

Déjà présenté dans la revue "Technologies et Formations", CES 4 du professeur Ashby de l'Université de Cambridge propose une approche structurée du choix du couple matériau/procédé.

Il est riche d'une base de données sur les procédés dont il rappelle les principes et les paramètres mis en jeu et d'une base de données particulièrement riche sur les matériaux et leurs propriétés en vue de leur transformation.

La méthode de recherche prend appui sur les caractéristiques importantes issues du cahier des charges pour converger progressivement vers la ou les familles de matériaux possibles par critères uniques successifs ou par combinaison logique de deux critères.

Cela induit une bonne connaissance des caractéristiques et des lois de comportement sous charge des matériaux.

La prochaine traduction en français du logiciel et l'ouvrage, déjà commercialisé en France, présentant et justifiant l'utilisation de CES 4, en fera un outil indispensable, à notre avis, pour les mécaniciens de bureaux d'études, comme pour ceux de bureaux des méthodes.

CADMOULD RAPID et CADMOULD PRO

Comme nous l'avons évoqué dans l'étude, CADMOULD RAPID est très facile d'utilisation et ne nécessite pas d'être un spécialiste en injection des matières plastiques. Il suffit de choisir un point d'injection, le matériau et les conditions d'injection simplifiées proposées par le logiciel pour lancer une simulation. Les principaux résultats sont :

- animation de l'écoulement de la matière,
- cartes des températures, des pressions, du taux et des contraintes de cisaillement, des vitesses du front de matière,
- position des lignes de soudures et des emprisonnements d'air,
- position des risques de retassures,
- pourcentage de gaine solide,
- pertes de charges dans l'écoulement...

Il se présente comme un véritable outil d'aide à la conception sans imposer des connaissances approfondies sur le procédé.

CADMOULD PRO offre des potentialités beaucoup plus orientées vers les professionnels.

En effet, il propose toutes les fonctionnalités de CADMOULD RAPID avec de plus les simulations :

- du compactage,
- de la thermique du moule,
- du retrait et des déformations,
- de l'orientation des fibres...

Cet outil s'adresse certes aux spécialistes, mais son exploitation doit aider le concepteur dans la phase de conception détaillée lors des revues de projets.

service lecteurs n° 108-10

La pré-industrialisation, l'industrialisation et la production

d'une pièce forgée en alliage d'aluminium

Jean-Jacques DIVERCHY, IPR, avec la contribution de Roland BELOT, Emile HÉBRARD, Marc PAYELLEVILLE, professeurs au lycée Marie Curie de Nogent-sur-Oise

Le lycée Marie Curie de Nogent-sur-Oise, dans l'académie d'Amiens, prépare, entre autres, à cinq BTS complémentaires du secteur de la mécanique industrielle : conception des produits industriels - étude et réalisation des outillages de mise en forme des matériaux - mise en forme des alliages moulés - mise en forme des matériaux par forgeage - productique mécanique. L'atout de cette structure pédagogique est de disposer des compétences et des équipements permettant de mener l'essentiel des activités techniques d'une affaire industrielle du type "conception préliminaire - conception détaillée et pré-industrialisation - industrialisation - production" de produits mécaniques réalisables par moulage, forgeage et/ou usinage. Un des projets techniques, actuellement en phase de "production", concerne le produit figure 1, un moteur 7 cylindres en étoile équipant des avions sans pilote. Ces avions, commandés à distance, sont principalement utilisés pour la prise de vues aériennes. Le contexte de l'industrialisation de ce produit correspond à une production sérielle par lots renouvelables de 50.

Le présent article reprend une partie des activités conduites dans le segment "conception détaillée et pré-industrialisation - industrialisation - production" d'une pièce forgée en alliage d'aluminium, la bielle-mère de ce moteur.

Elle illustre également l'un des intérêts majeurs de la simulation numérique des opérations de production : réaliser des essais de production sans outillages et sans immobilisation de machines.

Les bénéfices sont évidents : pas de dépenses dans la réalisation et la modification des outillages, délais de mise au point réduits.

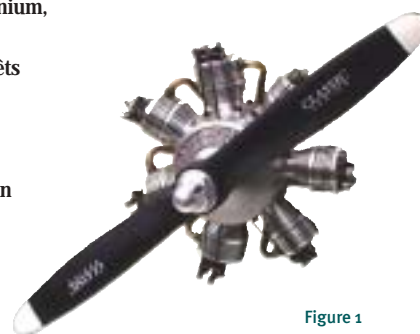


Figure 1