



**HAL**  
open science

## Mise en oeuvre d'une cellule robotisée redondante, application au désossage de jambon.

Kévin Subrin, Laurent Sabourin, Matthieu Alric, Grigore Gogu

► **To cite this version:**

Kévin Subrin, Laurent Sabourin, Matthieu Alric, Grigore Gogu. Mise en oeuvre d'une cellule robotisée redondante, application au désossage de jambon.. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422889

**HAL Id: hal-03422889**

**<https://hal.science/hal-03422889>**

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.

# MISE EN ŒUVRE D'UNE CELLULE ROBOTISÉE POUR LE DESOSSAGE DE JAMBON

K. Subrin<sup>a</sup>, L. Sabourin<sup>a</sup>, Matthieu Alric<sup>b</sup>, Grigore Gogu<sup>a</sup>

a. Clermont Université, IFMA, EA 3867, Laboratoire de Mécanique et Ingénieries, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, +33473288000, +33473288027, prénom.nom@ifma.fr

b. Association pour le Développement de l'Institut de la Viande, 10 rue Jacqueline Auriol, ZAC des Gravanches, 63039 Clermont-Ferrand Cedex 2, +33473985380, +33473985385, matthieu.alric@adiv.fr

## Résumé:

Aujourd'hui, la filière viande connaît des difficultés à recruter des opérateurs qualifiés. Aussi, la robotisation d'opérations est devenue un impératif. La première partie présente l'expertise réalisée sur le désossage, de manière à traduire les gestes manuels en tâches automatisables. Nous détaillons la stratégie de découpe qui illustre la complexité du processus. Nous présentons la modélisation de la cellule redondante développée, les expérimentations réalisées et les critères associés à la gestion de la redondance. Cette étude est réalisée dans le cadre du projet SRDViand (FUI).

## Abstract:

Nowadays, companies in meat-cutting sector are encountering increasing difficulties in meeting their labor requirements. Therefore, the mechanization of these professions has become essential. The first part of this article involves an in-depth study of operators' expertise, so as to translate their actions into automatable operative tasks. We detail more particularly a cutting strategy which shows the complexity of the process. We present a kinematically redundant robotized cell, the experiments and the constraints associated to the redundancy resolution. This study was carried out within the framework of the SRDViand project (FUI).

**Mots clés:** Robotisation, découpe de viande, contraintes processus, redondance cinématique

## 1 Introduction

Aujourd'hui, la filière viande, et plus particulièrement le secteur de la découpe, connaît des difficultés croissantes à recruter du personnel qualifié. Ces difficultés s'expliquent principalement par les conditions de travail (froid, horaires décalés, dangerosité et pénibilité) causant un taux élevé de troubles musculo-squelettiques et d'accidents [1]. La mécanisation ou la robotisation de ces métiers devient un objectif important pour améliorer la productivité, la sécurité et la santé des opérateurs et garantir le mode de production. D'autre part, les entreprises doivent faire face à la forte concurrence des produits issus du MERCOSUR (Argentine, Brésil, Paraguay, Uruguay) pays à faible coût de main d'œuvre, ou de pays ayant déjà commencé à robotiser une partie des opérations comme le Danemark (DMRI), le Japon (MAYEKAWA) ou la Nouvelle-Zélande (MIRINZ) [2]. Purnell rappelle les enjeux d'intégrer la robotique dans l'industrie agroalimentaire, ainsi que les verrous scientifiques pour y parvenir [3].

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du projet SRDViand (FUI). Il est porté par l'ADIV (Association pour le Développement de l'Institut de la Viande), et associe deux laboratoires de l'Université Blaise Pascal, le LaMI et le LASMEA, ainsi qu'un ensemble de partenaires industriels, réalisateur de biens d'équipement pour les activités d'abattage, de découpe et de transformation de la filière viande. Les premières opérations visées concernent la séparation en quartier du bœuf [4] et le désossage du jambon de porc, qui ont été jugées comme prioritaires par les industriels du secteur et limitantes dans le processus de transformation. Nous ne détaillerons ici que le processus de désossage du jambon de porc.

