



HAL
open science

Conception du système de fabrication de pièces mécaniques en grand série : formalisation de la configuration géométrique (enveloppe) et cinématique de Machine-Outil Reconfigurable (MOR)

Hasan Aladad

► **To cite this version:**

Hasan Aladad. Conception du système de fabrication de pièces mécaniques en grand série : formalisation de la configuration géométrique (enveloppe) et cinématique de Machine-Outil Reconfigurable (MOR). Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2009. Français. NNT : 2008ENAM0012 . pastel-00005257

HAL Id: pastel-00005257

<https://pastel.hal.science/pastel-00005257>

Submitted on 31 Jul 2009

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.



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Mécanique"

*présentée et soutenue publiquement
par*

Hasan ALADAD

le 6ème juillet 2009

**CONCEPTION DU SYSTEME DE FABRICATION DE PIÈCES
MECANIQUES EN GRANDE SERIE: FORMALISATION DE LA
CONFIGURATION GEOMETRIQUE (ENVELOPPE) ET
CINEMATIQUE DE MACHINE-OUTIL RECONFIGURABLE
(MOR)**

Directeur de thèse : Patrick MARTIN

Co-encadrement de la thèse : Alain D'ACUNTO

Jury :

Gabriel ABBA, Professeur, ENIM, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz Examineur
Pascal RAY, Professeur, IFMA, LAMI, Clermont-Ferrand..... Rapporteur
Bernard ANSELMETTI, Professeur, Université Paris Sud 11, LURPA - Cachan Rapporteur
Patrick MARTIN, Professeur, LCFC, Arts et Métiers ParisTech Examineur
Alain D'ACUNTO, Maître de Conférences, LCFC, Arts et Métiers ParisTech Examineur

Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC)
Arts et Métiers ParisTech, centre de Metz

A mes parents

A ma famille

A mes amis

CONCEPTION DU SYSTEME DE FABRICATION DE PIECES MECANIQUES EN GRANDE SERIE: FORMALISATION DE LA CONFIGURATION GEOMETRIQUE (ENVELOPPE) ET CINEMATIQUE DE MACHINE-OUTIL RECONFIGURABLE (MOR)

RESUME: Tous les secteurs industriels sont aujourd'hui soumis à une pression économique importante et à une concurrence internationale accrue de part la globalisation des marchés. Pour répondre à cet état de fait, les entreprises sont contraintes d'innover et d'améliorer le cycle d'élaboration des produits et/ou processus depuis l'idée jusqu'au la mise sur le marché des produits. L'évolutivité rapide des produits et de la concurrence ont conduit les entreprises industrielles à faire un pas supplémentaire en imaginant de nouveaux systèmes de fabrication pour assurer simultanément une haute productivité et une haute flexibilité avec la contrainte nouvelle de changements rapides de famille de pièces. Le principe de « reconfigurabilité » de système de fabrication répond à ces contraintes. Or, il faut aujourd'hui faire preuve d'une très grande réactivité, pouvoir répondre rapidement à l'apparition d'un nouveau produit (évolution du design) et/ou une nouvelle demande (fluctuation de volume) afin de rester compétitif.

L'objectif de notre travail est de proposer une méthodologie de conception concernant les « Machines-Outils Reconfigurable » (MORs). Ces nouvelles machines-outils disposant de multibroches sont une réponse face aux fluctuations (changements fréquents) de la demande, de manière rapide et rentable en tenant compte du nombre croissant de variantes (variabilité en fonctionnalités et en volumes). La particularité de ce type de machine par rapport aux autres types conventionnels réside dans la possibilité d'évolution au niveau de la capacité et/ou de la flexibilité et d'exécuter simultanément plusieurs opérations à l'aide de broches actionnant de façon simultanée. Le domaine concerné porte sur la fabrication de famille de pièces mécaniques essentiellement prismatiques utilisant les techniques d'usinage (fraisage, opérations axiales...). La validation de notre méthodologie passe par la simulation virtuelle de la machine-outil fondée sur la modélisation géométrique, cinématique en tenant compte des concepts d'entité d'usinage, de visibilité, d'accessibilité.

Mots-clés: *machine-outil reconfigurable, conception de machine de production (machine-outil, robot industriel, MMT), systèmes manufacturiers reconfigurables, configuration de machine, structure de machine, entités d'usinage, accessibilité*

MANUFACTURE SYSTEMS DESIGN OF MECHANICAL WORK PIECE IN MASS PRODUCTION: FORMALIZATION OF THE GEOMETRICAL (ENVELOPE) AND KINEMATIC CONFIGURATION OF RECONFIGURABLE MACHINE TOOL (RMT)

ABSTRACT: Today all industrial sectors are subjected to an upward economic pressure and the international competition from the market globalization. To answer in this irrefutable fact, the companies are required to innovate and improve the cycle of product development and/or process from the idea to the product marketing. The fast changes in parts for existing products and competition have led the industrial companies to take an additional step by imagining new manufacturing systems to ensure simultaneously a high productivity and a high flexibility with additional constraints of rapid changes of the part family. This emergence of the "reconfigurability" we can date from the beginning of the year 1990. However, it is necessary today to show a very great reactivity, to be able to answer quickly the appearance of a new product and/or a new demand (fluctuation of volume) in order to stay competitive.

The purpose of this paper is to propose and to validate a design methodology of the new paradigm concerning the "Reconfigurable Machine Tools" (RMT), which are one of the answers, faced with

fluctuations of demands (frequent market changes), quickly and cost effective by taking into account the increasing alternatives (variability in terms of functionality and volume). The characteristic of this type of machine in relation to other conventional types lies in the upgrading capability in terms of the capacity and/or flexibility and to carry out simultaneously several operations using spindles actuating simultaneously. The field concerned this work is defined for the manufacturing of workpieces using the technology of prismatic machining (milling, axial operations...) based on different concepts of visibility, accessibility and machining features.

Keywords: *reconfigurable machine tool, design of production machine (machine tool, industrial robot, CMM), reconfigurable manufacturing systems, configuration of machine, structure of machine, machining features, accessibility*

Remerciements

Mon travail de thèse a été réalisé au sein d'Arts et Métiers ParisTech centre de Metz dans le Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC) dirigée par Monsieur Le Professeur des Universités Patrick MARTIN.

Mes remerciements vont en tout premier lieu, à mon directeur de thèse M. Patrick MARTIN et Co-encadrement M. Alain D'ACUNTO pour m'avoir épaulé durant cette période de la thèse. C'est grâce à leurs remarques, leurs conseils et à leurs soutiens que j'ai pu débiter dans le monde de la recherche dans d'excellentes conditions. Je les en remercie grandement.

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur le Professeur des Universités Gabriel ABBA qui me fait l'honneur de présider ce jury.

C'est un plaisir de reconnaître ce que je dois à Monsieur Pascal RAY, Professeur des Universités, directeur de l'Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA) et à Monsieur Bernard ANSELMETTI, Professeur des Universités à l'IUT de Cachan d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des personnes de l'école qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail, plus particulièrement, les membres de LCFC (la liste est trop longue pour figurer ici).

À mes amis et plus particulièrement Adnan MARTINI, Hussein ALGALI, Mohamad GALIL, Nabih, Thayer, Amer BAQI, Marius MIHALUTA, Cyril NICOLAS, Henri PERRIN, Sandra ZIMMER, Sajid Ullah BUTT, Liaqat SHAH etc.

Je remercie également ma grande famille et plus particulièrement mes parents, qui, depuis d'Alep, n'ont cessé de me soutenir.

Cette page de remerciements ne pourrait pas se conclure sans que je remercie vivement à ma épouse Douha et à ma petite famille (Mounib, Mounir) pour leurs encouragements, qui m'a toujours aidée et soutenue dans mes projets personnels et professionnels durant ces années.

Je dis tout ce que l'on ne peut pas écrire.

Un grand merci à vous tous !!!

Table des matières

Remerciements	- 5 -
Table des matières	- 7 -
Notations	- 10 -
Table des figures	- 14 -
Table des tableaux	- 17 -
Avant-propos	- 19 -
I. Chapitre I : Introduction, état de l' Art.....	- 23 -
I.1 Introduction générale.....	- 24 -
I.1.1 Enjeux et contexte	- 24 -
I.1.2 Objectifs, hypothèses	- 26 -
I.2 Systèmes manufacturiers.....	- 27 -
I.2.1 Préambule.....	- 27 -
I.2.2 Système manufacturiers dédiés	- 28 -
I.2.3 Système Manufacturiers Flexibles	- 29 -
I.2.4 Système Manufacturier Reconfigurable.....	- 31 -
I.3 Machine–Outil Reconfigurable	- 35 -
I.3.1 Introduction	- 35 -
I.3.2 SHIVA, machine-outil multibroche	- 36 -
I.3.3 Université du Michigan, Arch-Type RMT.....	- 37 -
I.3.4 METEOR 2010	- 40 -
I.3.5 Modélisation des machines-outils	- 41 -
I.3.6 Bilan	- 43 -
I.4 Méthodologie de conception de MOR	- 44 -
I.4.1 Cahier des charges.....	- 44 -
I.4.2 Informations préalables	- 46 -
II. Chapitre II : Machine-Outil Reconfigurable : Caractéristiques intermédiaires	- 47 -
II.1 Introduction	- 48 -
II.2 Représentation intermédiaire.....	- 48 -
II.2.1 Concept d'entité	- 50 -
II.2.2 Notion de Volume d'encombrement	- 57 -
II.2.3 Concept d'accessibilité.....	- 57 -
II.3 Montage d'usinage	- 62 -
II.3.1 Posage et bridage.....	- 62 -
II.3.2 Fonctions élémentaires	- 63 -
II.3.3 Application aux pièces P _A et P _B	- 68 -
II.4 Géométrie intermédiaire caractéristique	- 70 -
II.5 Conclusion.....	- 72 -
III. Chapitre III : Processus, Opérations.....	- 73 -
III.1 Introduction	- 74 -
III.2 Processus d'usinage.....	- 74 -
III.2.1 Définitions	- 74 -
III.2.2 Proposition de modèles de représentation du processus d'usinage.....	- 75 -
III.2.3 Proposition de modèle d'opérations d'usinage	- 77 -
III.3 CFAO : Outil d'aide à la simulation	- 87 -
III.3.1 Logiciel CATIA	- 87 -

