



**HAL**  
open science

## Utilisation des liens produit-procédés pour une conception proactive: application à la fonderie

Lionel Martin, Lionel Roucoules

### ► To cite this version:

Lionel Martin, Lionel Roucoules. Utilisation des liens produit-procédés pour une conception proactive: application à la fonderie. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03391217>

**HAL Id: hal-03391217**

**<https://hal.science/hal-03391217v1>**

Submitted on 21 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Identification produit-procédés pour une conception proactive: application à la fonderie

L. MARTIN<sup>a</sup>, L. ROUCOULES<sup>a</sup>

a. Arts et Metiers ParisTech, CNRS, LSIS, équipe Ingénierie, Mécanique, Systèmes, 2 cours des Arts et métiers, 13617 Aix en Provence - FRANCE

## Résumé :

*Cette communication propose une démarche d'identification des liens produit-procédés basée sur des simulations numériques des procédés de fabrication dans le cas de procédés de fonderie. Ces identifications seront utilisées dans une approche DFM proactive afin de faire émerger les informations du produit (et sa géométrie) à partir de la définition des alternatives de gamme de fabrication. L'outil DFM proposé fait partie des applications données aux métiers, ici la fonderie, pour faire évoluer la représentation du produit.*

## Abstract:

*This paper deals with the identification of product – process relations based on rapid simulation of casting processes. This identification is necessary in a proactive DFM methodology to provide product data with respect to several alternatives of manufacturing processes. This DFM tools is given to operative users (here foundry men) in order to improve product definition.*

**Mots clefs : Approche Produit-Procédé, DFM, Fonderie.**

## 1 Introduction

Il est aujourd'hui pleinement admis que la conception de systèmes mécaniques<sup>1</sup> est une activité qui recourt à des expertises individuelles menées « au plus tôt » dans le processus de conception et à des actions collaboratives (synchrone ou asynchrone, en présentiel ou à distance) qui permettent de faire converger le processus vers une solution de conception.

Concernant les activités expertes, au-delà d'être menées « au plus tôt » il est important [1] qu'elles :

- Soient proactives et non plus réactives. En effet, le mécanisme du « au plus tôt » sera d'autant plus bénéfiques que la solution de conception n'est pas totalement figée et que l'expertise pourra participer à la proposition de solutions alternatives et à la restriction des espaces de solutions. Cette proposition « proactive » dans les processus de décision et fondamentalement différente des actions « réactives » pour lesquelles l'expert attend qu'une ou des solutions soient proposées et choisi alors parmi ces alternatives qui ne resteront pour lui qu'un compromis admissible au lieu de tendre vers son idéal.
- Permettent une intégration avec les autres afin que les propositions faites par chacun des experts du groupe de conception puissent être « un minimum » comprises par les autres afin de :
  - Réellement pouvoir confronter ces différentes « intentions de conception » lors des activités collaboratives de prise de décision
  - Faire émerger, également de manière collaborative, des relations entre les différentes expertises au sein de la modélisation du produit qui sera basée sur une approche multi-vues.

---

<sup>1</sup> Les résultats proposés sont toutefois amplement extrapolables à la notion de systèmes mécatroniques.

A partir de ces concepts méthodologiques, l'article propose de montrer comment il est possible d'« outiller » les experts en fabrication de produits<sup>2</sup> afin de leur donner un poids plus importante dans les processus de conception dit DFM proactifs.

La première section de l'article donne la vision globale de la proposition et les grandes lignes des spécifications et de l'outil existant basé sur l'intégration de relations produit-procédé dans le processus de conception. La section 2 présente alors quel peut être un mécanisme d'identification des relations produit-procédé dans le cas des procédés de fonderie. Cette identification est alors réalisée à partir d'outils de calcul numériques rapides. Finalement la dernière section reprend les principales conclusions et énonce les perspectives que les auteurs donnent à ce travail.

