

# Démarche de conception d'une cellule de parachèvement

Vincent Robin, Laurent Sabourin, Grigore Gogu, Jean-Michel Fauconnier\*

Laboratoire de Mécanique et Ingénieries, Campus de Clermont-Ferrand,  
les Cèzeaux BP 265 63175 Aubière cedex

\* Société des Fonderies d'Ussel, Z.I. la petite borde, B.P. 48, 19202 Ussel cedex

## Résumé :

*La fonderie d'aluminium de précision par moules en sable permet de réaliser des pièces complexes de grandes dimensions et de haute technicité. Cependant les exigences industrielles en terme de sécurité et de rentabilité remettent fortement en cause la réalisation manuelle des opérations de parachèvement. Cet article décrit tout d'abord la formalisation des différentes contraintes du process de parachèvement. Nous présentons ensuite différents aspects de la démarche de conception, analyse géométrique, étude d'accessibilité, précision, rigidité, qui a abouti à la définition d'une cellule robotisée 8 axes. Les travaux actuels portent sur la gestion optimisée de la redondance cinématique afin d'améliorer le comportement global de la cellule. Celle-ci est aujourd'hui opérationnelle et l'optimisation est en cours de validation sur des pièces industrielles. Ces travaux sont réalisés en partenariat avec la Société des Fonderies d'Ussel du groupe Alcan, spécialisée dans la réalisation de pièces de haute technicité pour les secteurs aéronautiques, transport et énergie.*

## Abstract :

*Aluminum precision foundry with sand moulds allows to produce complex and large sized parts including high technicality. However industrial needs in security and profit make incompatible to achieve manually completion operations. First, this article describes the constraints formalisation in finition process. Then, we present some aspects of the design method, geometrical analyis, accessibility study, precision, stiffness, that allow to define a 8axis robotized cell. Current works deal with optimal use of kinematic redundancy with aim to improve global cell behaviour. This cell is operational now and the optimisation is being validated with industrial parts. This work is completed in collaboration with the Société des Fonderies d'Ussel (SFU) of the Alcan group, specialized in the high technology aluminium moulding parts. The applications relate to mainly parts of the aeronautical, energie and transports activities.*

**Mots clefs : parachèvement, redondance cinématique**

## 1 Définition d'une cellule de parachèvement en fonderie

### 1.1 Intérêts et contraintes du procédé de fonderie

Le procédé de fonderie sable permet de réaliser des pièces de grandes dimensions et de formes complexes intégrant un grand nombre de fonctions : structure générale, reprises d'effort, canaux de passages de fluides, surfaces d'assemblage, surfaces d'échange, cosmétique, ... (Fig. 1)

En raison de la complexité des pièces et des contraintes de poids (pièces aéronautiques en particulier), les pièces présentent de faibles épaisseurs et sont fortement nervurées. Les contraintes métallurgiques de coulée imposent une alimentation multiple en alliage qui se traduit par la présence de très nombreuses « attaques de coulées ». Leur suppression est un des problèmes majeurs du parachèvement.

Le moulage sable induit une variabilité dimensionnelle élevée et les pièces structurales de faibles épaisseurs présentent des déformations difficilement prévisibles : ouverture, torsion, ... Ceci est corrigé par une opération de redressage mais qui n'intervient que plus tard dans le processus.



Figure 1 : Pièces complexes de fonderie sable

## 1.2 Automatisation du parachèvement

Les opérations de parachèvement sont donc réalisées sur une pièce déformée et ont pour objectif d'approcher la surface (même déformée) de la pièce.

Cette étape est suivie d'un ponçage global imposé pour des raisons métallurgiques et mécaniques voire cosmétiques. En raison de la variabilité dimensionnelle et de l'accessibilité difficile aux zones de travail l'ensemble de ces opérations : sciage, burinage et ponçage, est encore réalisé manuellement. Cependant les exigences industrielles actuelles en terme de sécurité et de rentabilité, notamment dans la concurrence avec les autres procédés de fabrication, remettent fortement en cause la réalisation manuelle de ces opérations. Dans le domaine de la cosmétique (aspect extérieur des pièces visibles) la qualité obtenue manuellement reste également limitée et soumise à une forte variabilité. Ces contraintes orientent vers une démarche d'automatisation des étapes de démasselottage et de ponçage avec une intégration de fonctions cosmétiques. Une étude de faisabilité a permis dans un premier temps de valider un processus robotisé de parachèvement constitué d'une phase d'usinage et d'une phase de ponçage.