## 2 Contexte et application

Nous présentons tout d'abord le processus réalisé manuellement et les opérations envisagées visant à obtenir une découpe robotisée. Nous détaillons les objectifs, les contraintes et les stratégies associées à des typologies de tâche plus ou moins complexes. L'étape préliminaire consiste à extraire l'araignée et l'os du quasi (Fig. 2a) du jambon préalablement découenné.

### 2.1 Coupe anatomique et désossage du jambon

Cette opération consiste à ouvrir les noix (muscles) jusqu'à l'os suivant l'aponévrose (tissu séparant les muscles entre eux). L'opérateur repère visuellement la 2<sup>nd</sup>e veine de gras (Fig. 1a) (séparation entre les noix constituées de tissus gras et d'aponévrose). Il suit l'aponévrose et se guide sur l'os. Les coupes le long du jarret sont analogues (Fig. 1b).

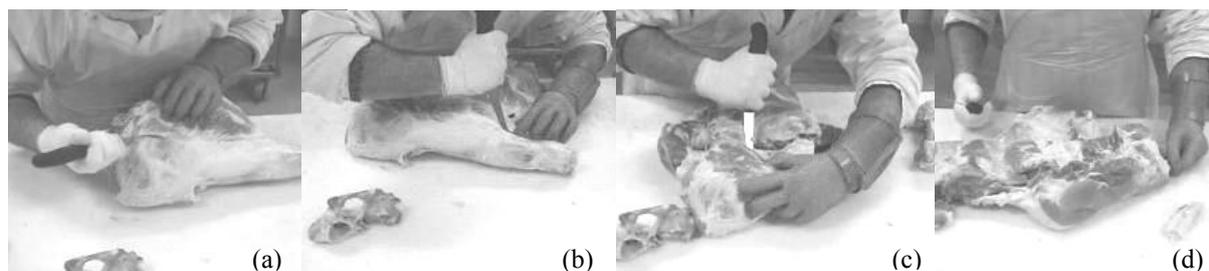


FIG. 1 - Déroulé des opérations : ouverture suivant la 2<sup>nd</sup>e veine de gras (a), découpe le long du jarret (b), extraction du fémur (c), extraction de la rotule (d).

L'opération suivante consiste à extraire les os (tibia, péroné et fémur) des noix (Fig. 1c). L'opérateur procède à des incisions successives le long de chaque os qui permet ensuite d'extraire ceux-ci. La dernière opération consiste à couper les tendons et les tissus qui relient la rotule aux noix (Fig. 1d). L'opération suivante de *parage*, qui ne fait pas partie de notre étude, consiste à séparer le jambon désossé en 5 noix : noix, sous-noix, noix pâtissière, jarret nerveux et fessier (Fig. 2b).

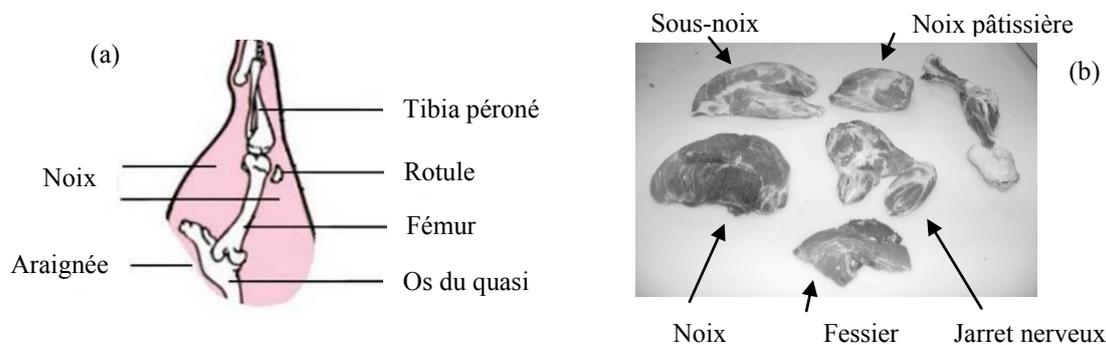


FIG. 2 - Composition du jambon (a), détail des noix après parage (b).