## 2 Une approche DFM proactive dans le processus de conception

La définition des informations constituant le produit d'un processus d'ingénierie (dont en particulier les informations nécessaires à sa fabrication) est considérée comme un processus d'évolution d'un modèle multi-vues, qui pourra, pour une vision générale de l'ingénierie, être intégré à des modélisations de processus et d'organisation industrielle tel que cela est proposé dans [2]. Pour animer ce processus d'évolution, les différents acteurs<sup>3</sup> ou métiers ont recours à deux mécanismes qui sont :

- l'enrichissement : chaque acteur apporte des nouvelles données propres à son métier en se basant partiellement sur les données déjà présentes dans le modèle.
- la prise de décision : un acteur qui se trouve dans l'impossibilité d'assurer la cohérence des données déjà présentes dans le modèle avec les contraintes de son métier est amené à collaborer avec d'autres pour résoudre les conflits de conception.

Ce dernier mécanisme nécessite souvent un choix qui doit minimiser le niveau d'insatisfaction global des acteurs. C'est précisément cette phase de choix qui est décisive pour la conception puisqu'elle va conditionner fortement les alternatives possibles de la conception. Or parmi les outils logiciels d'aide à la conception, très peu fournissent un support à cette phase pourtant cruciale. L'outil présenté ici a pour objectif d'assister cette phase en proposant aux acteurs différentes alternatives de conception au moyen de la simulation numérique du processus de fabrication. Cela requiert une rapidité des simulations pour avoir un usage interactif de l'outil mais surtout l'utilisation d'une nouvelle méthodologie. C'est ce point qui est développé dans ce papier.

### 2.1 Le « juste besoin » comme fondement de base

Plutôt que de raisonner à partir d'une géométrie proposée par le bureau d'étude, ce qui est, encore aujourd'hui le plus fréquent dans les bureaux des méthodes, l'hypothèse de départ consiste à considérer que ce sont les flux d'effort et/ou de matière qui vont permettre de faire émerger la géométrie « au juste besoin ». Le processus de conception tend alors à converger vers une solution dite « right the first time » au lieu d'entrer dans une boucle « redo until right ».

Le modèle d'entrée pour le choix des procédés de fabrication doit donc être minimal et répondre au « juste besoin » fonctionnel. Ainsi les autres expertises peuvent réellement se positionner comme proactive dans le processus de conception. Ce point d'entrée fonctionnel peut être modélisé par exemple en s'appuyant sur les flux énergétiques circulant dans le système pour respecter les fonctions principales du produit. [3] propose dans ce sens des résultats basés sur les concepts fondamentaux de la littérature tels que FBS [4] ou les modèles Bond-Graphs [5]. Ceci-dit les auteurs admettent que, selon le type de produit, ces modèles de flux énergétiques ne sont pas systématiquement applicables.

### 2.2 Identification et intégration produit-procédés

A partir de cette modélisation initiale « minimale » les personnes en charge du choix des procédés de fabrication peuvent alors intervenir (i.e. intégrer leurs informations) dans le processus de conception. L'hypothèse du « au plus tôt » est donc respectée et le modèle d'interface produit-procédés présenté

---

<sup>2</sup> Ces personnes sont généralement celles du bureau des méthodes qui participent à la sélection des procédés de fabrication et à l'industrialisation des produits.

<sup>3</sup> On trouve également dans la littérature la notion de métier ou d'expertise tel que cela est proposé dans l'introduction.

maintenant permet à ces experts de proposer des alternatives de conception basées sur les intentions de fabrication du produit.

A partir de l'hypothèse que tout procédé de fabrication<sup>4</sup> met en jeu un flux de matière, la modélisation des flux permet de représenter ce que peuvent être les gammes de fabrication alternatives du produit [6]. La génération des caractéristiques topologiques et de tolérances de ces flux de fabrication laisse alors émerger la géométrie des produits fabriqués alternatifs. C'est cela que les auteurs nomment le modèle d'interface produit-procédés [7] qui respecte les spécifications méthodologiques de notre contexte de travail (cf. Introduction : pro-activité et collaboration). Les travaux actuels [8] concernant ce modèle d'interface montrent que les contraintes résiduelles qui sont des caractéristiques du produit issues des procédés de fabrication peuvent également être modélisées.