III.3.2	Exemple d'application.....	- 88 -
III.3.3	Volume balayé.....	- 89 -
III.4	Conclusion.....	- 92 -
IV.	Chapitre IV : Processus de fabrication, Architecture géométrique et cinématique, Configuration et Reconfiguration.....	- 93 -
IV.1	Introduction	- 94 -
IV.2	Contraintes de fabrication	- 94 -
IV.2.1	Contraintes d'antériorité.....	- 94 -
IV.2.2	Contraintes au niveau des broches	- 98 -
IV.3	Ordonnancement	- 102 -
IV.4	Interférences des outils.....	- 105 -
IV.4.1	Détection d'interférences	- 106 -
IV.4.2	Intérêt de l'environnement de CFAO.....	- 109 -
IV.5	Représentation des processus de fabrication.....	- 110 -
IV.6	Architecture de MOR.....	- 113 -
IV.6.1	Informations préalables	- 114 -
IV.6.2	Architecture géométrique.....	- 115 -
IV.6.3	Architecture cinématique	- 125 -
IV.6.4	Critères de choix des solutions.....	- 128 -
IV.7	Configuration et reconfiguration de MOR.....	- 134 -
IV.7.1	Reconfiguration sans changement de structure.....	- 135 -
IV.7.2	Reconfiguration avec changement de montage de MOR.....	- 139 -
IV.8	Conclusion.....	- 145 -
V.	Chapitre V : Structure, Modélisation, Création virtuelle, Validation	- 147 -
V.1	Introduction	- 148 -
V.2	Constituants structurels de la MOR	- 148 -
V.3	Représentation de modules de la MOR.....	- 149 -
V.3.1	Représentation géométrique.....	- 149 -
V.3.2	Représentation cinématique	- 150 -
V.3.3	Choix du module	- 151 -
V.4	Modèle structural articulé de la MOR.....	- 152 -
V.4.1	Graphe de connectivité.....	- 153 -
V.4.2	Assemblage des modules	- 154 -
V.4.3	Modèle géométrique direct.....	- 155 -
V.4.4	Modèle géométrique inverse	- 156 -
V.5	Volume d'accessibilité	- 156 -
V.5.1	Espace articulaire	- 157 -
V.5.2	Espace opérationnel.....	- 157 -
V.6	Modèle global.....	- 157 -
V.6.1	Description géométrique (pièce, entité)	- 158 -
V.6.2	Description géométrique (pièce, porte-pièce)	- 158 -
V.6.3	Description géométrique (MOR)	- 159 -
V.6.4	Description géométrique (broche, outil)	- 159 -
V.6.5	Description géométrique (outil-entité) (fermeture de la boucle)	- 160 -
V.7	Modèle virtuel de MOR	- 162 -
V.7.1	Programme d'usinage.....	- 163 -
V.7.2	Création de structure de la MOR.....	- 165 -
V.7.3	Validation	- 168 -
V.8	Conclusion.....	- 173 -
	Conclusion générale	- 175 -

Perspectives et travaux futurs.....	- 177 -
VI. Annexes.....	- 195 -
VI.1 Annexe. A : nomenclature des entités d’usinage	- 196 -
VI.2 Annexe B: opérations d’usinage	- 199 -
VI.2.1 Type d’opérations d’usinage	- 199 -
VI.3 Annexe C : Mouvement des corps rigides	- 204 -

Notations

Symbole	Dénomination	
	Français	Anglais
SMR/RMS	Système Manufacturier Reconfigurable	Reconfigurable Manufacturing system
MOR/RMT	Machine Outil Reconfigurable	Reconfigurable Machine Tool
SMF/FMS	Système Manufacturier Flexible	Flexible Manufacturing System
SMD/DMS	Système Manufacturier Dédié	Dedicated Machining System
LTD	Ligne Transfert Dédiée	Dedicated line
AF/FS	Ateliers Flexibles	Flexible System
CAO/CAD	Conception Assistée par Ordinateur	Computer-Aided Design
CFAO/CADCAM	Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur	Computer-Aided Design And Manufacturing
CNC	Commande Numérique par Calculateur	Computer Numerical Control
MOCN/NC	Machine Outil à Commende Numérique	Numerically Controlled machine
S	Pièce brute	Raw part
P	Pièce finie	Workpiece
P _A	Le couvercle de pompe à huile (exemple d'application)	The oil pump cover
P _B	Le carter de pompe à huile (exemple d'application)	The oil pump housing
E _i	Entité d'usinage à usiner	Machining feature to be machined
T _c	Outil de coupe	Cutting tool
D_{Ei}^{in}	Données intrinsèques de l'entité E _i	Intrinsic data of feature
D_{Ei}^{ex}	Données extrinsèques de l'entité E _i	Extrinsic data of feature

$D_{E_i}^u$	Données relatives à l'usinabilité de l'entité E_i	Machinability data of feature
P_u	Processus d'usinage	Machining process
U	Opération d'usinage	Machining operation
Da	Direction d'approche d'outil	Tool access direction
Vu	Volume d'usinage	Machining volume
V _b	Volume balayé d'outil	Swept volume
PAP	Mouvement cartésien de Point à Point	Translational motion
DAD	Mouvement polaire de Direction à Direction	Rotational motion
M _{ax}	Mouvement axial	Axial motion
M _{ra}	Mouvement radial	Radial motion
M _m	Mouvement mixte	Mixed motion
T ^r	Trajectoire	Trajectory / path
Mr	Mouvement rapide	Rapid traverse/rapid Motion/ Positioning motion
Mt	Mouvement travail	Working motion/ Feeding motion
$E_i \wedge E_j$	Proposition de conjonction	
$E_i \vee E_j$	Proposition de disjonction	
$U_i \wedge M(U_j)$	(M) traduit la temporalité et exclut la simultanéité des opérations U_i et U_j	
$(U_i)W(U_j)$	(W) dont la signification correspond au « ou exclusif » des opérations U_i et U_j	
$S(U_i \wedge U_j)$	(S) dont la signification correspond simultanément des opérations U_i et U_j	
$\delta(U_i \wedge U_j)$	(δ) exclut la simultanéité et impose l'égalité de choix entre les	

	opérations U_i et U_j	
Q_{MOR}	La tâche qui doit être effectuée par la MOR	The task of RMT
RBD	Reconfiguration par des Broches Dépendantes (RBD)	
RBI	Reconfiguration par des Broches Indépendant (RBI)	
MTH/ HTM	Matrice de Transformation en coordonnées Homogènes	Homogeneous Transformation Matrix
S_M	Vecteur dual de mouvement	Dual vectors of motion
DDL/DOF	Degré De Liberté	Degrees Of Freedom
F	Une broche de MOR	Spindle of RMT
i	Un module (composant) de la structure de MOR	A module (i) of RMT structure
i_0	Le module de la palette de MOR	The table module of RMT structure
i_n	Le module de la broche dans la structure de MOR	The spindle module of RMT structure
A_i	Le modèle global parfait de module (i)	The global model of RMT
G_i	Configuration de module (i)	Configuration of the module (i)
M_i	Le modèle cinématique de module (i)	Kinematical model of the module (i)
C_i	la connexion de module (i) avec le module suivant (i+1)	Connection between module (i) and module (i+1)
$\mathfrak{R}(P)$	Repère de pièce P	Reference system of workpiece
$\mathfrak{R}(E_i)$	Repère d'entité E_i	Reference system of feature
$\mathfrak{R}(Pe)$	Repère d'entrée de posage (porte-pièce)	Location reference system
$\mathfrak{R}(Ps)$	Repère de sortie de posage (porte-pièce)	
$\mathfrak{R}(i)$	Repère de module (i)	Reference system of module

$\mathcal{R}(T_c)$	Repère de la partie active d'outil de coupe (repère d'outil)	Reference system of cutting tool tip
$\mathcal{R}(v)$	Repère d'attachement d'outil de coupe	Reference system of cutting tool attachment
$\mathcal{R}(i_0)/\mathcal{R}(i_1)$	Le changement de repère du module (i_0) au module (i_1)	Transformation from input frame $\mathcal{R}(i_0)$ to output frame $\mathcal{R}(i_1)$