### 2.2 Contraintes sur le processus

Un ensemble de contraintes est associé à la succession d'opérations du processus :

- Variabilité texturale : même si les jambons sont calibrés, le pourcentage de gras et la consistance évoluent en fonction de l'animal et de la maturation de la viande.
- Déformation lors de la coupe : les efforts appliqués et la séparation des liaisons entre les noix et les os, impliquent une déformation du jambon. Ceci nécessite une auto-adaptation des trajectoires.
- Repérage des os : le repérage des os est fortement perturbé par la flexibilité de la liaison entre le fémur et le tibia/péroné.
- Coupe discontinue : l'opérateur utilise des petits gestes d'incision.

- Référentiel : le jambon est une superposition hétérogène de viande, d'os, de tissus gras, de traces de sang, etc. Ceci perturbe fortement le repérage des points caractéristiques ou des zones de découpe pour les trajectoires.
- Couplage sensoriel : L'opérateur fait appel à un couplage permanent entre la vision et l'effort ressenti.

Les opérations décrites sont des tâches complexes, sur corps déformable, comportant une variabilité dimensionnelle. L'opérateur doit utiliser différents signaux, principalement la vision, le repérage tactile et le contrôle d'effort.

## 2.3 Bilan des opérations

La robotisation d'une tâche peut être vue sous deux approches : la première est pensée en termes de copie de mouvement humain, la seconde est pensée en termes de fonctionnalité robot appliquée à une tâche particulière (coupe, préhension, traction, etc.). Cette deuxième approche nécessite généralement une redéfinition des opérations, mais est généralement garante d'une meilleure réussite. De part la complexité des opérations manuelles présentées, nous nous sommes donc attachés à redéfinir, avec les spécialistes de l'ADIV, l'ensemble du processus de désossage. De part la difficulté de repérage des différents constituants (os, veine de gras) difficilement réalisable par vision, nous avons basé la stratégie de coupe sur l'utilisation de la commande en effort permettant d'adapter la trajectoire théorique par rapport au référentiel réel [5]. L'expertise réalisée sur le jambon a permis de définir des opérations élémentaires, nous développerons la plus contraignante : la coupe en appui sur un os.

## 2.4 Coupe en appui sur un os

La coupe est contrainte par un ensemble de paramètres liés à la lame, son mouvement, son positionnement dans l'espace par rapport à l'os et le maintien d'un effort de contact. Le nombre de caractéristiques est important et nous avons utilisé une méthode de classification [6] permettant d'identifier les paramètres clés : l'angle de coupe  $\alpha$ , la vitesse d'avance  $V_f$ , la vitesse  $V_n$  normale à la vitesse d'avance. Le réglage de ces paramètres est dicté par le respect de la qualité de coupe (coupe franche, pas d'éclats d'os ou de cartilage). Un certain nombre de modélisation du principe de coupe de viande existe. Les travaux réalisés s'intéressent principalement à la réduction des efforts de coupe. Ils portent sur l'angle de coupe  $\alpha$  [7] [8] ou sur la forme de la lame [9]. Ils montrent par exemple que lorsque l'angle de coupe  $\alpha$  est inférieur à  $30^\circ$ , les efforts sont réduits de 30%. L'objectif est de garantir la qualité de coupe et de minimiser les efforts pour limiter au maximum les mouvements du jambon lors des différentes coupes. L'ensemble des paramètres  $\alpha$ ,  $V_f$ ,  $V_n$  et  $F_c$  (Fig. 3) ont fait l'étude d'une caractérisation afin de définir leur domaine de variabilité et leur importance relative sur la qualité de la coupe.