## 2 Caractérisation du problème

### 2.1 Contraintes liées à la tâche et choix de solutions

La première étape est de caractériser les exigences fonctionnelles vis-à-vis de la pièce et les contraintes associées aux opérations de parachèvement. Les principales exigences fonctionnelles concernent :

- La tolérance du parachèvement vis-à-vis de la pièce finie (au dixième de millimètre)
- L'état de surface final désiré
- Les contraintes morphologiques des pièces : volume maximum (inclus dans un cylindre de dimensions  $D=1.5m$ ,  $L=3m$ ), accessibilité, variabilité dimensionnelle, ...

Pour répondre à la contrainte d'automatisation du procédé, l'outil utilisé est une cellule robotisée. Les outils d'enlèvement de matière associés doivent être compatibles au support robotisé : portables et sans contrainte mécanique forte (chocs, ...). Les solutions choisies sont :

- l'usinage pour affleurer la forme
- le ponçage par disque pour réaliser l'état de surface.

Pour ces dimensions de pièce et la complexité d'accessibilité, une solution avec une machine de type 5 axes conventionnelle ne se justifie pas notamment en termes de coût (trop élevée), de précision attendue (sur-qualité) et d'accessibilité aux zones de travail. De plus l'intégration d'outils complémentaires (compliance, vision) n'est pas adaptée à ce type de machine.

### 2.2 Contraintes liées au process

Les contraintes de process sont liées à la stratégie choisie. Dans le cadre de l'usinage et le ponçage, la stratégie caractérise de façon complète [1] :

- un outil
- un mode de balayage
- une direction d'avance en chaque point
- un pas transversal et un pas longitudinal
- des paramètres de coupe dont la vitesse d'avance

Dans les deux phases qui nous concernent (usinage et ponçage), le mode de balayage est de type Zig ou Zig-zag en 5 axes. La trajectoire est une courbe discrétisée par un ensemble de poses auxquelles on affecte une direction d'avance (Fig 2.) . Les poses sont définies par la position d'un point caractéristique de l'outil et par la direction de l'axe de l'outil. La direction d'avance appartient au plan tangent à la surface. L'angle entre la normale à la surface et l'axe de l'outil est appelé angle de dépinçage. Cet angle influe sur le profil et le taux d'enlèvement de matière. Le choix des paramètres de la stratégie est en lui-même un problème contraint par le respect des spécifications géométriques de la surface.

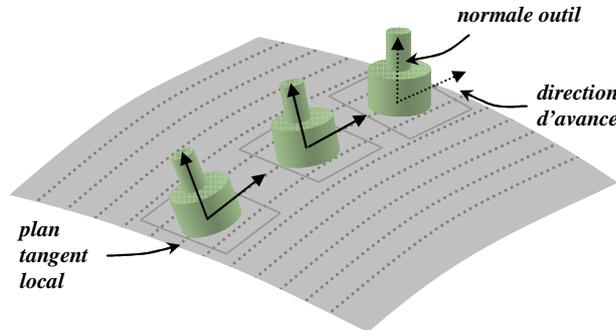


Figure 2 : Trajectoires d'outil en balayage 5 axes

## 2.2.1 Caractéristiques de l'usinage

En usinage, dans le cadre de la stratégie de balayage cinq axes, avec une fraise deux tailles, le taux d'engagement à la dent (épaisseur copeaux) doit être constant. Il dépend directement de l'avance à la dent  $a_d$  définie par :

$$a_d = \frac{v_a}{n_d N} \quad (1)$$

avec  $v_a$  la vitesse d'avance en m/mn,  $N$  la vitesse de rotation en trs/mn et  $n_d$  le nombre de dents

L'enlèvement de matière est matérialisé par l'enveloppe du trajet des arêtes de coupe. La diminution de la vitesse d'avance  $v_a$  entraîne une diminution de l'avance à la dent  $a_d$ . Ceci ne modifie pas l'enveloppe d'enlèvement de matière mais peut provoquer une détérioration de la qualité de coupe. Cela se traduit par une usure prématurée, un mode vibratoire ou encore une dégradation de l'état de surface.

## 2.2.2 Caractéristiques du ponçage

En ponçage, dans le cadre de la stratégie de balayage cinq axes avec un disque abrasif, le taux d'enlèvement de matière est approximé par la relation de Preston avec :

$$\frac{dh}{dt} = k_p \cdot P_c \cdot v_r \quad (2)$$

où  $h$  représente la hauteur de matière enlevée,  $P_c$  représente la pression de contact locale,  $v_r$  représente la vitesse relative entre la pièce et l'abrasif et  $k_p$  est le coefficient dit de Preston.