Table des figures

Figure 1. Articulation des chapitres de conception de MOR.	- 20 -
Figure I.1 : Présentation des problématiques de bases relatives aux systèmes manufacturiers [Gen, 2009].....	- 25 -
Figure I.2. Famille de pièces/MOR.	- 27 -
Figure I.3. Source SOMEX (www.somex.fr).....	- 29 -
Figure I.4. Exemple atelier flexible – cellule X-Cell-O.....	- 30 -
Figure I.5. Comparaisons des systèmes manufacturiers LMD, SMF et SMR.	- 32 -
Figure I.6. Structure de communication d’une machine reconfigurable [Pritschow, 1993, 2003].....	- 33 -
Figure I.7. Caractéristiques clés de MOR.	- 33 -
Figure I.8. Classification des systèmes de fabrication [Abele et al, 2006].	- 36 -
Figure I.9. Architecture de machines multibroches [Garro, 1992].	- 37 -
Figure I.10. Shiva – méthode.	- 37 -
Figure I.11. Exemples de machine reconfigurable de mesure et d’usinage de culasses.	- 38 -
Figure I.12. Démarche de conception de Machine Outil Reconfigurable.....	- 39 -
Figure I.13. Logiciel PRIMADE permettant de déterminer le comportement dynamique de chaque module de la MOR [Moon et Kota, 2002].	- 39 -
Figure I.14. Modules de la machine outil reconfigurable.	- 40 -
Figure I.15. Exemple d’intégrabilité, convertibilité, extensibilité concernant les produits de la société INDEX.	- 41 -
Figure I.16. Architecture d’une machine simple.....	- 42 -
Figure I.17. Notre méthodologie de conception de la MOR.....	- 45 -
Figure I.18. Exemple d’application à l’ensemble des chapitres.....	- 46 -
Figure II.1. Représentation intermédiaires du passage de famille de pièces à la MOR.....	- 48 -
Figure II.2. Types des entités (selon le groupe GAMA) [Tollenaere, 1998].	- 51 -
Figure II.3. Référence AP-224.	- 52 -
Figure II.4. Exemple des entités d’usinage et des données de description.	- 53 -
Figure II.5. Entités d’usinage des pièces de la pompe à huile (P_A et P_B).	- 56 -
Figure II.6. Volumes d’encombrement de couvercle au sien du processus de fabrication.	- 57 -
Figure II.7. Accessibilité entre différentes activités.....	- 58 -
Figure II.8. (a) Cône d’accessibilité de point et d’entité, (b) accessibilité de pièce pour des opérations axiales suivant le type de machine.	- 59 -
Figure II.9. Direction d’usinage simple et sa présentation par une sphère d’accessibilité.	- 60 -
Figure II.10. Directions d’usinage multiples et ses présentations sur sphère d’accessibilité.	- 61 -
-	
Figure II.11. Posage et bridage.....	- 62 -
Figure II.12. Modèle du posage.	- 64 -
Figure II.13. Mise en coïncidence pièce, porte-pièce et la palette de machine lors d’assemblage.	- 64 -
Figure II.14. Modèle de bridage.....	- 65 -
Figure II.15. Types de position.	- 66 -
Figure II.16. Montage d’usinage.....	- 67 -
Figure II.17. Entités de posage, de localisation et de bridage du couvercle.	- 68 -
Figure II.18. Entités de posage, de localisation et de bridage du carter.....	- 69 -
Figure II.19. Exemple de polyèdres convexes	- 70 -

Figure II.20. Géométrie caractéristique intermédiaire du couvercle P_A	- 71 -
Figure II.21. Géométrie caractéristique du carter P_B	- 71 -
Figure III.1. Processus d'usinage.	- 75 -
Figure III.2. Module fonctionnel de choix des opérations d'usinage.....	- 77 -
Figure III.3. Exemple de méthode de choix d'outil selon (Edalew et al, 2001).	- 78 -
Figure III.4. Volume d'encombrement d'outils de coupe.	- 79 -
Figure III.5. Repère référentiel d'outil de coupe.....	- 79 -
Figure III.6. Modèle de représentation annoncée sur Catia.	- 82 -
Figure III.7. Mouvement cartésien PAP.....	- 83 -
Figure III.8. Mouvement d'outil de coupe DAD.	- 84 -
Figure III.9. Points référentiels de trajectoire, mouvement de trajectoire.....	- 85 -
Figure III.10. Trajectoire d'outil : alésage un trou.	- 86 -
Figure III.11. Génération des trajectoires sur CATIA.	- 87 -
Figure III.12. Silhouettes des mouvements linéaire et circulaire.....	- 90 -
Figure III.13. Volume balayé par un outil de coupe en broche.....	- 91 -
Figure III.14. Vue de volume balayé simulé par CATIA.....	- 92 -
Figure IV.1. Simultanéité et séquentialité des opérations sur une broche.	- 97 -
Figure IV.2. Types des broches dans l'environnement industriel.....	- 99 -
Figure IV.3. Simultanéité et séquentialité des broches.	- 101 -
Figure IV.4. Rapport de séquentialité des opérations du couvercle P_A par niveaux.	- 104 -
Figure IV.5. Liaisons de séquentialité des entités du carter par niveau.	- 105 -
Figure IV.6. Espaces 3D des volumes balayés lors de réalisation des entités E_2^A et E_3^A	- 106 -
Figure IV.7. Détection des interférences (a) interférences confirmée (b) non interférence. -	106
-	-
Figure IV.8. Interférences entre de l'outil T_{c1} et V_{b2} , V_{b3} lors de surfacage de l'entité E_1^A ..	- 109
-	-
Figure IV.9. Architecture des systèmes manufacturiers.	- 114 -
Figure IV.10. Solution d'usinage.	- 116 -
Figure IV.11. Solutions d'architecture d'exécution d'entité E_i (Figure IV.10).	- 117 -
Figure IV.12. Mouvements des broches.....	- 125 -
Figure IV.13. Représentations des mouvements de broche sur le système de coordonnées.....	- 126 -
Figure IV.14. Diagramme fonctionnel.	- 127 -
Figure IV.15. Caractères des solutions d'architecture de P_A en termes de productivité... -	129 -
Figure IV.16. Caractères des solutions (concernant P_A) en termes d'économie.....	- 130 -
Figure IV.17. Caractères des solutions d'architecture de P_B en termes de productivité... -	131 -
Figure IV.18. Caractères des solutions (concernant P_B) en termes d'économie.....	- 132 -
Figure IV.19. Diagramme fonctionnel de la MOR répondant à la réalisation des pièces P_A et P_B	- 133 -
Figure IV.20. Configuration et reconfiguration de MOR.	- 134 -
Figure IV.21. Configuration par des outils de coupe avancés.	- 135 -
Figure IV.22. Configuration par des broches multiples.	- 137 -
Figure IV.23. Reconfiguration par des broches dépendantes.....	- 140 -
Figure IV.24. Évolution des productivités de MOR lors de reconfiguration par broches dépendants.....	- 141 -
Figure IV.25. Reconfiguration par des broches indépendantes.	- 142 -
Figure IV.26. Reconfigurations de MOR par les broches $F1'$ et $F3'$	- 143 -
Figure IV.27. Reconfiguration par des axes des mouvements [Landers et Min, 2002]....	- 144 -
Figure V.1. Constituants structuraux de MOR.....	- 149 -
Figure V.2. Représentation de module de MOR.....	- 149 -

Figure V.3. Modèle de choix des modules de MOR.....	- 151 -
Figure V.4. Modèle structural de machine classique et de la MOR, schéma structural. ..	- 152 -
Figure V.5. Graphe de connectivité de chaîne de MOR.	- 154 -
Figure V.6. Changement de repère de i à $i+1$	- 155 -
Figure V.7. Schéma d'espace articulaire et d'espace de la tâche.....	- 156 -
Figure V.8. Modèle global de MOR.	- 157 -
Figure V.9. Rapport géométrique, pièce-entité.	- 158 -
Figure V.10. Rapport géométrique, pièce \rightarrow porte-pièce \rightarrow palette.	- 159 -
Figure V.11. Rapport géométrique, broche-outil.	- 160 -
Figure V.12. Définitions géométrique.....	- 161 -
Figure V.13. Modèle global direct.	- 162 -
Figure V.14. Modèle global inverse.....	- 162 -
Figure V.15. Modèle CFAO de MOR.....	- 163 -
Figure V.16. Programmes d'usinage conduisent les broches $F1_{(z-)}$, $F2_{(y+)}$ et $F3_{(z+)}$ pour effectuer P_A	- 164 -
Figure V.17. Palette de MOR.....	- 165 -
Figure V.18. Positions initiales des broches	- 165 -
Figure V.19. Accessibilité de MOR répondant à l'usinage des pièces P_A et P_B	- 166 -
Figure V.20. Création structurelle de modèle CFAO de MOR.....	- 167 -
Figure V.21. Un exemple de configuration de MOR.....	- 167 -
Figure V.22. MOR à type portique.	- 168 -
Figure V.23. Analyse d'accessibilité et des limites de courses des axes.	- 169 -
Figure V.24. Positionnement des broches et des pièces sur la palette de machine.....	- 170 -
Figure V.25. Accessibilité et courses des axes suffisantes.	- 171 -
Figure V.26. Détection de collision lors de fonctionnalité de F_1	- 172 -
Figure V.27. Analyse de collision.....	- 173 -
Figure VI.1 STEP AP-224 [Scara, web]	- 196 -
Figure VI.2. Opérations d'usinage axiales.	- 200 -
Figure VI.3. Exemple des opérations de fraisage [Sandvik, web].	- 201 -
Figure VI.4. Opérations de fraisage en bout et en roulant	- 202 -
Figure VI.5. Exemple des outils de fraisage [Sandvik, web].....	- 203 -
Figure VI.6. Position de corps rigide.	- 204 -
Figure VI.7. Paramètres de transformations de repère.....	- 205 -

