



HAL
open science

Méthode et outil pour la robotisation d'une cellule de fabrication de pièces en matériaux composites

Baptiste Arnault, Thierry Soriano, Manel Zerelli

► To cite this version:

Baptiste Arnault, Thierry Soriano, Manel Zerelli. Méthode et outil pour la robotisation d'une cellule de fabrication de pièces en matériaux composites. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03421209

HAL Id: hal-03421209

<https://hal.science/hal-03421209v1>

Submitted on 9 Nov 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.

Méthode et outil pour la robotisation d'une cellule de fabrication de pièces en matériaux composites

B. ARNAULT, T. SORIANO, M. ZERELLI

Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des MATériaux (LISMMA),
SUPMECA, Maison des Technologies, place G. Pompidou, 83000 TOULON

Résumé :

L'utilisation d'un procédé de fabrication innovant entraîne une refonte des process, une modification des gammes de production ainsi que l'adaptation des pièces produites aux contraintes de ce nouveau procédé. Ces changements s'effectuant en même temps, il est logique de ne pas repenser séparément le produit d'un côté et le procédé de l'autre, mais de s'orienter vers une convergence produit-procédé. Cette approche combinée est particulièrement importante dans le cas d'un passage d'un procédé manuel à un procédé automatisé ou semi-automatisé, car les modifications de la production sont conséquentes et impactent fortement le produit et les procédés. Nous présentons dans cet article une méthode de robotisation associée à la technologie innovante de fabrication en matériaux composites appelée placement de fibres, ainsi qu'un outil d'aide à la décision pour valider les choix effectués.

Mots clefs : robotisation, ingénierie simultanée, produit, procédé, placement de fibre, simulation

1 Introduction

Lors d'un changement de procédé de fabrication, il est nécessaire d'adapter la production existante à ce nouveau process, mais celui-ci doit également s'adapter au produit qu'il est destiné à fabriquer. Il est donc plus intéressant d'effectuer cette adaptation de façon convergente entre le produit et le nouveau procédé.

Après une petite introduction au procédé innovant autour duquel cette étude s'articule plus particulièrement, suivie de quelques travaux de la littérature sur l'approche simultanée en conception, nous présenterons une méthode de robotisation d'une gamme de fabrication de pièces en matériaux composites en commençant par plusieurs définitions, puis en expliquant l'algorithme d'étude de l'augmentation de la robotisation. Un outil d'aide à la décision pour cette méthode sera enfin présenté, sous la forme d'une plateforme de simulation.

Dans le cadre d'un projet industriel, cette méthode de robotisation d'un moyen de production et son outil de validation sont appliqués à une fabrication utilisant la technologie de placement de fibres composites par bras robotisé, développée par Coriolis Composites [1]. Des fibres de matériau sont amenées jusqu'à une tête de dépose dont le rouleau va déposer et compacter les fibres sur le moule (figure 1).

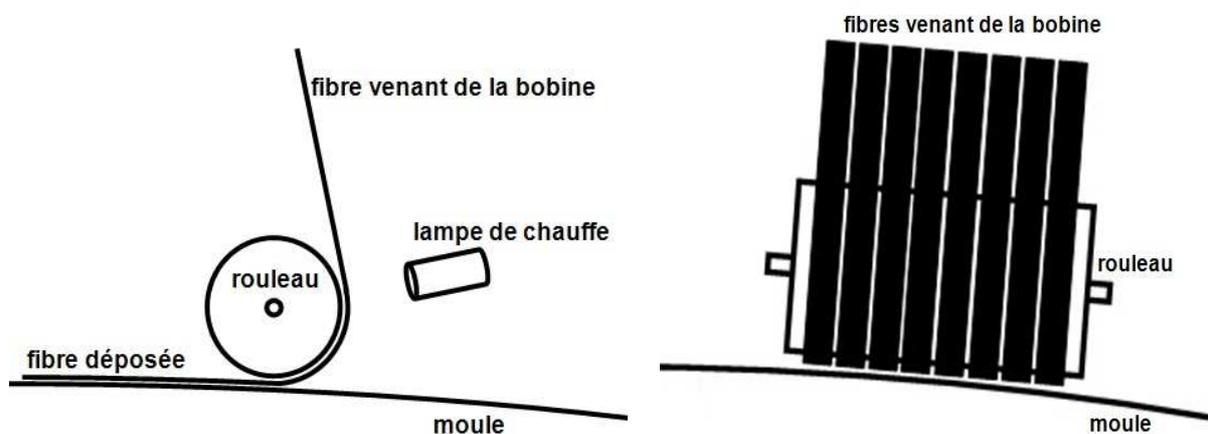


FIG. 1 – Principe de fonctionnement du placement de fibres composites.