La taille du grain, le taux d'abrasif, le couple des matériaux ainsi que les différents phénomènes liés à l'enlèvement de matière ne sont pas pris en compte séparément mais regroupés dans le coefficient de Preston. Il est donc nécessaire de déterminer expérimentalement pour chaque condition d'utilisation le coefficient de Preston correspondant [2].

On doit garantir un taux d'enlèvement de matière constant au cours du temps. Une première approximation de l'épaisseur enlevée sur une zone est donnée par l'intégrale sur le temps passé sur la zone :

$$e = \int_{\text{temps d'appui}} k_p \cdot P_c \cdot v_r \cdot dt \quad (3)$$

A conditions de travail constantes (effort d'appui, vitesse de rotation, ..), l'enlèvement de matière est donc directement proportionnel au temps passé donc à l'inverse de la vitesse d'avance. La diminution de la vitesse d'avance entraîne alors une augmentation de l'enlèvement de matière qui se traduit par un creusement de la surface.

### 2.2.3 Contraintes

Dans les deux cas (usinage et ponçage), une première contrainte est de garantir à l'effecteur une vitesse de déplacement constante égale à la vitesse d'avance imposée par la stratégie.

Les phases d'usinage et de ponçage imposent des contraintes supplémentaires à l'effecteur :

- Trajectoires continues
- Charge embarquée et efforts de coupe

La contrainte de trajectoire continue signifie que l'effecteur doit suivre la trajectoire imposée sans se reconfigurer entre deux poses successives.

## 3 Répercussion des contraintes sur la cellule robotisée

L'ensemble des contraintes exprimées précédemment se répercutent sur la cellule robotisée en terme de :

- Précision de la tâche → précision du porteur
- Précision de la tâche + Charge et efforts de coupe → rigidité du porteur
- Enveloppe de travail et accessibilité → grand espace de travail
- Trajectoires 5 axes et continues → génération de trajectoires parcourables
- Vitesses d'avance élevées et constantes → admissibilité cinématique

Etant données la précision et la rigidité attendues pour le porteur, le robot choisi est un robot tripode de type Tricept 6 axes. Sa structure parallèle garantit une précision finale environ 5 fois supérieure aux architectures de robots sériels. Les données du constructeur annoncent une répétabilité à 2 centièmes de millimètre [3] contre 1 dixième pour les architectures anthropomorphes.

### 3.1 Espace de travail accessible du robot

La notion d'espace de travail d'un robot est une notion complexe car impossible à représenter de manière complète (dimension 6). On représente généralement des sous espaces ou sections. Parmi les méthodes possibles, nous avons choisi de représenter l'espace de travail à plage d'orientation [4]. Cet espace est défini comme l'ensemble des positions accessibles par au moins une orientations dans une plage fixée. En effet, pour notre application, les opérations d'usinage et de ponçage sont des tâches où l'orientation autour de l'axe outil n'a pas d'importance. La plage pour cette orientation est donc  $[0, 2\pi]$ . En revanche, pour les deux autres orientations la plage est réduite à une seule valeur.

La construction de l'espace de travail accessible est réalisée par discrétisation de l'espace opérationnel. Nous avons utilisé une méthode dérivée de la méthode utilisant les octree [5] permettant de déterminer le volume accessible. Etant donné que l'orientation de l'outil varie au cours des phases, il serait nécessaire de calculer cet espace pour toutes les orientations possibles. Pour donner un bon aperçu, nous l'avons calculé pour plusieurs orientations caractéristiques.