Table des tableaux

Tableau I.1. Comparaison entre SMF et LMD.....	- 31 -
Tableau II.1. Entités à usiner du couvercle (P_A) et du carter (P_B).....	- 56 -
Tableau II.2. Directions d'usinage éventuelles (directions d'approche) du couvercle et du carter.....	- 62 -
Tableau III.1. Opérations d'usinage associées aux entités du couvercle et du carter, outils de coupe appropriés.	- 81 -
Tableau III.2. Points référentiels de trajectoire d'outil d'alésage de trou représenté en Figure III.10.....	- 86 -
Tableau III.3. Programme d'usinage des entités E_7^A et E_9^A	- 89 -
Tableau IV.1. Exemples de règles en fonction des contraintes topologiques [Cordebois, 2003].	- 95 -
Tableau IV.2. Exemple des règles en fonction des interactions géométriques.	- 96 -
Tableau IV.3. Exemple des règles en fonction des interactions de fabrication.	- 97 -
Tableau IV.4. Matrice d'antériorité affectée au couvercle de pompe P_A	- 103 -
Tableau IV.5. Simultanéité des opérations d'usinage du couvercle P_A .et du carter P_B	- 109 -
Tableau IV.6. Représentation des accessibilités d'usinage des entités P_A et P_B correspond au repère des polyèdres.	- 118 -
Tableau IV.7. Mouvements globaux de la broche F.	- 126 -
Tableau V.1. Résumé des changements des repères concernant une broche de MOR.	- 161 -
Tableau VI.1. Catégories des entités d'usinage selon STEP AP-224.	- 197 -
Tableau VI.2. Quelques entités d'usinage utilisées à type prismatique 2.5D.	- 198 -

Avant-propos

Ce mémoire décrit une démarche naturelle et logique cherchant à synthétiser des travaux multiples sur les machines-outils, avec l'objectif de la reconfigurabilité dans un contexte d'interaction produit-procédé-processus-ressources.

Depuis plus d'une vingtaine d'années, de nombreux travaux concernent la conception de systèmes manufacturiers. Or, le nouveau paradigme concernant les

«Systèmes Manufacturiers Reconfigurables» (SMR) résulte d'une lente évolution initiée par les Lignes Transferts Dédiée (LTD), en des Systèmes Manufacturiers Flexibles (SMF), puis intelligents (IMS). Ces systèmes de fabrication sont des réponses aux contraintes de production en série de masse (LTD), en série par lots renouvelables (SMF et IMS). Or, les SMR sont une des réponses face aux fluctuations (changements fréquents) de la demande, de manière rapide et rentable en tenant compte du nombre croissant de variantes (variabilité en fonctionnalités et en volumes), par exemple dans le secteur de l'automobile. Ils sont dits reconfigurables car ils sont constitués de modules et sont conçus pour faire face aux changements très fréquents du marché. Ce sont des systèmes de fabrication hybrides réalisant un compromis entre les SMF et les LTD.

Or, la plupart des travaux en conception de systèmes de fabrication portent essentiellement sur les aspects d'ordonnancement (balançage) et d'optimisation (modèle de Markov, files d'attente) ainsi que de la simulation de lignes de production (fabrication et assemblage). Par ailleurs, les travaux initiés par Garro [Garro, 1992] ont présenté une méthodologie de conception de la partie opérative de machines-outils dans le secteur du bois en ayant intégré un niveau de reconfigurabilité. Ces travaux se basent sur le concept d'entité de fabrication définie quelques années plus tard dans l'ouvrage collectif sous la direction de Tollenaere [Tollenaere, 1998] en respectant les contraintes concomitantes de productivité et de flexibilité. Depuis 1996, Koren et son équipe travaillent sur les Systèmes Manufacturiers Reconfigurable. En 1999, Koren [Koren et al, 1999] propose le concept de Machines-Outils Reconfigurables (MOR) dans le compte rendu annuel de l'assemblée du CIRP.

Notre objectif est de proposer une méthodologie de conception de MOR, en précisant le type des structures et d'architectures pour des familles de produits mécaniques à de fortes variabilités dimensionnelles, géométriques et quantitatives.

Travail réalisé

La démarche retenue s'articule autour de cinq chapitres, comme l'illustre la Figure 1.

Le chapitre I de ce mémoire nous permet de situer l'introduction générale et dépeint le cadre de réflexion dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse. Il propose une étude bibliographique des systèmes manufacturiers actuels en se focalisant plus particulièrement sur les systèmes manufacturiers dédiés et les systèmes manufacturiers flexibles. Il s'intéresse également à l'introduction sur les différents travaux existant dans le domaine de conception de machines outils reconfigurables. Cette représentation permet de délimiter le cadre de ce travail en précisant les données d'entrées. Enfin, nous proposons la méthodologie représentation générale de conception de MOR.

Dans le chapitre II, nous introduisons les concepts (entités, accessibilité, volume encombrement, polyèdre caractéristique...) capitaux pour définir le processus de fabrication.

Ils constituent le point de départ permettant de formaliser les différentes connaissances nécessaires à la génération de MOR. Par ailleurs nous présentons les contraintes dues au posage et le bridage de pièces de manière à garantir un usinage en respectant les spécifications dimensionnelles et géométriques. Les contraintes géométriques permettent alors de définir les espaces fonctionnels en fonctions de critères technologiques (isostatisme, stabilité et qualité...).

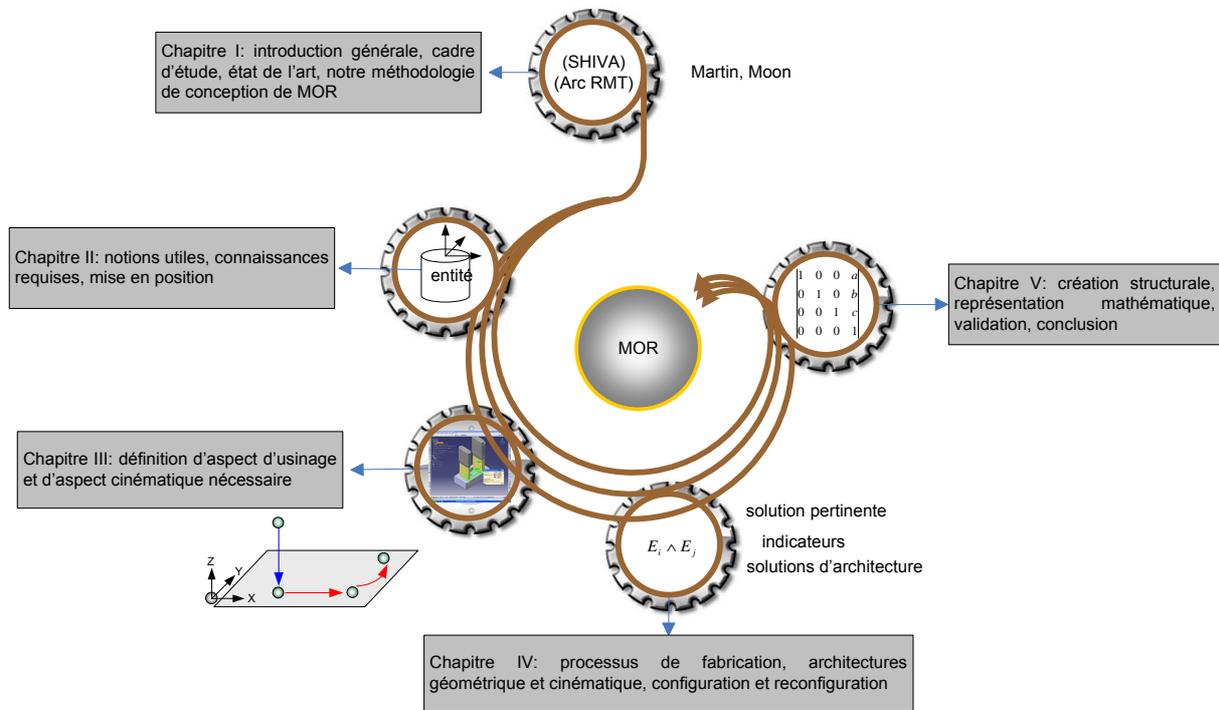


Figure 1. Articulation des chapitres de conception de MOR.

Le chapitre III est destiné à mettre en évidence deux aspects qui consistent à générer l'architecture géométrique et cinématique de la MOR. Le premier aspect permet de définir la réalisation des entités d'usinage en fonction de l'analyse des entités d'usinage, des séquences d'usinage, des outils de coupe, des conditions opératoires. L'autre aspect concerne la cinématique des axes constituant la MOR pour réaliser les tâches opératoires liées à l'usinabilité des entités d'usinage (mouvements, trajectoire, volume balayé).

Le chapitre IV se focalise sur l'activité de représentation des processus de fabrication répondant précisément à la génération de tâche d'usinage (famille de pièces) de MOR à partir des contraintes de fabrication basées sur des règles métiers et des connaissances permettent de définir l'ordonnancement d'usinage et les possibilités d'usinage de manière séquentielle et/ou en manière simultanée. Ce chapitre propose également d'identifier des solutions architecturales à partir des règles systématiques basées sur l'algèbre développée par Garro [Garro, 1992], [Garro et Martin, 1993] en vue de regrouper les entités répondant à la configuration et la reconfiguration de la MOR.

Le chapitre V porte sur la mise en œuvre de la méthodologie de conception de la MOR à l'aide de Catia/Delmia dont les composants de la MOR sont décrits par des modules (bases, axes, broche...), le montage (porte-pièce), les outils et les pièces... La description de la nature structurale de la MOR est définie par un modèle global dont la majeure partie des outils de modélisation est issue de la robotique. De même, ce chapitre s'intéresse également à la validation des différentes activités amenant à la génération de la MOR à l'intérêt de la

visualisation virtuelle de simulation créée par des outils informatiques CFAO (Catia et/ou Delmia).