Plusieurs auteurs examinent l'approche intégrée produit-procédé et proposent des méthodologies différentes. Skander [2] puis Etienne [3] proposent la « conception pour la fabrication » (DFM : Design For Manufacturing). Cette approche vise à faire émerger la géométrie la plus adaptée aux procédés et aux produits en choisissant les procédés de fabrication beaucoup plus en amont lors de la conception. Malgré plusieurs idées proches de celles qui seront développées par la suite (utilisation de plusieurs gammes de production), les travaux de Skander, et ceux d'Etienne qui en sont une prolongation, ne seront pas utilisables dans notre étude qui prend comme point de départ un produit existant et déjà fabriqué. D'autres méthodologies prennent en compte l'intégralité du cycle de vie du produit dans l'approche produit-procédé, comme présenté par Yan et al. [4]. Les auteurs proposent une vision matricielle de différents indices représentant chacun une caractéristique du procédé, tels que le coût, l'impact environnemental et d'autres. Bien qu'intéressante dans sa gestion approfondie des caractéristiques, cette étude ne propose pas de point de départ pour un travail axé sur la simulation. A contre-courant d'une approche intégrée classique, Chen et al. considèrent l'ingénierie simultanée comme un travail en parallèle de deux équipes, l'une s'intéressant à l'optimisation du produit par ses fonctionnalités, tandis que l'autre se concentre sur la minimisation du coût de fabrication [5]. L'utilisation de métriques de satisfaction permet la communication des progrès entre les équipes. Cette approche décompose le problème et répartit les tâches pour résoudre ensuite les interactions entre équipes grâce à la théorie du jeu. Bien qu'originale, cette vision est utilisée avant la conception proprement dite du produit, donc ne sera pas non plus applicable à notre cas en raison de l'existence du produit avant le changement de procédé. L'approche multi-objectifs de Singh, qui vise à simplifier voire éliminer les modifications et ajustements au cours de la conception [6] ne conviendra pas non plus pour les mêmes raisons.

On constate donc qu'une approche visant à remplacer un procédé existant et majoritairement manuel par un nouveau procédé robotisé n'est pas présente dans la littérature disponible. Il est possible que de tels travaux aient été menés par des industriels mais les éventuels résultats sont alors conservés en interne et ne sont pas diffusés. Il est par conséquent intéressant de développer une méthode permettant cette approche, dans un premier temps en lien avec quelques procédés existants puis éventuellement de l'élargir à d'autres et offrir ainsi une méthode générique.

2 Méthode de robotisation d'une gamme de fabrication de composites

Cette approche va s'intéresser à l'aspect reconception du process de fabrication, en utilisant comme point de départ une intention d'introduire de la robotisation dans la gamme de fabrication. En raison des spécificités du projet dans lequel cette étude s'insère et de la technologie de placement de fibres afférente, la méthode a été pensée un peu plus spécifiquement pour la fabrication de pièces en matériaux composites et pour une évolution d'un procédé de dépose manuel à un procédé de placement de fibres automatisé. Le passage à un tel procédé est valable pour des pièces d'assez grande taille, en raison notamment de l'encombrement de la tête du robot. Cependant, celui-ci peut déposer des fibres dont la longueur minimale est de 90 mm.

2.1 Définitions

L'approche convergente analyse un rapprochement du produit et du procédé de fabrication associé. Cette adaptation réciproque du procédé et du produit trouve une limite théorique du côté du procédé lorsque la robotisation de celui-ci est totale. Il est alors toujours possible d'optimiser le procédé automatisé, mais les modifications ne seront plus majeures et auront moins d'impact sur la gamme de fabrication qu'un changement radical comme le passage de manuel à robotisé. Etant donné l'importance de la robotisation dans cette étude, la convergence entre le produit et le procédé sera quantifiée par un indicateur que nous appellerons Progression Robotisée PR. Cet indicateur propose un calcul des apports temporels dus à la robotisation. Un autre indicateur, lié au moyen de production par placement de fibre, sera le Gain de Dépose de matériau GD qui permet de mesurer l'efficacité de la dépose lors d'une nouvelle gamme par rapport à l'ancienne, et indique ainsi la réduction des pertes en matériaux.