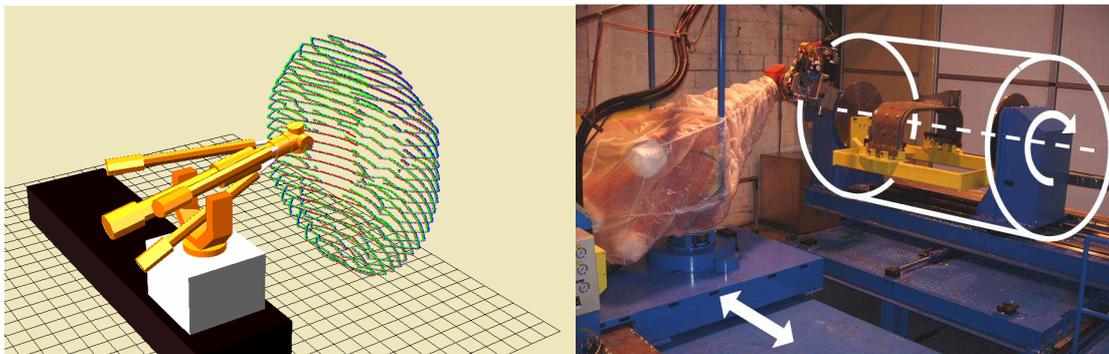


Figure 3 : Espace accessible du robot seul (gauche) et Espace accessible attendu et mobilités ajoutées (droite)

On constate (Fig. 3 à gauche) que ce volume est largement inférieur au volume des pièces à traiter. Etant donnée la forme cylindrique de l'espace de travail, la compacité de la cellule et l'alimentation des pièces attendues, la solution retenue consiste à ajouter un track linéaire portant le robot et un axe rotatif, parallèle au track, associé la pièce. Cela constitue une cellule à 8 axes asservis (Fig. 3 à droite).

La cellule ainsi définie permet de répondre aux contraintes d'accessibilité mais pour garantir le suivi des trajectoires imposées par la stratégie (contraintes de vitesse, de précision et de parcourabilité), il est nécessaire de réaliser une optimisation du comportement statique et cinématique de la cellule.

### 3.2 Précision de la cellule

La précision de la cellule dépend de nombreux facteurs dont la rigidité du porteur. Au cours des phases d'usinage et de ponçage, la structure est soumise à des efforts dus aux masses embarquées et aux efforts de coupe. La rigidité de la structure varie en fonction de sa configuration. Une étude s'appuyant sur [7] et [8] et complétée par une étude expérimentale permet de conclure que la variation de la rigidité de la structure dépend principalement de la configuration des jambes de la structure parallèle et du dernier axe du poignet qui est mécaniquement le plus faible.

On cherchera alors à se placer dans la configuration qui minimise la sortie des jambes et le couple induit par l'effort de coupe sur le dernier axe du poignet. Nous définissons un critère de sortie des jambes comme la valeur moyenne des trois articulations ou de manière assez équivalente par la valeur de la liaison passive centrale. De même, nous définissons un critère caractérisant le couple induit sur l'axe du poignet par la norme du produit vectoriel des vecteurs directeurs de l'axe de la sixième articulation et de l'effort de coupe.

### 3.3 Admissibilité cinématique

La configuration sera dite cinématiquement admissible si elle permet de satisfaire la contrainte de vitesse d'avance imposée par la stratégie. Nous utiliserons ici la notion de dextérité pour décrire la capacité du robot à se déplacer autour d'un point. Dans notre cas, seule la dextérité dans la direction d'avance est nécessaire. Nous définissons un critère de performance  $d_a$ , proche de la notion de dextérité et associé à la direction d'avance par :

$$d_a = \min \left( \left| \frac{\dot{q}_i - \dot{q}_{i_{\max}}}{\dot{q}_{i_{\max}}} \right| \right) \text{ où les } \dot{q}_i \text{ sont calculés par la relation : } \dot{q} = J^{-1} v_a \quad (4)$$

avec  $J$  la matrice jacobienne du robot et  $v_a$  un vecteur unitaire dans la direction de la vitesse d'avance.

Ce critère représente alors pour l'articulation la plus critique, sa marge en vitesse articulaire. Plus elle est élevée, plus la capacité du robot à se déplacer suivant cette direction est importante. Si ce critère de dextérité est respecté, la configuration correspondant sera alors dite cinématiquement admissible.

## 4 Démarche d'optimisation du comportement de la cellule

Le respect de l'ensemble des contraintes du process et l'objectif de maximiser la rigidité et le comportement cinématique de la structure forment un problème d'optimisation multicritère sous contraintes formalisé par :

$$\text{Soit } f : x \in \mathbb{R}^n \rightarrow f(x) \in \mathbb{R}^k \text{ trouver } \{x^*\} \text{ qui minimise } f^i(x), i = 1..k \quad (5)$$

$$\text{sous } g : x \mapsto g(x) = 0 \text{ et sous } h : x \mapsto h(x) \leq 0$$

**Variables d'état :** Les principales variables d'état concernent la configuration physique de la cellule et sont l'implantation du robot sur le track et l'implantation du retourneur par rapport au robot.