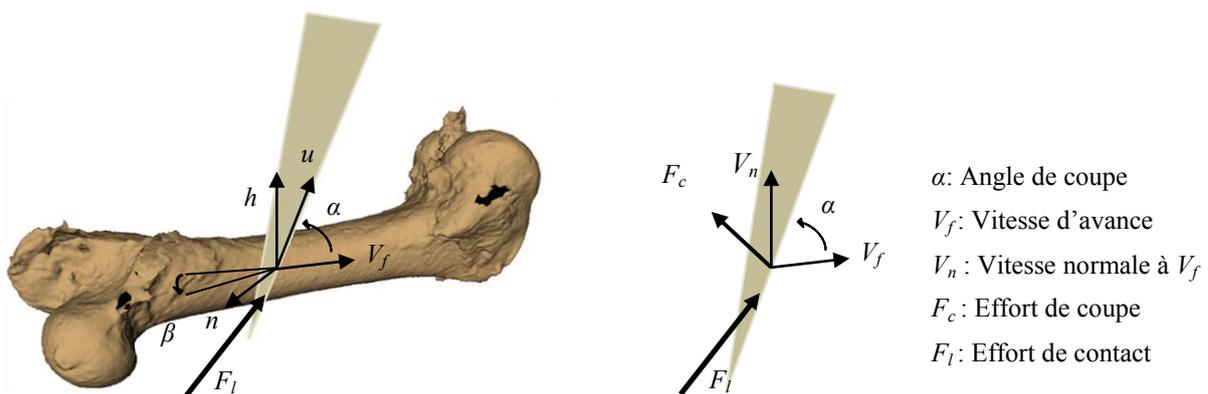


FIG. 3 - Paramètres de coupe pour le suivi de l'os.

## 2.5 Etude des paramètres clés de la coupe

Les premiers essais concernent l'influence de  $\alpha$  et  $V_n$  sur l'effort de coupe  $F_c$  afin de corroborer les résultats de la coupe manuelle. Ils sont réalisés sur une mousse calibrée (PTZ29 polyéthylène réticulé polyoléfine) ayant des caractéristiques mécaniques proche de celle de la viande [7]. Cette étude est facilitée par l'acquisition du signal des différentes composantes du capteur d'effort monté en bout du poignet du

robot. Les résultats obtenus montrent une diminution importante de l'effort  $F_c$  et une très bonne qualité de coupe si l'angle  $\alpha$  est proche de  $30^\circ$  ou si  $V_n$  est non nulle (Fig. 4).