La norme NF E60-182 définit les temps d'états pour un moyen de production correspondant à une machine ou un ensemble de machines en fonctionnement automatique ou semi-automatique [7]. Afin d'utiliser des définitions qui englobent à la fois les moyens de production constitués soit d'un ensemble d'activités manuelles, soit d'un mélange d'activités manuelles et automatiques, il faut élargir les définitions en précisant le moyen de production. Nous étendons le moyen de production, qui est défini dans la norme comme une « machine ou groupe de machines (incluant outillages et auxiliaires) en fonctionnement automatique ou

semi automatique », afin qu'il corresponde également à un poste de travail manuel ou un groupe de postes manuels.

Par la suite, nous utiliserons le temps de fonctionnement T_f (figure 2), pendant lequel le moyen de production produit des pièces bonnes et mauvaises en respectant ou non son temps de cycle de référence. C'est donc un temps où le moyen de production est actif et effectivement productif.

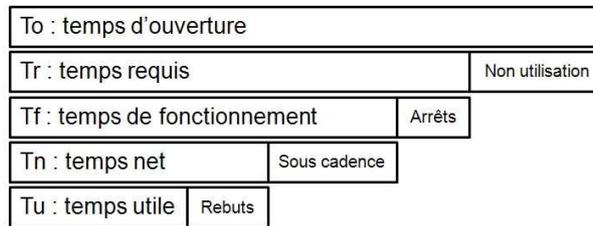


FIG. 2 – Temps d'états des biens définis par la norme NF E60-182.

La Progression Robotisée se définit comme le ratio du temps gagné entre deux versions de gamme d'un produit sur le temps de fabrication pour l'état de robotisation de référence. Soit T_R le temps de fabrication d'une pièce pour une robotisation de référence R et T_{R+n} le temps pour une robotisation $R+n$ supérieure à R . Pour définir PR , nous utilisons le temps de fonctionnement T_f divisé par le nombre de pièces bonnes (NPB) réalisées, afin de manipuler un temps par pièce correcte. On exprime alors PR comme suit :

$$PR = \frac{\text{temps gagné par pièce bonne}}{\text{temps de référence par pièce bonne}} = \frac{\frac{T_{f_R}}{NPB_R} - \frac{T_{f_{R+n}}}{NPB_{R+n}}}{\frac{T_{f_R}}{NPB_R}} = 1 - \frac{\frac{T_{f_{R+n}}}{NPB_{R+n}}}{\frac{T_{f_R}}{NPB_R}}$$

PR doit se situer entre 0 et 1, ce dernier cas étant le cas théorique idéal où le temps de fabrication nouveau d'une pièce est égal à 0, impossible en pratique. Si $PR = 0$ il n'y a pas eu de progression. Dans le cas où PR est négatif, alors il y a une régression car le temps de fabrication nouveau est plus important que le temps de fabrication de référence. L'idéal serait donc d'obtenir une valeur de PR la plus proche possible de 1.

Dans le cas de fabrication de pièces en composites, la quantité de matériau déposé est une donnée importante puisqu'elle permet de quantifier une valeur utile de la dépose, dans le sens où cette valeur représente le produit fini en termes de coût de matière. Afin de mesurer les gains obtenus au niveau du matériau déposé, on va donc introduire un autre indicateur : le Gain de Dépose GD . Pour pouvoir le définir, nous allons utiliser un indicateur intermédiaire, le taux de dépose TD qui est défini par le rapport de la quantité de matériau déposée sur la quantité de matériau entrée au niveau du moyen de production :

$$TD_{R+n} = \frac{Q_{D_{R+n}}}{Q_{E_{R+n}}}$$

Le Gain de Dépose peut donc être défini ainsi, utilisant les conventions de notation précédente sur les états de robotisation R et $R+n$:

$$GD = \frac{\text{évolution du taux entre les états de robotisations}}{\text{taux de référence}} = \frac{TD_{R+n} - TD_R}{TD_R} = \frac{TD_{R+n}}{TD_R} - 1$$

GD suit l'évolution du taux, donc en cas de dépose plus favorable (moins de pertes), GD sera positif et en cas de dépose moins favorable (plus de pertes) alors GD sera négatif. Plus GD est élevé, plus le gain est important. Cet indicateur dépend fortement des pertes initiales en matériaux.

Les valeurs obtenues ainsi dépendent des états de robotisation R et $R+n$ choisis. Il est possible d'utiliser l'étape de robotisation initiale (qui peut correspondre à la gamme manuelle) comme état R , ce qui donnera une valeur absolue de PR et de GD . Si l'on choisit deux états de robotisation successifs, on obtiendra une valeur relative.