Puis, la conclusion présente une synthèse de ces travaux et permet de proposer des pistes pour des travaux de recherche ultérieurs.

I. Chapitre I : Introduction, état de l' Art

I.1 Introduction générale

I.1.1 Enjeux et contexte

Tous les secteurs industriels sont aujourd'hui soumis à une pression économique importante et à la concurrence internationale de part la globalisation des marchés. Pour répondre à cet état de fait, les entreprises sont contraintes d'innover et d'améliorer le cycle d'élaboration des produits et/ou processus depuis l'idée jusqu'au la mise sur le marché des produits.

Les demandes de clients et/ou du marché correspondent à de profonds changements et imposent aux entreprises de fournir un produit ou/et des services en respectant les exigences de « *prix toujours plus faible, en proposant un choix varié, disponible et de bonne qualité* ».

Les stratégies mises en place par les entreprises sont diverses et conduisent à des choix industriels répondant partiellement à ces exigences (délocalisation, fabrication de produits intermédiaires, transfert de technologie, automatisation de la production, nouveaux systèmes manufacturiers, développement de la logistique...). Pour ce qui nous concerne, notre approche porte sur une des stratégies qui correspond au développement de systèmes de fabrication innovant pouvant répondre à ces exigences.

Depuis l'avènement de l'industrialisation, les ingénieurs ont développé des Systèmes Manufacturiers et cherché à augmenter leurs efficacités par le développement de la productivité puis de la flexibilité concomitamment à l'évolution de la gestion industrielle et à l'automatisation. Or, il faut aujourd'hui faire preuve d'une très grande réactivité, pouvoir répondre rapidement à l'apparition d'un nouveau produit (évolution du design) et/ou une nouvelle demande (fluctuation de volume) afin de rester compétitif. Prévoir la tendance du marché reste extrêmement difficile et celui-ci rentre dans une logique d'une vision à long terme (suivant les demandes de clients, étude de l'évolution du marché), et une erreur dans un tel cas est d'autant plus rédhibitoire.

Alors, l'évolutivité rapide des produits et de la concurrence ont conduit les entreprises industrielles à faire un pas supplémentaire en imaginant de nouveaux systèmes de fabrication pour assurer simultanément une haute productivité et une haute flexibilité avec une contrainte nouvelle de changements rapides de famille de pièces. C'est émergence de la « reconfigurabilité » que nous pouvons dater du début des années 1990.

Les Systèmes Manufacturiers Flexible (SMF) ou Ateliers Flexibles (AF) développés dans les années 1980 coûtent chers et sont souvent sous-exploités par rapport aux Lignes Transfert Dédiées (LTD) ou Systèmes Manufacturiers Dédiés (SMD) qui ont une productivité forte mais sont peu évolutifs. Une nouvelle génération des Systèmes Manufacturiers dits Reconfigurables (SMR) se propose de répondre à ces deux contraintes antinomiques. Ce nouveau concept de système de fabrication doit répondre rapidement aux demandes en tenant compte des contraintes de productivité et de flexibilité à des coûts réduits tout en intégrant de nouveaux principes (Cf. paragraphe I.2.3) comme :

- la modularité tant sur le plan de la conception mécanique que les logiciels et matériels par l'intégration des nouvelles technologies d'aujourd'hui et de demain ;
- la convertibilité, par l'aptitude de mise en course rapide ;
- le diagnosticabilité, rendant le système de fabrication disponible à la production ;
- la personnalisation en fonction des produits.

Or, ce nouveau paradigme concernant les systèmes manufacturiers « reconfigurables » doivent faire face à des contraintes *a priori* contradictoires telles que la haute flexibilité, la haute productivité, le coût et la qualité.

Ce travail de thèse se positionne dans ce cadre. En particulier, nous nous focaliserons sur la Machines-Outils dites Reconfigurables faisant partie d'un ensemble plus vaste appartenant aux SMR dont l'application porte sur la fabrication de pièces mécaniques en usinage.

De nombreux travaux de recherche portent sur la conception de la partie commande et le pilotage de ces systèmes mais très peu sur la conception de la partie opérative et l'agencement de cette partie opérative. L'ensemble de ces travaux sont essentiellement dans le champ thématique de l'automatique (pilotage, surveillance, ordonnancement des systèmes de production). La revue de l'évolution des systèmes manufacturiers réalisée par [Gen, 2009] présente l'approche (Figure I.1).

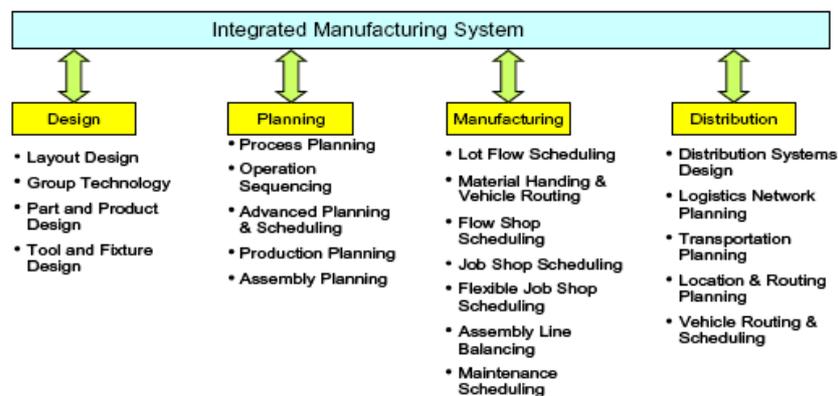


Figure I.1 : Présentation des problématiques de bases relatives aux systèmes manufacturiers [Gen, 2009]

Néanmoins, depuis plus de 15 ans, des travaux de recherche en matière de démarche de conception de machines outils reconfigurables émergent en France au travers des thèses (Vincent Patriti 1998, et Olivier Garro en 1992 sous la direction du Pr. Patrick Martin au sein du Centre de Recherche en Automatique de Nancy - CRAN) et aux Etats-Unis depuis 1998 à l'Université du Michigan en collaboration avec l'industrie automobile sous la responsabilité du Pr. P. Koren. Par ailleurs, en Allemagne, le Projet « METEOR 2010 - Multi Technology Based Reconfigurable Machine Tool 2010 » sponsorisé par le ministère de la recherche allemand (Bundesministerium für Bildung und Forschung – BMBF dans un projet plus large intitulé Produktionsforschung: Lösungen aus Deutschland für Produktion und produktionsnahe Dienstleistungen) est un projet regroupant le laboratoire « Institute of Production Management, Technology and Machine Tools (PTW) de l'Université de Technologie de Darmstadt et des industriels allemands (Ex-Cell-O, Schuster, MAPAL, Blüm, Rhöm...) [Meteor2010, web]. Ce projet consiste à standardiser les composants qui interviennent lors de la constitution de système de fabrication. Les procédés impliqués dans cette étude sont le fraisage, le perçage, la rectification voire le traitement thermique par laser. L'intérêt de telles machines ou systèmes de fabrication est leur importante flexibilité due au concept de reconfigurabilité au travers d'application de concept dit «plug and produce».

En Italie, dans le cadre du CIRP et sous la responsabilité du Professeur Tolio, le projet intitulé SPECIES (RobuSt Production System Evolution Considering Integrated Evolution Scenarios) a pour objectif de concevoir, de piloter, de surveiller, et de superviser les systèmes de

production dans le démarche « produit/ressources/processus » en intégrant les aspects socio-économiques et technologiques d'aujourd'hui et de demain. Une des issues est de définir les performances des systèmes de fabrication en tenant compte de la reconfigurabilité au regard de solutions technologiques en fonction de scénarii d'évolution [Species, 2008].

I.1.2 Objectifs, hypothèses

Le travail développé dans ce mémoire concerne les systèmes manufacturiers reconfigurables, en particulier les machines-outils reconfigurables.

L'objectif de notre travail est de proposer, de valider une méthodologie de conception de nouveau paradigme concernant les « Machines-Outils Reconfigurables » (MOR_s), qui sont une des réponses face aux fluctuations (changements fréquents) de la demande, de manière rapide et rentable en tenant compte du nombre croissant de variantes (variabilité en fonctionnalités et en volumes). Le domaine concerné dans ce travail est défini pour la fabrication de pièces mécaniques essentiellement prismatiques utilisant les techniques d'usinage (fraisage, opérations axiales...) sur des ressources disposant de multibroches.

La logique de conception de MOR est traduit en trois catégories de problématiques : (i) géométrique, (ii) architecturale et (iii) structurale.

La problématique géométrique s'appuie sur la formalisation des données technologiques nécessaires à la réalisation de ou des tâches d'usinage (une pièce ou une famille de pièces à usiner). Nous faisons appel aux concepts des entités d'usinage [Gama, 1990, 1999].

La problématique architecturale se base sur la définition des processus de fabrication possibles et également l'identification de toutes solutions de configuration possibles garantissant la réalisation de la tâche et les solutions de reconfiguration répondant rapidement aux changements futurs.

Par contre, la problématique structurale s'appuie sur la représentation mathématique de la l'architecture de MOR et la mise en œuvre de la structure réelle et non perturbée (modèle géométrique parfait) de celle-ci.