La figure 1 montre, sur un cas simple, comment se déroule alors un scénario « DFM proactif ». Ce scénario est proposé à partir d'une architecture KBE<sup>5</sup> qui permet :

- De modéliser la (les) structure(s) « procédés » (i.e. gamme de fabrication) telles qu'elles sont proposées par l'expert et, via l'interface produit-procédé, d'en faire émerger les solutions alternatives du produit.
- Une base de données qui permet de renseigner les connaissances en fabrication de l'expert toujours à partir des relations potentielles produit-procédé (comment varient les caractéristiques du produit en fonction des paramètres du procédé de fabrication).

Cette application KBE se positionne entre les applications MPM<sup>6</sup> [9] et la CAO. L'objectif n'est pas de redévelopper des applications déjà existantes mais bien de pallier au support d'une approche de conception centrée sur les métiers et non pas autour d'un modèle CAO préétabli.

En tant qu'application KBE elle repose, comme cela a été dit, sur une base de données (BD) qui représente ici les relations entre le procédé et le produit. Le scénario montre que si la BD ne contient pas les informations nécessaires il est alors possible de recourir à des mécanismes d'identification. La section suivante montre l'approche proposée dans le cas des procédés de fonderie, les travaux de [10] montrent une autre application au procédé de grenailage de mise en forme.

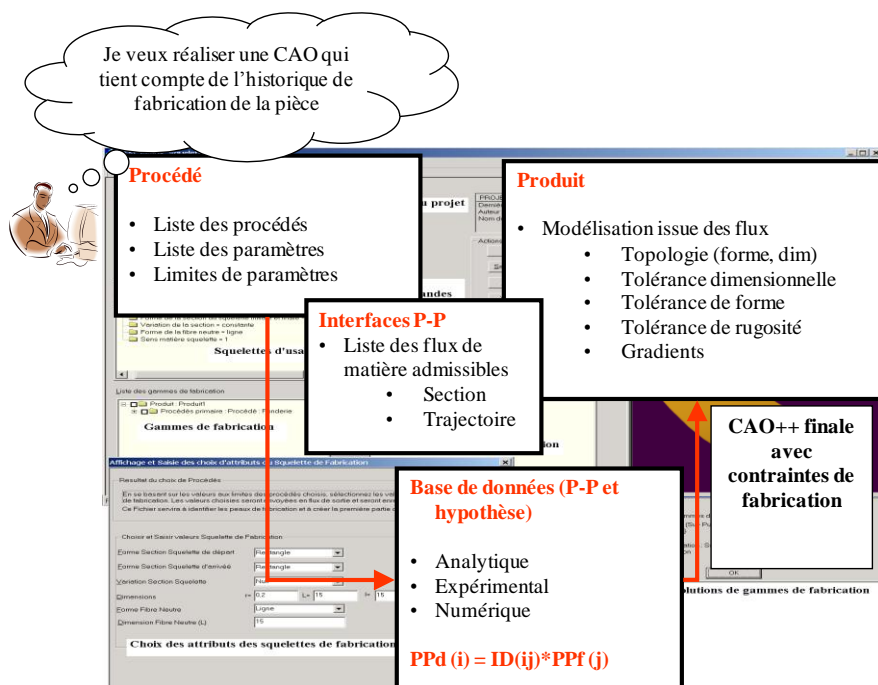


FIG. 1 – scénario d'illustration de l'approche DFM proactive.

<sup>4</sup> A l'heure actuelle les procédés de soudage, considérés comme des procédés d'assemblage plus que de mise en forme, n'ont pas été étudiés donc ne rentrent pas dans cette hypothèse.

<sup>5</sup> Knowledge Based Engineering

<sup>6</sup> Manufacturing Process Management

### 3 Identification numérique produit-procédé dans le cas de la fonderie

Dans le cas de la fonderie, les simulations numériques permettant de représenter les flux peuvent être utilisées pour définir comment devraient se faire les écoulements de matière (et donc en calculant l'enveloppe mathématique des flux quelle serait la géométrie du produit) afin de satisfaire à plusieurs critères de qualité propre au métier.