2.2 Algorithme

La méthode que nous proposons est une méthode générique qui peut être suivie par un utilisateur désirant changer sa production manuelle pour introduire une part de robotisation plus importante. Il va alors suivre un

algorithme permettant de valider les changements effectués en fonction du produit et du procédé. La validation ou l'exclusion d'une nouvelle gamme dépendra de l'expérience de l'utilisateur de la méthode.

L'algorithme suivi lors de cette méthode est défini ainsi :

1. Partant d'une gamme existante, on effectue une modification de gamme ou de produit
2. La gamme est adaptée en fonction des changements du point 1
3. La nouvelle gamme est testée afin de la valider ou non
4. Soit la gamme est validée et on peut alors s'arrêter ou recommencer au point 1, soit la gamme n'est pas validée et on reprend au point 1

La modification effectuée au point 1 sera très souvent en premier lieu une augmentation de la part de robotisation de la gamme, afin de tester notamment une transposition directe de la fabrication manuelle vers une partie de la fabrication robotisée. Aux itérations suivantes, cette modification pourra être une robotisation plus importante de la gamme (une ou deux étapes robotisées en plus) ou bien un ajustement des caractéristiques du produit dans les limites de son cahier des charges – ce n'est pas une redéfinition complète. L'adaptation de la gamme au point 2 varie selon la modification effectuée précédemment. S'il s'agit d'une robotisation d'étapes de gamme, alors la gamme est consolidée pour assurer une continuité entre ces étapes nouvellement automatisées et le reste. S'il s'agit d'une modification du produit, alors la gamme prend en compte les éventuels changements sur le procédé que cette redéfinition entraîne.

Les tests du point 3 sont expliqués dans le paragraphe sur la plate-forme de simulation.

A l'issue des tests si la méthode reprend au point 1, la gamme existante sera alors la nouvelle gamme obtenue à l'itération précédente qui sera retravaillée. En cas de nombreuses modifications et échecs successifs, il est possible de recommencer entièrement en changeant de stratégie de robotisation.

Par exemple, voici l'enchaînement des opérations dans le cas où la méthode est utilisée suivant une stratégie qui nécessite plusieurs itérations :

1. La robotisation est augmentée
2. La gamme obtenue est consolidée
3. *La nouvelle gamme obtenue est testée à l'aide du prototypage virtuel*
4. La gamme obtenue n'est pas validée
5. Une nouvelle augmentation plus étendue de la robotisation est effectuée sur la gamme
6. La gamme obtenue est consolidée
7. *La nouvelle gamme obtenue est testée à l'aide du prototypage virtuel*
8. La gamme n'est toujours pas validée
9. Le produit est légèrement modifié dans le respect du cahier des charges fonctionnel
10. La gamme est adaptée au nouveau produit
11. *La nouvelle gamme obtenue est testée à l'aide du prototypage virtuel*
12. La gamme obtenue est satisfaisante et sera la nouvelle gamme utilisée en production, elle peut aussi être à nouveau utilisée comme point de départ à une nouvelle augmentation de robotisation.

3 Outil d'aide à la décision pour la méthode

La validation des modifications effectuées sur la gamme est importante pour confirmer sa faisabilité. Une plateforme de simulation est développée comme outil pour supporter la méthode et permettre à l'utilisateur d'avoir des éléments de comparaison entre une gamme de référence et la nouvelle gamme de fabrication comprenant une robotisation plus importante.

3.1 Présentation de la plateforme de simulation

La construction d'une simulation complète de la gamme assurant une continuité machine, outillage, opérateurs, matières, permet de valider cette gamme et de garantir l'utilisation future d'une gamme opérationnelle. Ainsi, un prototype virtuel permet de vérifier par la simulation que la robotisation et la consolidation de la gamme sont compatibles avec le produit fabriqué. La simulation visuelle permet d'inspecter l'accessibilité de la géométrie pour le moyen de production robotisé, et donc d'anticiper rapidement des points bloquants au niveau de la géométrie. Le prototypage virtuel est un outil intéressant pour aider à la décision car il permet de visualiser les nouvelles contraintes de la gamme de fabrication et de vérifier la robustesse de cette dernière. Par exemple, on peut vérifier que les éléments de la gamme s'enchaînent sans problèmes, où qu'il n'y a pas d'étape bloquante dans la gamme.