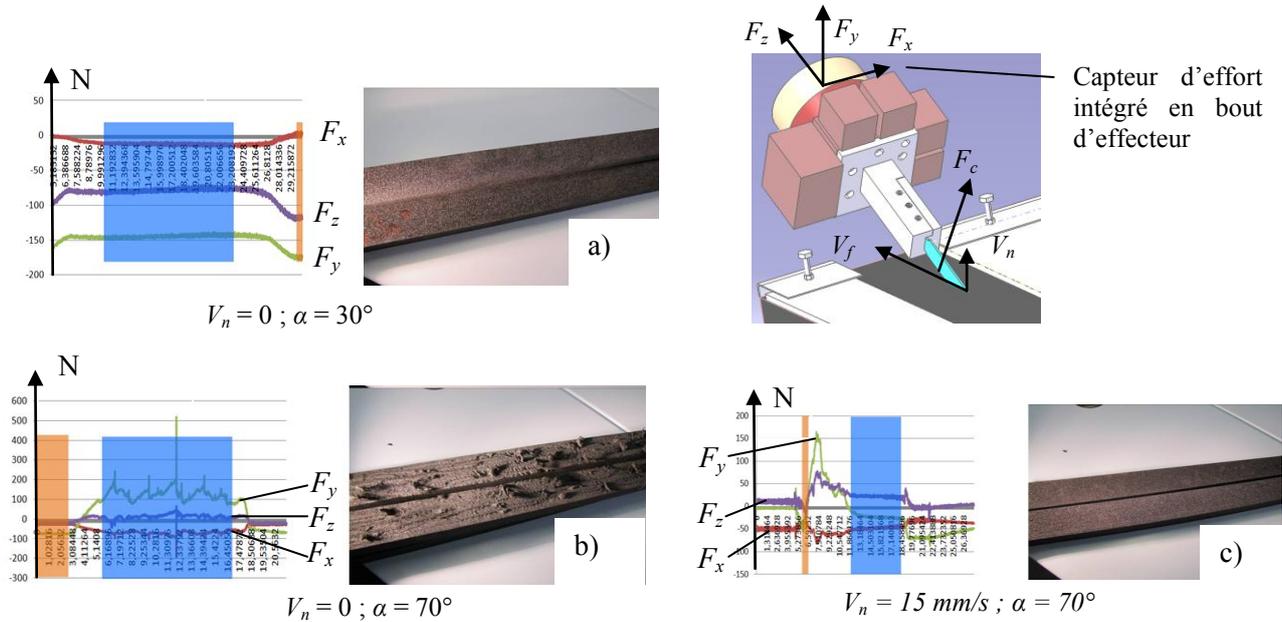


FIG. 4 - Acquisition des efforts de coupe et étude qualitative de la coupe en fonction des paramètres  $\alpha$ ,  $V_n$ .

Cette étude est complétée par un plan d'expérience de Taguchi avec pour facteurs  $\alpha$ ,  $V_f$  et  $V_n$  et pour réponses  $F_c$  et la qualité de coupe. Les résultats obtenus confirment l'influence du couple  $\alpha/V_n$  sur  $F_c$  et la qualité de coupe, mais l'analyse de la table des effets ne permet pas de mettre en évidence un paramètre prépondérant (Figure 4c). En conclusion, pour garantir la qualité de coupe et diminuer les efforts de coupe, il est important d'avoir un angle de coupe  $\alpha$  proche de  $30^\circ$  ou une valeur non nulle de composante  $V_n$  combinée à  $V_f$ .

### 3 Structure de la cellule

Le choix de l'architecture de la cellule découle de l'étude des différents processus et nécessite de déterminer : les caractéristiques et les frontières de la tâche (volume, accessibilité, etc.), le placement le mieux adapté du robot par rapport à la tâche (ou inversement), les trajectoires réalisables et optimisées par rapport à un ensemble de critères. Un ensemble de trajectoires a été défini en tenant compte de la variabilité potentielle maximale des jambons et créé initialement par apprentissage sur des pièces de viande. La plupart des opérations d'incision nécessite une accessibilité autour des os ce qui impose l'intégration d'un axe externe piloté. L'étude a permis, au travers d'un processus itératif, de positionner au mieux les différents constituants de la cellule : robot, axe externe, système de contention, etc. (Fig. 5).

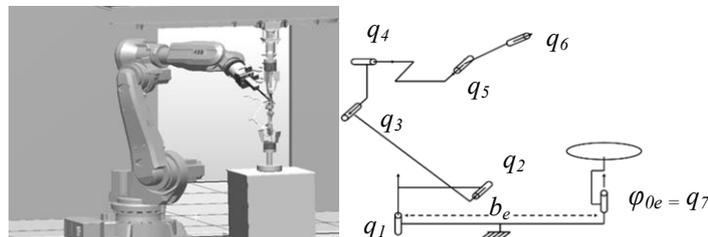


FIG. 5 - Cellule robotisée et schéma cinématique du robot avec axe externe.

#### 3.1 Modélisation du robot et prise en compte de l'axe externe

La modélisation géométrique est nécessaire à la simulation et à l'optimisation. Nous avons réalisé une modélisation du type TCS (Travelling Coordinate System) [4] [10] (Fig. 5). L'axe externe ajoute une variable articulaire  $\varphi_{0e}$ . La résolution du nouveau MGD est directe par l'ajout en série de cet axe. Afin de ne pas décaler les notations des autres articulations, la valeur articulaire est notée  $q_7$  bien qu'elle soit placée au

début de la chaîne cinématique. La position relative de cet axe supplémentaire est décrite par un paramètre architectural  $b_e$  qui doit également être intégré au modèle. Le MGD de la cellule complète s'obtient en multipliant entre eux les différents opérateurs homogènes. Cette modélisation permet d'écrire les opérateurs homogènes utilisés dans le calcul des coordonnées de l'effecteur en fonction des variables articulaires.

### 3.2 Contraintes du processus

Un des objectifs de nos travaux est de garantir la réalisation des différentes opérations sur des trajectoires partiellement connues, liées à la variabilité des jambons de porc [11] et d'améliorer le comportement cinématique global de la cellule afin de garantir la qualité de coupe. Les trajectoires théoriques sont tout d'abord programmées puis recalées au travers de la commande en effort [12] permettant au robot de s'affranchir de sa position et de réagir spontanément aux efforts qu'il perçoit. La gestion de la redondance cinématique nécessite d'introduire des critères supplémentaires dans le choix des solutions dont la principale pour notre cas d'étude est de garantir la parcourabilité des trajectoires réelles [13].