C'est en ce sens que l'on considère que cette méthodologie de conception pour la fabrication (DFM) est proactive à condition que les simulations numériques puissent être suffisamment rapides :

- Les relations produit-procédé requises dans le processus de conception existent (i.e. ont déjà été formalisées de manière analytique) dans la base de données alors elles peuvent être utilisées
- Les relations ne sont pas connues dans la base de données, alors plusieurs cas se présentent :
  - Elles peuvent être identifiées numériquement tout en restant dans le processus de conception. C'est alors le cas pour lequel il est nécessaire que ces simulations soient rapides afin de pouvoir analyser l'ensemble des alternatives. **C'est dans ce cas que se placent les travaux présentés dans cet article.**
  - Elles peuvent alors être identifiées (numériquement et/ou expérimentalement) hors du processus de conception afin d'en tirer des modèles plus ou moins génériques et rapides qui pourront alors être instanciés dans la base de données. Ce sont les approches « classiques » d'identification.

Concrètement (cf. Figure 2), pour une fonction contrainte de type 'effort  $F$  à transmettre entre deux surfaces fonctionnelles', il faut utiliser la définition géométrique des surfaces fonctionnelles impliquées et chercher à les relier entre elles par un flux de matière, mais en utilisant la simulation de la fabrication. En effectuant plusieurs simulations d'écoulement, on définit des alternatives de conception.

#### 3.1 Les différentes étapes de l'identification par simulation

La Figure 2 présente la description pas à pas des différentes étapes conduisant à l'identification des liens produit-procédé qui vont permettre de générer les alternatives de conception. Il s'agit d'un problème simple à symétrie de révolution :

- L'étape 1 présente la définition des surfaces fonctionnelles de la pièce. Il s'agit de deux surfaces orientées suivant une même direction. Ces surfaces peuvent être issues du cahier des charges ou provenir simplement d'autres pièces du mécanisme dans lequel elle devra s'insérer.
- L'étape 2 illustre la fonction qui doit être assurée par la pièce. Ici, il s'agit d'un flux physique : le flux d'effort transmis de la surface supérieure vers la surface annulaire inférieure. De part la symétrie de révolution, ce flux suit une trajectoire que l'on va pouvoir représenter sur une portion angulaire restreinte. C'est ce qui est figuré pour les étapes 3 et 4.
- L'étape 3 figure six alternatives possibles faisant varier les inflexions et les tangences de la trajectoire. Sachant que l'ensemble des trajectoires possibles entre les deux surfaces est infini, on illustre donc une infime partie de l'espace des solutions à investiguer. L'effort nécessitant de la matière pour être transmis, il y a donc nécessité d'ajouter une notion d'épaisseur à la trajectoire. Cela crée ainsi le modèle géométrique de simulation qui servira de support pour la suite.

Il convient ensuite de choisir, si cela n'a pas été fait en amont les paramètres de fabrication nécessaires à la fabrication (matériaux, température de coulée, orientation de la pièce...). Puis, pour chaque alternative de conception, il convient de réaliser une simulation de l'écoulement matière et du refroidissement. Afin de pouvoir être réalisée dans un processus de conception (choix parmi des alternatives) la simulation du refroidissement se doit d'être rapide et cette rapidité (environ quinze minutes) est possible grâce à des outils précédemment développés [11]. A partir du modèle des résultats de simulation, on obtient alors les paramètres métier caractérisant la fabrication d'une alternative de la pièce : vitesse de remplissage, remplissage laminaire/turbulent, fraction liquide en fonction du temps, température de fin de coulée gradient thermique, veine de solidification etc.

- L'étape 4 consiste à trier parmi les alternatives envisagées les formes qui sont fabricables. Plusieurs critères permettent d'effectuer ce tri : en fonderie, il convient d'éviter les pièces avec des

épaisseurs trop faibles qui vont empêcher le remplissage ou au contraire des massivités locales générant des retassures au moment de la solidification. D'autres critères de fabrication pourraient de la même manière être utilisés pour trier les alternatives : mal venues, temps de gale, porosités etc. Dans une approche DFX proactive et collaborative, des critères qui ne sont pas propres à la fonderie (i.e. fabrication) car issus d'autres phases de la conception pourront également être utilisés à ce stade : complexité des formes, valeur de courbure min-max etc. Ceci ne fait cependant pas l'objet de cet article.