La plate-forme expérimentale est composée d'un simulateur comportemental associé à un simulateur 3D, le premier étant utilisé pour modéliser la gamme de production et le second pour la représentation visuelle de la cellule de production. L'idée principale consiste à faire échanger des informations à propos de la simulation en cours avec ces deux simulateurs. Pour réaliser cela, nous utilisons une autre application dont le rôle est de gérer la simulation générale et qui transmet aux deux simulateurs les informations dont ils ont besoin pour leurs simulations respectives (figure 3). Cette application sert également d'interface générale.

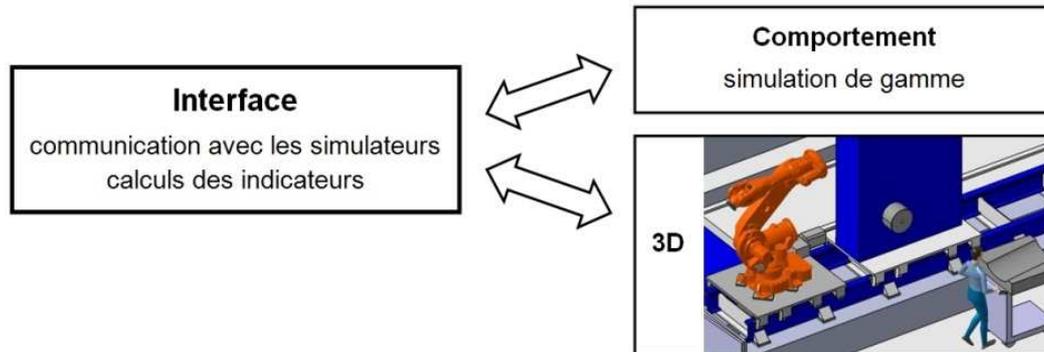


FIG. 3 – Architecture générale de la plateforme de simulation.

La plateforme pourra ainsi aider à gérer virtuellement l'installation et la disposition d'une nouvelle cellule de placement de fibres en amont de l'installation réelle.

3.2 Modélisation 3D, modélisation de gamme

La modélisation géométrique de la production par placement de fibres est intéressante car elle permet une vérification visuelle générale du procédé de fabrication pendant laquelle des points bloquants peuvent être décelés, comme des interactions entre le robot et son environnement. Une étude ergonomique de l'environnement de travail est une expertise importante à effectuer lorsque des tâches manuelles requérant l'intervention régulière d'opérateurs sont impliquées. Ces mêmes opérateurs peuvent également s'entraîner à leur tâche, ou se former à celle-ci grâce à une simulation visuelle.

La modélisation 3D dans un cadre industriel a requis un outil industriel, le produit DELMIA de Dassault Systèmes [8]. Il permet de simuler des process complexes en combinant la simulation d'humains par mannequins, la simulation de robots industriels, la simulation d'assemblage et d'autres. Son inconvénient majeur réside dans le caractère monolithique des simulations, qui sont très difficiles à modifier une fois créées. Ceci vient interférer avec notre intention d'utiliser plusieurs états de robotisation du procédé de fabrication. Comme il est impossible de prendre le temps de réécrire chaque simulation complète, nous utilisons une décomposition de celle-ci en opérations élémentaires, des micro-simulations qui correspondent chacune à une étape de la gamme et dont les simulations sont préconstruites. Une opération de mise en place d'un outillage est un exemple de micro-simulation.

Les différents aléas qui peuvent intervenir lors du procédé de fabrication sont également pris en compte. Dans le cas du placement de fibre, il peut s'agir d'un bourrage de fibres dans la tête de dépose, ou d'une rupture de fibre au cours de la dépose. La résolution de chacun de ces problèmes spécifiques est également un élément représenté par une micro-simulation.

Le simulateur comportemental permet de simuler la gamme sous forme d'un graphe d'état afin de vérifier l'enchaînement des étapes.

Des détails sur la plateforme de simulation et ses éléments se trouvent dans une précédente publication [9].

3.3 Utilisation

L'utilisation de la plateforme de simulation passe par l'emploi de scénarios qui comprennent une pièce représentée par sa gamme de fabrication plus des aléas éventuels. Une même pièce peut donc avoir plusieurs scénarios qui diffèrent par les aléas rencontrés lors de la fabrication. La présence ou non d'aléas et leur nature sont actuellement choisis par l'utilisateur, l'implémentation d'un outil stochastique de choix d'aléas pourra faire l'objet d'un développement futur de la plate-forme. Afin d'effectuer une comparaison avec le procédé d'origine, l'utilisateur va créer les deux scénarios correspondants aux états de robotisation de la gamme de fabrication de la pièce qui l'intéressent. La plate-forme utilise une paire de scénarios car en plus

de créer les simulations, elle est utilisée pour calculer et valider l'évolution et les gains obtenus par la robotisation effectuée par rapport à une gamme de référence.