Pour répondre à ces problématiques, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été émises, tant les passages et les interactions entre les domaines géométriques, architecturaux et structuraux sont complexes, dénotant de la dimension systémique de ces problèmes. Notre travail repose sur les hypothèses suivantes :

- la pièce et/ou la famille de pièces à usiner sont de type prismatique ;
- les surfaces et entités d'usinage sont produites à partir des techniques d'usinage conventionnelles (opérations de fraisage, opérations axiales...) ;
- le posage (mise et maintien en position) pendant toutes les opérations d'usinage est univoque ;
- la définition géométrique de pièces à usiner et les entités (surfaces) de mise en position sont déjà spécifiés préalablement par le concepteur et le gammiste ;
- les contraintes de précedence (ordre partiel du déroulement d'opérations qu'il faut respecter) sont imposées par le gammiste ;
- les contraintes d'inclusion et d'exclusion pour les opérations existent au niveau des broches, et doivent être respectées.
- La simultanéité des actions d'usinage ou de positionnement de broches est possible ;

Le dessin de définition des produits (pièces) réalisé par le concepteur (définition dimensionnelle et géométrique stabilisée) constitue le point de départ (données d'entrée). Notre démarche consiste donc à définir la conception de MOR. Nous ne nous plaçons pas dans le cadre de l'ingénierie simultanée mais dans le cadre d'une conception de système technologique de fabrication (Figure I.2).

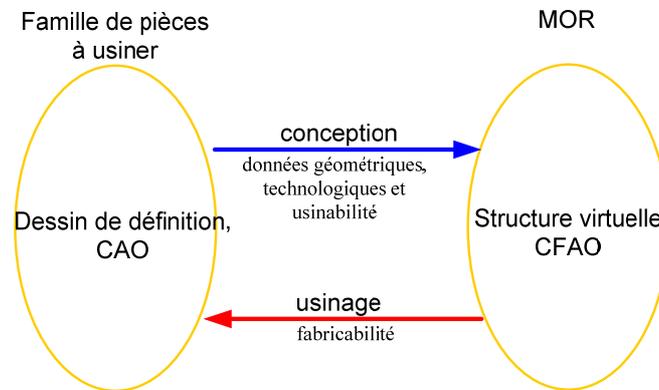


Figure I.2. Famille de pièces/MOR.

L'emploi de logiciels tels que de la CFAO usinage (e.g. CATIA), et d'ingénierie de processus (e.g. DELMIA) est envisageable pour aider à la définition des étapes d'industrialisation de procédés. La validation d'une telle MOR passe par les outils de simulation géométrique, temporel... sous CATIA et DELMIA. Ainsi, ce travail se positionne dans le cadre de la fabrication virtuelle ou encore appelée «*virtual manufacturing*».

I.2 Systèmes manufacturiers

I.2.1 Préambule

D'après Dano [Dano, 1966], la production se définit comme étant un ensemble successif de transformations en passant de l'état de matières premières à l'état de produits finis ; chacune de ces transformations correspond à des modifications physiques ou chimiques des matières traitées. Selon [Askin, 1993], «la production est le passage d'une conception à un produit fini». Cela concerne l'ensemble des types de systèmes de production allant de l'assemblage, du montage ou de l'usinage. Toutefois et en dépit des propriétés communes que peuvent avoir ces types de systèmes, les systèmes manufacturiers en usinage ont des caractéristiques qui leur sont propres. En effet, l'usinage tient une place importante dans l'industrie mondiale et particulièrement dans l'industrie européenne. Selon les statistiques de l'Union Européenne [Johansson, 2006], la fabrication des machines et équipements représente la troisième division manufacturière en Europe en termes de valeur ajoutée avec un chiffre d'affaire de 165 milliards d'euro représentant 10,8% de la valeur ajoutée totale de l'industrie manufacturière européenne. Ce rapport montre également que le marché des machines-outils représente plus de 14 milliards d'euros, soit 8,8% de la production des machines et équipements.

Au bilan, notre travail portera sur les systèmes manufacturiers dédié à l'usinage.

Selon [ElMaraghy, 2005], les systèmes de production peuvent se classer en tenant compte des aspects de productivité et flexibilité en :

- Systèmes Manufacturiers Dédiées (SMD) ;
- Systèmes Manufacturiers Flexibles (SMF) ;
- Système Manufacturiers Reconfigurables (SMR).

I.2.2 Système manufacturiers dédiés

Les Systèmes Manufacturiers Dédiés (SMD) (*Dedicated Machining System - DMS*) ou les Lignes Transfert Dédiées (LTD) ont été développés dans le secteur de l'automobile (production de masse) où la rationalisation de la fabrication répond à un objectif de productivité. Basée dans un premier temps sur la mécanisation puis l'automatisation des activités élémentaires (opérations d'usinage), chaque ligne dédiée est typiquement destinée à produire une pièce unique à un haut rythme de productivité où la simultanéité des opérations (usinages) et l'équilibrage des temps opératoires sont réalisés par des stations appartenant au même bâti de la machine. Chaque station de la ligne est spécialisée pour faire une opération d'usinage toujours identique et toujours au même endroit sur la pièce (perçage, fraisage, lamage...).

Ford est sans doute celui qui a révolutionné les systèmes manufacturiers en introduisant le principe du flux de produits passant par plusieurs stations. Un exemple qui illustre bien ce cas de figure, est le modèle de voiture T de Ford qui a été produit à plus de 15 millions d'exemplaires entre 1908 et 1927 [Hitomi, 1996]. En France, Pierre Bézier en tant que directeur des méthodes mécaniques à la RNUR (Renault SAS) développe avec son équipe les lignes transferts de l'usinage de composants du moteur de la 4 CV à partir de 1945.

En effet, bien que les investissements de tels systèmes soient importants, le volume de demande est élevé, le coût par pièce devient relativement faible et le retour sur investissement est rapide.

Les LTD_s possèdent de nombreux avantages, évoquons les plus importants :

- une très grande productivité : en effet, les volumes produits peuvent atteindre des millions de pièces, ceci réduisant le prix de revient [Finel, 2004] ;
- une grande précision dans l'usinage en raison de la fixation des outils et des pièces ;
- un besoin de moins de pièces de rechange lors des actions de maintenance car l'équipement est standardisé ;
- la qualité des produits et la stabilité de leurs caractéristiques sont sans doute une des spécificités les plus attrayantes de ce type de lignes. En effet, celles-ci ont un haut degré d'automatisme, ce qui minimise le risque de fabriquer des produits de mauvaise qualité [Belmokhtar, 2006] ;
- les lignes peuvent fonctionner 24h/Jour sur des périodes allant jusqu'à 30 ans avec des modifications tous les 7 ans environ [Belmokhtar, 2006].

Néanmoins depuis les années 1980, l'application des LMD_s présente des difficultés de plus en plus importantes face à l'accélération de rythme de l'évolution des productions en termes de variétés et en termes de la capacité. Mais il reste encore un grand nombre de constructeurs de LMD, comme PCI-Scemm ou encore COMAU pour l'automobile. Selon PCI-Scemm, les LMD présentent encore environ 40% de leur production globale (voir www.pci.fr).

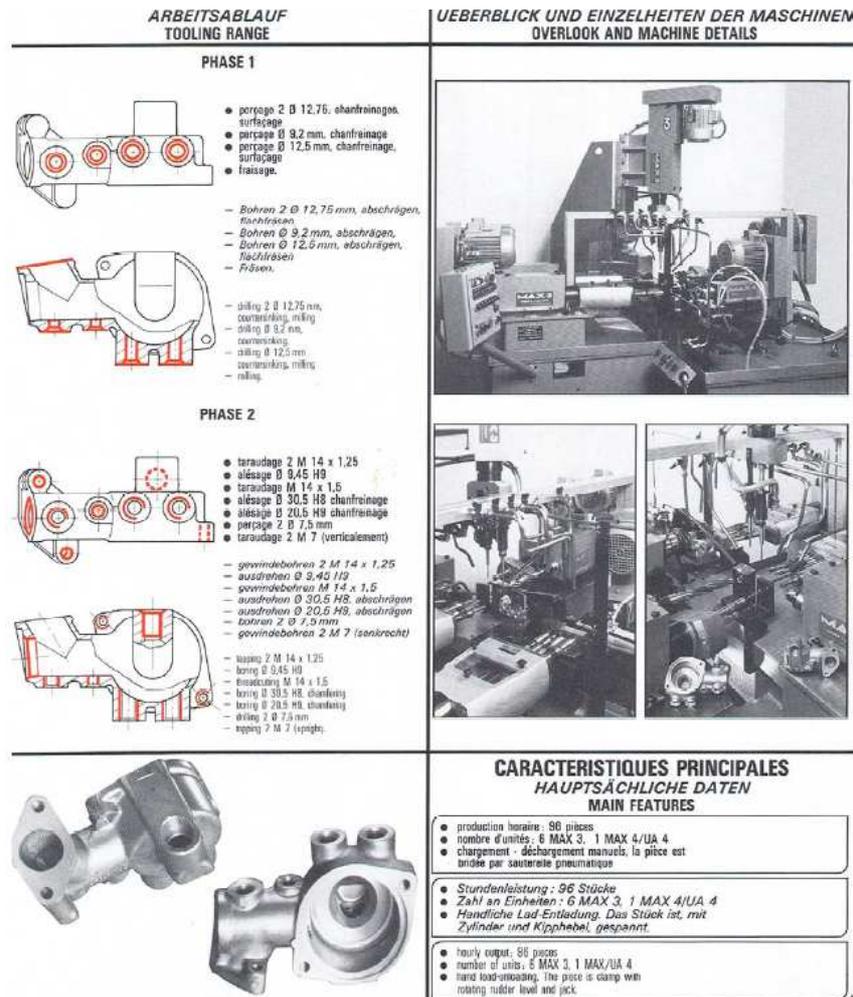


Figure I.3. Source SOMEX (www.somex.fr).