### 3.3 Méthode de résolution

La résolution du problème consiste à déterminer pour chaque pose de la trajectoire le paramètre du retourneur  $q_7$ . Les premiers critères d'optimisation sont relatifs à l'éloignement des butées articulaires et des singularités  $q_s$  et la parcourabilité des trajectoires. Nous définissons également un critère de rigidité du robot (minimisant le porte-à-faux du poignet) :

$$c_r = \min |q_2 + q_3| \quad (1)$$

Le dernier critère plus spécifique concerne l'amélioration de la dextérité dans la direction d'avance  $u_f$  défini par [14] :

$$c_f = u_f^T (JJ^T) u_f \quad (2)$$

Nous sommes dans le cas d'une optimisation multi-objectifs. Pour la résolution de la redondance [15], une méthode classique est l'utilisation de la projection sur le noyau de la matrice jacobienne  $J$  :

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + \underbrace{(I - J^+ J)}_{J_h} z \quad (3)$$

où  $J^+ = J^T(JJ^T)^{-1}$  désigne la pseudo inverse de  $J$ ,  $z$  est un vecteur de même dimension que  $q$ ,  $I$  est la matrice identité (de la dimension de  $q$ ) et  $J_h$  la matrice de projection de  $z$  sur le noyau de  $J$ . Le vecteur  $z$  est dans notre cas défini comme le gradient d'une fonction objectif  $C$  construite par agrégation des objectifs initiaux. Une des difficultés des méthodes d'agrégation réside dans le choix du poids affecté à chaque critère. Pour modifier l'importance relative de chaque critère suivant la nécessité, nous utilisons une méthode à poids variables [16]. La forme de la fonction « objectif »  $C$  devient alors :

$$C(q) = \sum_{i=1}^k w_i(\bar{c}_i(x)) \bar{c}_i(q) \quad \text{avec} \quad \bar{c}_i(q) = \frac{c_i(q) - c_{i \min}}{c_{i \max} - c_{i \min}} \quad (4)$$

avec  $w_i(\bar{c}_i(q))$  la fonction de poids dépendant du critère  $\bar{c}_i$  variant entre 0 et 1.

L'outil de simulation et d'optimisation est développé dans Matlab<sup>®</sup>, en complément de RobotStudio<sup>®</sup>, permettant ainsi de définir et valider nos propres critères [17]. La figure 6 montre les postures du robot pour une trajectoire donnée sans (a, c) et avec optimisation (b, d). Les images (a, b) illustrent le critère d'éloignement de la singularité, (c, d) le critère de rigidité limitant le débattement des axes  $q_2$  et  $q_3$  du robot.

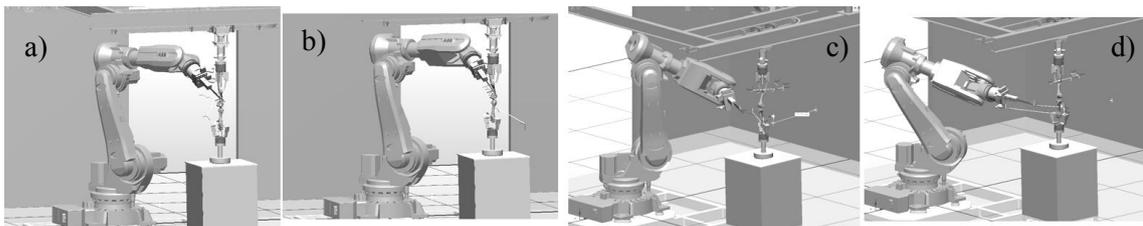


FIG. 6 - Posture non optimisée (a et c), posture optimisée (b et d).