Les scénarios se présentent sous la forme d'un fichier listant les étapes de gamme ainsi que d'autres valeurs telles que leur temps de fonctionnement, les masses de matériau utilisées et éventuellement d'autres informations telles que la localisation dans l'atelier. Le scénario est créé grâce à une base de données pouvant être enrichie et qui contient différentes étapes de gamme. Il est alors soumis à la plate-forme qui va effectuer les calculs des indicateurs PR et GD puis créer les simulations associées à chaque scénario afin de donner les résultats à l'utilisateur qui pourra alors les analyser.

Les calculs des indicateurs sont effectués en tout premier lieu afin d'avoir une première vision des apports de la robotisation choisie. Une fois le gain obtenu validé par l'utilisateur, la plate-forme va créer la simulation de gamme et la simulation 3D, après vérification de la présence de toutes les micro-simulations dans la base de données et s'il en manque, l'utilisateur devra alors les créer. Ces deux simulations résultats servent alors à montrer que le scénario représente bien une gamme réaliste et l'utilisateur va valider ou non cette nouvelle gamme à l'issue de leur visualisation et d'une analyse critique de tous ces résultats.

Dans le cas où la gamme obtenue n'est pas validée, l'utilisateur va alors reprendre la méthode afin de trouver un état de robotisation satisfaisant.

Exemple de calcul des indicateurs : Une pièce de grande taille en composite comportant un renfort est produite en petite série manuellement. Une robotisation de cette production est à l'étude, toujours pour une fabrication en petite série. Nous nous intéressons uniquement à la partie de la gamme de fabrication comprenant : une phase de préparation de poste (manuel 4h – robotisé 3,5h), une phase de dépose de matériau composite (manuel 21,5h – robotisé 14,5h), une phase d'insertion du renfort (manuel 1h – robotisé 1h) puis une nouvelle phase de dépose de composite (manuel 21,5h – robotisé 14,5h). Les temps sont indiqués par pièce produite, le total est de 48h pour la gamme manuelle et 33,5h pour la gamme robotisée.

Lors de la préparation des matériaux, les chutes représentent 10% du matériau entrant pour la gamme manuelle, alors qu'il n'y a que 2% de perte pour la gamme robotisée.

La plate-forme donne une Progression Robotisée de 0,3021 et un Gain de Dépose de 0,0888. En ne prenant que ces paramètres en compte, il est donc intéressant de favoriser une dépose robotisée.

4 Conclusion

La modification d'un procédé de fabrication, notamment lors du passage à un procédé robotisé, impose de nouvelles contraintes de fabrication et parfois une légère modification des caractéristiques du produit fabriqué. Dans l'optique d'une refonte d'un atelier de fabrication manuelle de pièce en matériaux composites, nous avons proposé une méthode permettant de tester les modifications entraînées et leurs impacts par l'intermédiaire d'une plateforme de simulation, ce qui facilite l'évolution de l'atelier en évitant les tâtonnements d'un changement mal préparé. Une pièce de taille significative est en cours d'expérimentation.

Références

- [1] <http://www.coriolis-composites.com/>
- [2] Skander A., Méthode et modèle DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit, Thèse de doctorat, Universités de technologie de Troyes et Compiègne, 2006.
- [3] Etienne A., Intégration Produit/Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés - Application à l'optimisation de l'allocation des tolérances géométriques, Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine, Metz, 2007.
- [4] Yan P., Zhou M., Sebastian D., An integrated product and process development methodology, Concept formulation, Robotics and Computer Integrated Manufacturing vol. 15, pp. 201-210, 1999.
- [5] Chen L., Li S., A computerized team approach for concurrent product and process design optimization, Computer-Aided Design vol. 34, pp. 57-69, 2002.
- [6] Singh N., Integrated product and process design: a multi-objective modeling framework, Robotics and Computer Integrated Manufacturing vol. 18, pp. 157-168, 2002.
- [7] Norme AFNOR NF E 60-182, mai 2002, application par le Journal officiel du 2 juin 2002.
- [8] <http://www.3ds.com/fr/>
- [9] Arnault B., Soriano T., Zerelli M., An experimental platform for the production simulation of a robotic fiber placement cell, IEEE Mechatronics 2010, Keio University Yokohama, Japan, November 22-24, 2010.