Pour conclure, les LMD sont rentables à condition que la demande en termes de variété soit fixe et correspondent à leur capacité. Mais avec l'augmentation de la pression de la concurrence mondiale et un grand nombre de marchés implantées aux variétés de capacité à construit dans le monde entier, les LMDs répondent de moins au moins aux exigences des clients et/ou aux nouvelles conditions du marché.

I.2.3 Système Manufacturiers Flexibles

Les Systèmes Manufacturiers Flexibles SMF (ou encore *Flexible Manufacturing Systems - FMS*) est une technologie qui vise à rendre flexible l'ensemble de l'outil de production permettant de préparer, de s'adapter aux divers changements de son environnement, sans qu'il y ait besoin d'engager de nouveaux investissements en biens d'équipement, ou d'engendrer de longues pertes de temps. Sa finalité est de réaliser une multitude d'opérations hétérogènes à partir d'un nombre très limité de ressources. Le besoin d'accélération des flux dans les processus, et l'automatisation des tâches complexes et à forte valeur ajoutée sont à la base de leur développement.

Ces systèmes flexibles sont de niveaux d'intégration diverses comme :

- les Modules de Fabrication Flexible constitués d'une ou plusieurs machines à commande numérique opérant de façon isolée ;
- les Cellules de Fabrication Flexible constituées de plusieurs machines à commande numérique opérant de façon consécutive et reliées par un système automatique de transport (AGV, Automated Guided Véhicule) ;
- les Groupes de Fabrication Flexible regroupant plusieurs cellules flexibles ;
- les Système de Fabrication Flexible par une automatisation de toute la fonction production ;
- les Ligne de Fabrication Flexible par une automatisation globale de la chaîne de fabrication.

Dans les années 80, ces systèmes de production se déploient en particulier dans les secteurs de la fabrication des composants de véhicules (Snecma Le Creusot- Citroën Meudon, automobiles et camions RVI/Bouthéon) concomitamment au développement de l'automatisation. Ils cherchent à répondre à l'évolution des systèmes de production lesquels doivent répondre impérativement à une nouvelle contrainte la flexibilité (variabilité morpho-dimensionnelle et réduction de lots). Les SMF_s sont constitués de machines outils (transformation ou contrôle de pièces mécaniques), des moyens de manutention (transport ou transfert de poste à poste) le tout contrôler par un système de « contrôle commande » réparti ou hiérarchisé.

Dans les années 1990/2000, de nombreux Laboratoires en France (comme le LURPA de Cachan, CRAN de Nancy, LAB de Besançon, LAMIH de Valenciennes... entres autres) ont contribué à développer les travaux de recherche en la matière qui ont essentiellement porté sur la conception du système de contrôle/commande des systèmes flexibles de production manufacturière.

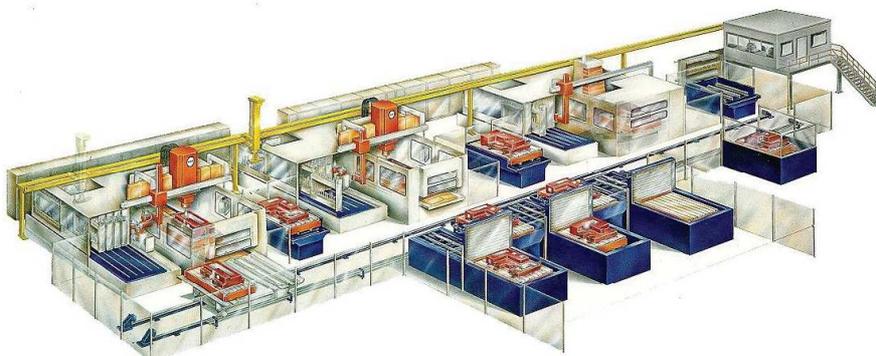


Figure I.4. Exemple atelier flexible – cellule X-Cell-O.

Les SMF_s ont été spécialement développés pour répondre à la fois aux contraintes de productivité et de flexibilité. Malheureusement, ils présentent un certain nombre d'inconvénients :

- ils réalisent globalement des opérations d'usinage de manière séquentielle. Cette façon fait face avec conditions *a priori contradictoires* de productivité et de réactivité ;
- l'investissement et les charges financières de ces équipements (hardwares, softwares) sont globalement très importantes ;

- les systèmes de contrôle commande de type standards (CNC et NC) sont associés à un développement des systèmes de communication (réseaux locaux industriels) pour le pilotage, la surveillance et la supervision ;
- leurs capacités de production sont souvent très inférieures aux objectifs visés.

Selon [Mehrabi et al, 2002], les entreprises industrielles mettant en place des SMF_s constatent le plus souvent que le niveau de flexibilité n'est pas conforme aux objectifs visés. Environ deux tiers des entreprises déclarent que les SMF ne sont pas utilisés à leur entière capacité. 75% des entreprises ont exprimé le besoin d'acquérir un système moins coûteux. De plus, la productivité des SMF est largement inférieure aux SMD_s avec des coûts d'investissement initiaux et de fonctionnement plus importants. La comparaison entre les deux systèmes (SMF, LTD) est montrée dans le Tableau I.1.

	SMF	LTD
Points forts	flexible	coût réduit
	production variable	productivité élevée
	tâche générale	usinage multi-outils
Points faibles	productivité faible	non flexible
	usinage séquentiel	tâche unique
	coût élevé	capacité fixe
	flexibilité superflue	

Tableau I.1. Comparaison entre SMF et LMD.

Quelques soient les LMD_s et les SMF_s, la réponse aux exigences de nouvelles conditions de marché (variétés et évolution des produits) nous impose de réfléchir à de nouveaux concepts de systèmes manufacturiers.

I.2.4 Système Manufacturier Reconfigurable

I.2.4.1 Introduction

Koren [Koren et al, 1999] expose le nouveau paradigme les Systèmes Manufacturiers Reconfigurable (SMR), permettant de répondre à la fois aux contraintes contradictoires de productivité (SMD) et la flexibilité (SMF). Les grandes directions sont de :

- concevoir un système et ses machines de manière changeable permettant d'assurer une réponse aux nouvelles contraintes du marché en termes de volume et en variété de pièces à usiner. Le concept de structure modifiable peut être réalisé au niveau de système de production (par exemple en ajoutant des machines) et/ou au niveau des machines-outils (en introduisant des dispositifs modifiables par exemple en ajoutant des axes et/ou des broches) ;
- concevoir un système de fabrication autour d'une famille de pièces, avec une flexibilité et une productivité correspondantes aux besoins du client (ceci réduit le coût de système).

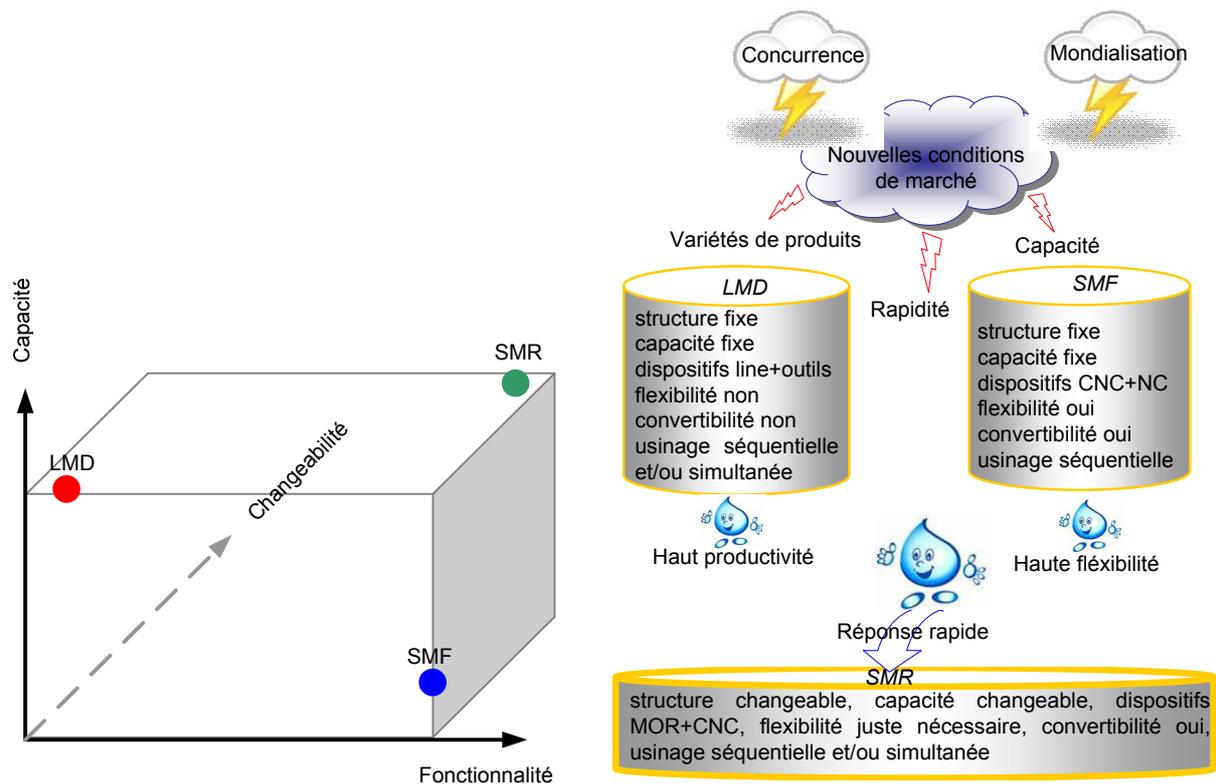


Figure I.5. Comparaisons des systèmes manufacturiers LMD, SMF et SMR.