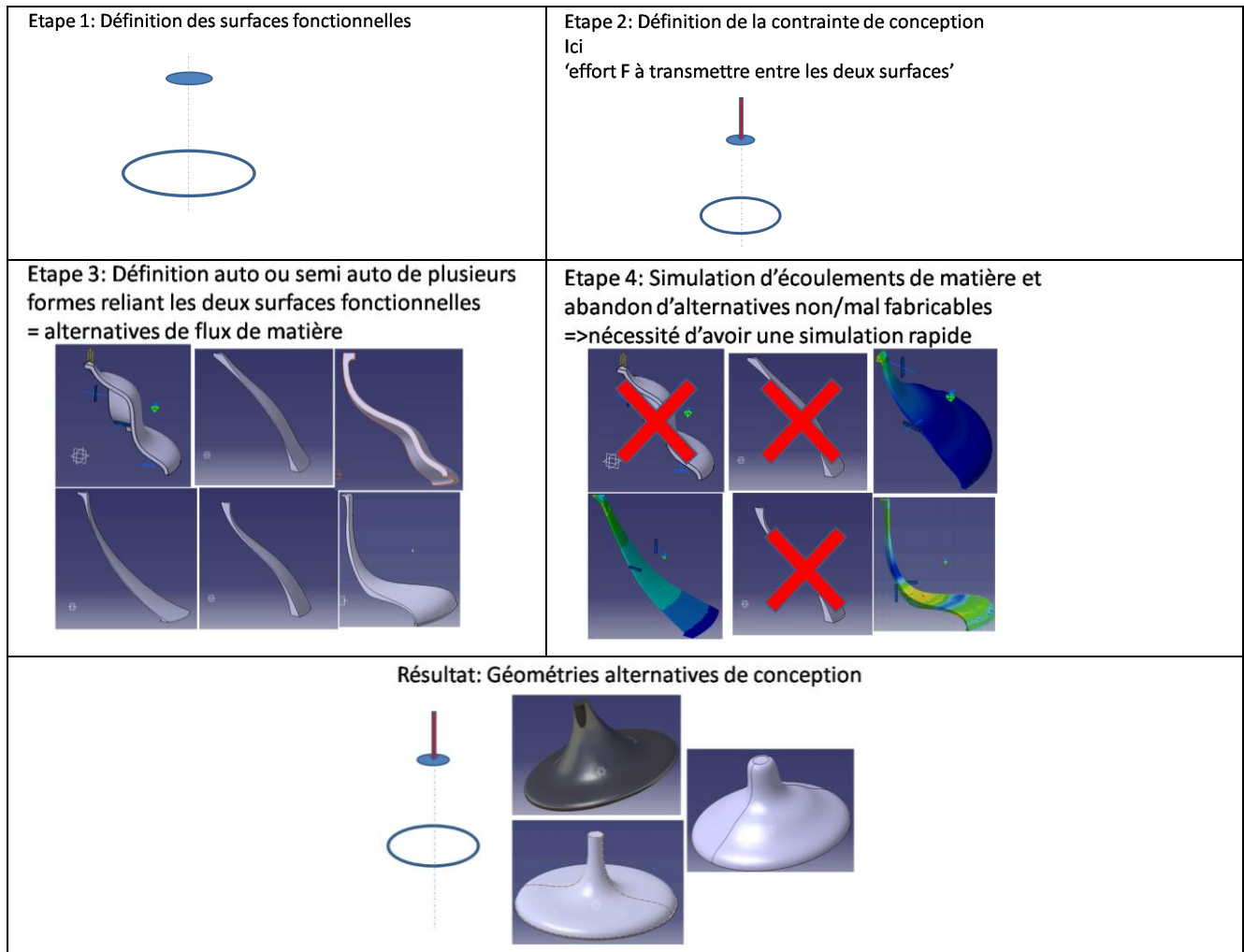


FIG. 2 – Différentes étapes de la démarche envisagée.

A ce stade, conformément au principe du juste besoin, il n'est pas nécessaire de sélectionner la meilleure alternative mais simplement d'indiquer au concepteur celles qui sont fabricables et lui laisser la décision finale du choix de la forme. En effet, le concepteur est susceptible d'avoir à choisir une forme qui n'est pas optimale localement suivant les critères de l'étape 4 mais qui soit satisfaisant d'un point de vue global sur le processus de conception. Cela exige donc que l'on conserve les alternatives fabricables.