**Paramètres :** Les paramètres sont ici liés à l'architecture de la cellule. Le degré de redondance, somme de la redondance fonctionnelle (degré 1) et cinématique (2 axes supplémentaires) [9] est donc ici égal à trois. Il est donc nécessaire de choisir trois paramètres indépendants parmi les variables du système pour contraindre le placement de la tâche. Les paramètres choisis sont : la valeur articulaire du track, la valeur articulaire du retourneur, l'angle autour de l'axe outil.

**Les critères d'optimisation :** Nous cherchons à améliorer le comportement cinématique et la rigidité de la structure et à diminuer l'influence du dernier axe du poignet. Les critères d'optimisation choisis sont la dextérité associée à la direction d'avance  $d_a$  (4), la sortie des jambes de la structure parallèle et le moment induit par l'effort de coupe sur le dernier axe du poignet. Les trois fonctions objectif sont alors définies par :

$$f^1 = \min \left( \left( \frac{\left\{ J^{-1}(q)v_a \right\}_i - \dot{q}_{i_{\max}}}{\dot{q}_{i_{\max}}} \right)_{i=1..n} \right), \quad f^2 = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{3}, \quad f^3 = \left| \vec{F}_c \wedge \vec{u}_6 \right| \quad (6)$$

avec  $q_1, q_2, q_3$  les variables articulaires des jambes,  $\vec{F}_c$  la direction de l'effort de coupe et  $\vec{u}_6$  celle du 6<sup>ème</sup> axe

**Les contraintes :** Elles sont induites par les capacités du robot : limites articulaires et limites des vitesses et accélérations articulaires (contraintes d'inégalité  $h$ ) et par la stratégie process (contraintes d'égalité  $g$ ) (5) : points de passages, paramètres de la stratégie, direction de déplacement, vitesse d'avance, parcourabilité, ...

L'objet de la démarche est de réaliser la gestion des redondances cinématiques. La méthode envisagée est une méthode mixte entre une méthode des compromis et une méthode d'agrégation à poids variables [10] permettant de se ramener à un problème mono critère. On évite ainsi la construction d'un front de Pareto qui nécessite un choix parmi les solutions non dominées. Ceci fait l'objet de nos travaux actuels et les premiers résultats ont été appliqués pour le parachèvement de pièces industrielles.

## 5 Conclusion

Cet article présente l'ensemble des contraintes du process de parachèvement de pièces de fonderie qui ont abouti à la définition d'une cellule robotisée 8 axes. Les contraintes prépondérantes sont l'accessibilité, la vitesse d'avance de l'effecteur et la précision. L'ajout d'axes supplémentaires permet de répondre à la contrainte d'accessibilité. La redondance cinématique induite garantit le respect des paramètres du process et permet d'améliorer le comportement en précision. La recherche de solution s'apparente à un problème d'optimisation multi-objectif sous contraintes. La cellule développée est aujourd'hui opérationnelle et les premiers résultats d'optimisation sont en cours de validation sur des pièces industrielles.

## 6 References

- [1] Quinsat Y., Sabourin L., Gogu G., 2004, *Help for sculptured surface machining strategy choice : application to finishing process*, Current Advances in Mechanical design and production, Vol 8, p. 1023-1032
- [2] Brinksmeier E., Riemer O., Gessenharter A., 2006, *Finishing of structured surfaces by abrasive polishing*, Precision Engineering, Vol. 30, p 325-336
- [3] <http://www.robot-automation.com/abb-irb-940.htm>
- [4] Merlet J., 2006, *Parallel robots*, p 213-257, Springer, Dordrecht
- [5] Chablat D., 1998, *Domaines d'unicité et parcourabilité pour les manipulateurs pleinement parallèles*, Thèse de Doctorat
- [6] Merlet J., 1993, *Manipulateurs parallèles, 6ème partie : détermination des espaces de travail en orientation*, Rapports de Recherche INRIA, N° 1921
- [7] Chanal H., Duc E., Ray P., 2006, *A study of the impact of machine tool structure on a machining process*, Machine tools and Manufacture, Vol 46 98-106
- [8] Wang Y, Huang T., Zhao X. M., Mei J. P. & al., 2006, *Finite element analysis and comparison of two hybrid robots the Tricept and the TriVariant*, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China
- [9] Khalil W., 1999, *Modélisation, identification et commande des robots*, Hermes, Paris
- [10] Lee K., Buss M., 2006, *Redundancy resolution with multiple criteria*, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China