### 3.4 Résultats industriels

Les résultats du désossage robotisé obtenus sont très encourageants pour la suite des développements et permettent de valider la stratégie mise en place en termes de qualité de coupe et de séparation os/muscles. Une étude de rendement matière est actuellement menée en comparant le désossage manuel et le désossage robotisé pour la même configuration de mise en position.

### Conclusion

Les travaux présentés dans cet article concernent la robotisation de tâches complexes dans le cadre du désossage de jambon. Après avoir décrit les opérations réalisées manuellement, nous présentons un processus issu de l'investigation de nouvelles méthodes de travail et les contraintes associées. Nous détaillons plus particulièrement la stratégie de coupe en appui sur un os qui nécessite un contrôle en effort lié à la forte variabilité du référentiel. Nous présentons le modèle associé à la cellule redondante puis la formalisation du problème de gestion de cette redondance et les critères d'optimisation utilisés (rigidité, parcourabilité, etc.). L'optimisation est appliquée aux différentes opérations permettant un comportement amélioré de la cellule. Les travaux en cours concernent la définition de nouveaux critères associés à la qualité de coupe. Les résultats escomptés permettront d'accroître les capacités de la cellule en termes d'adaptation à la tâche et ainsi de pouvoir évoluer vers des opérations plus complexes.

### Références

- [1] CNAMTS, Statistiques nationales des accidents du travail, des accidents de trajet et des maladies professionnelles - Année 2002, Caisse Nationale d'Assurance Maladie des Travailleurs salariés, 548, Paris, France, 2004.
- [2] Aimers R., Animal carcass leg removal method and apparatus, International Publication Number WO 03/096814 A1, 2003.
- [3] Purnell G., Robotic equipment in the meat industry, Meat Science, vol. 49, Supplement 1, 297-307, 1998.
- [4] Guire G., Sabourin L., Gogu G., Lemoine E., Robotic cell for beef carcass primal cutting and pork ham boning in meat industry, Industrial Robot, Vol. 37 Iss: 6, 532-541, 2010.
- [5] Duchemin G., Dombre E., Pierrot F., Poignet Ph., Robotized Skin Harvesting, 8th Int. Symp. On Experimental Robotics, Sant'Angello D'Ischia, Italy, 8-11 July 2002.
- [6] Lefebvre A., Méthodologie et outils de capitalisation des connaissances métier pour l'élaboration de gammes d'usinage : application à l'usinage des culasses automobiles, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont II, 2001.
- [7] Claudon L., Marsot J., Effect of knife sharpness on upper limb biomechanical stresses, a laboratory study, International Journal of Ergonomics, vol. 36, n°3, 239-246, 2006.
- [8] Marsot J., Claudon L., Jacqmin M., Assessment of knife sharpness by means of a cutting force measuring system, Applied Ergonomics, vol. 38, n° 1, 83-89, 2007.
- [9] Atkins T., Optimum blade configurations for the cutting of soft solids, Engineering Fracture Mechanics, vol. 73, n°16, 2523-2531, 2006.
- [10] Gogu G., Barraco A., Coiffet P., Représentation des déplacements des robots, Paris, Edition Hermès, ISBN 2-86601-572-X, 1997.
- [11] Pierrot F., Dombre E., Dégoulange E. & al, Hippocrate : a safe robot arm for medical application with force feedback, Medical Image Analysis, vol. 3, n° 3, 285-300, 1999.
- [12] ABB, Force control for machining, application manual, 2007.
- [13] Wenger M., Analyse et modélisation des robots manipulateurs, sous la direction d'Etienne DOMBRE, Paris, Editions Hermes Science, chapitre N°5, ISBN 2-7462-0300-6, 2002.
- [14] Dubey R., Luh J., Redundant robot control using task based performance measures, Journal of Robotic Systems, Vol. 5, N° 5, 409-432, 1988.
- [15] Robin V., Sabourin L., Gogu G., Optimization of a robotized cell with redundant architecture, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 27, 13-21, 2010.
- [16] Lee K., Buss M., Redundancy resolution with multiple criteria, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Integrated Robotics and Systems, 2006.
- [17] Robin V., Contribution à la mise en œuvre et l'optimisation d'une cellule robotisée : application au parachèvement de pièce de fonderie, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont II, 2007.