### 3.2 Formalisation de la méthodologie

Afin de mener à bien la démarche de conception avec cette méthodologie, il convient de formaliser les relations entre les paramètres d'entrée (i.e. les données utilisées pour mener à bien la simulation) et les paramètres de sortie (les résultats de simulation suivant les critères de choix). On se trouve donc en présence d'un système mathématique dont la fonction de transfert transforme le vecteur d'entrée en un vecteur de sortie (pas nécessairement de même dimension).

Ce type d'étude de variabilité n'est possible que si l'on a mené les simulations sur toutes les alternatives de conception. C'est comme si l'on réalisait un plan d'expérience virtuel complet [12]. Une fois toutes les combinaisons simulées, il est possible d'étudier la variabilité.

La maîtrise de la conception passera par la connaissance de la variabilité des paramètres du vecteur de sortie en fonction des paramètres du vecteur d'entrée. En effet, lors des processus de décision intervenant en cas de révision, il est nécessaire de savoir quels sont les paramètres critiques et ceux qui sont modulables sans conséquence sur la fabricabilité.

## 4 Conclusion et perspectives de travail

Cet article a montré que les nouvelles approches de conception telles qu'elles ont été spécifiées depuis maintenant 20 ans demandent un effort de modélisation et de développement des nouveaux outils support à l'activité de conception. Parmi eux, les résultats proposent des outils de DFM proactifs afin de permettre aux acteurs qui sélectionnent les gammes de fabrication de pouvoir participer de manière proactive à la définition du produit. Ces outils sont en partie sur l'identification des relations produit-procédé que nous réalisons ici par des simulations numériques rapides dans le cas des procédés de fonderie.

Les premiers résultats montrent la faisabilité de l'approche méthodologique présentée dans cet article par des scénarios ainsi que des modèles et des outils informatiques associés. Concernant les simulations en fonderie, seule la phase de remplissage peut-être effectuée rapidement. La phase d'implémentation globale de l'application KBE couplée aux outils de simulation rapide permettra en tant que perspectives de pouvoir traiter des cas d'étude plus complets.

## References

- [1] Roucoules, L., Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. Une approche au juste besoin : des spécifications fonctionnelles du produit aux choix des procédés de fabrication, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne, 2007.
- [2] Girard Ph., La conception : satisfaction des spécifications VS conduite des activités humaines, CFM 2005, Troyes, 29 août- 2 septembre 2005.
- [3] Klein Meyer J.S., Modélisation multi-physique des systèmes complexes dans un contexte de DFX. Application à la conception de micro-mécanismes, thèse de l'Université de Technologie de Troyes, 4 septembre 2008.
- [4] Gero J.S., Design prototypes: a knowledge representation schema for design, AI Magazine Vol. 11 No 4 pp 26e36, 1990.
- [5] Thomas J., Simulation by bond graph, Springer Verlag, 1991.
- [6] Skander A., Méthode et modèles DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit, thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Troyes, 2006.
- [7] Skander A, Roucoules L., Klein Meyer JS., Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design, dans International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-007-1003-2, 2007, 2008.
- [8] Elgueder J., Cochenec F., Roucoules L., Rouhaud E., Product-process interface for effective product design and manufacturing in a DFM approach, 3rd International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems CMSM, 16-18 mars, Hammamet (Tunisie) 2009.
- [9] Fortin C., Huet G., Manufacturing Process Management: iterative synchronisation of engineering data with manufacturing realities, International Journal of Product Development, Vol. 4, N°. 3/4, 2007.
- [10] Cochenec F., Rouhaud E., Roucoules L., Flan B., Numerical and experimental investigation on shot-peening induced deformation. Application to sheet metal forming, 8th International Conference on Residual Stresses, 2008.
- [11] Martin Lionel, Moraru George, et Véron Philippe, A design-for-casting integrated approach based on rapid simulation and modulus criterion, Int. J. Product Development, Vol. 7, Nos. 3/4, pp261, 2009
- [12] Taguchi G., Introduction to quality engineering, Asian productivity organization, Dearborn, MI: American Supplier Institute, 1996.