La Figure I.5 positionne les SMR au travers des critères de fonctionnalité (intégration de mécanismes supplémentaires), de capacité (évolution de la quantité et la cadence) et de « changeabilité » (changement de structure).

Le concept de SMR a pour but de remplacer les SMFs. [Rogers et Bottaci, 1997], [Kusiak et Larson, 1995], [kusiak et Huang, 1996] et [Lee, 1997] proposent une méthodologie de conception concernant les éléments modulaires constituant les machines outils ou les systèmes de fabrication, Ensuite, le concept de reconfiguration développé dans les domaines du montage, d'assemblage et de robot [Hollis et Quaid, 1995]. Les chercheurs de l'université de Carnegie Mellon ont développé le concept de RMMS (Reconfigurable Modular Manipulator System). Ils ont développé une méthodologie destiné à la conception de manipulateurs reconfigurables à partir de contraintes cinématiques (compliance et travail synchrone de robot) liées à la tâche à réaliser [Paredis et Khosla, 1993, 1994] [Paredis, 1996].

[Van Brussel, 1998] est un des premiers a travaillé sur les mécanismes contribuant à la conception et au développement de systèmes manufacturiers adaptatifs et coopératifs. Ces travaux sont menés dans le cadre du groupement d'industriels et de chercheurs internationaux dénommé « IMS – Intelligent Manufacturing System ». Les résultats de ces travaux ont été transférés pour assurer le développement de la reconfigurabilité des systèmes de fabrication qui portent essentiellement sur le contrôle commande de structure de commande numérique dite ouverte [Pritschow et Junghans, 1993] [Pritschow et al, 2003].

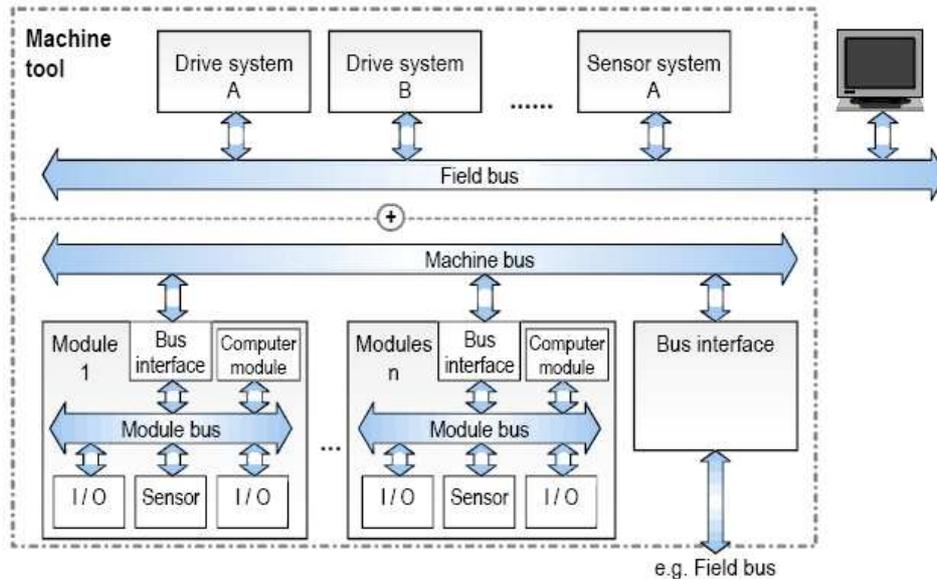


Figure I.6. Structure de communication d'une machine reconfigurable [Pritschow, 1993, 2003].

I.2.4.2 Définition et caractéristiques de SMR

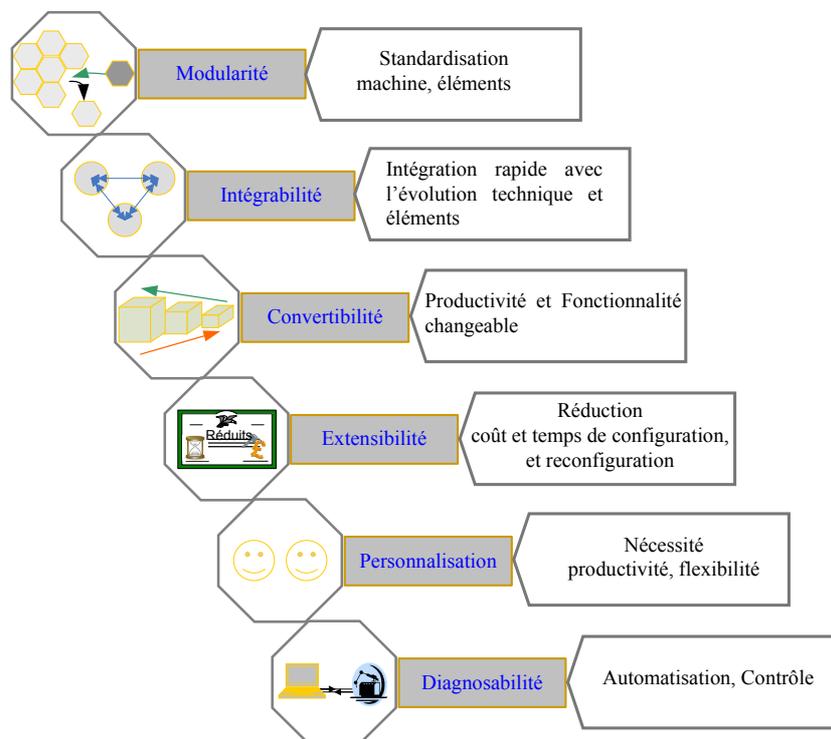


Figure I.7. Caractéristiques clés de MOR.

Selon [Koren et al, 1999], un SMR est conçu pour assurer un changement rapide de l'ensemble de la structure du système de fabrication aussi bien les composants logiciels que

les équipements en vue de s'adapter rapidement à la capacité de production et aux spécifications de l'ensemble des familles de pièces à produire en réponse aux changements imprévus ou/et à contrôler les obligations du marché.

Le SMR se doit d'être conçu en intégrant le concept de reconfigurabilité. A ce jour, les concepts de reconfigurabilité sont établis par un ensemble de 6 principes (Figure I.7) définis comme suit :

- la « modularité » consiste en une conception de tous les composants du système, logiciel et matériels, de façon qu'ils soient modulaires [Koren et al, 1999]; il existe différents niveaux de modularité : système, machines et composants. Le type de modules de base définit la granularité du système. Soit, un module d'usinage est l'ensemble d'axes, de broches et généralement d'actionneurs solutions (pour la partie déplacement outil) de la fonction représentée par un module fonctionnel ;
- l'« intégrabilité » comme l'aptitude à intégrer rapidement et de façon précise les modules constitutifs du système par un ensemble d'interfaces mécaniques, de connectiques pour la gestion et commande des informations permettant l'intégration et assurant la communication [Koren et Ulsoy, 2002] ;
- La « convertibilité » comme l'aptitude à transformer la fonctionnalité du système, des machines et de la commande existant afin de s'adapter aux nouveaux besoins de production [koren et Ulsoy, 2002] ;
- L'« extensibilité » comme l'aptitude à ajuster la capacité de production du système en le reconfigurant au coût minimal, en un minimum de temps et pour une large gamme de capacités [Spicer et al, 2002] ;
- La « personnalisation » comme l'aptitude à adapter une flexibilité personnalisée (juste nécessaire au bon moment) du système et des machines pour répondre à de nouvelles spécifications d'une famille de produits [Koren et Ulsoy, 2002]. Lors de la conception des SMR, cette caractéristique est prise en compte dans le fait qu'un SMR est conçu autour d'un ensemble de pièces initialement données ;
- La « diagnosabilité » comme l'aptitude à lire automatiquement l'état courant du système et de la commande afin de détecter ainsi que de diagnostiquer les sources de défaillances en vue de les corriger rapidement [Koren et Ulsoy, 2002]. Cette caractéristique concerne essentiellement la partie contrôle commande des SMR.

La plupart des travaux de recherche concernant la reconfiguration porte essentiellement sur les aspects logiciels (commande, pilotage, surveillance, supervision...). En effet, ces travaux ont bénéficié des avancées technologiques et conceptuelles développées dans les domaines du génie automatique et de la productique. Par contre, pas ou peu de travaux concerne la configurabilité physique des équipements. De manière générale, la partie opérative des SMRs est caractérisée par des intégrations de machines de production (machines-outils, robots de transport et de mesure...) dans une ligne de fabrication. La configurabilité de SMR est alors une addition de flexibilité intrinsèque des équipements avec une perte minimale de productivité. A ce jour, il existe aucun SMR disponible à destination des industriels. Néanmoins, les entreprises concevant des machines spéciales ou de systèmes de production intègrent les 6 principes précédents. Aucune méthodologie structurée n'existe mais seul un canevas proposé par [Heisel et Meitzner, 2003] présente les étapes principales de conception comme suit :

- Définition des besoins de reconfigurabilité ;
 - Analyse des tendances d'évolution lors du développement du produit ;

- Définition du nombre de variantes à fabriquer ;
- Définition de la variabilité de la production ;
- Analyse et définition des limites de l'ampleur de la reconfigurabilité.
- Identification du meilleur domaine de fonctionnement ;
- Identification et respects des contraintes ;
 - De temps (cadence, temps de reconfiguration...) ;
 - De coûts (investissement, de fonctionnement...).
- Quantification des caractères (mesurables) de la reconfigurabilité ;
- Identification des limites et des performances du SMR ;
- Détermination des puissances et de capacité des équipements modulaires ;
- Tests concernant la disponibilité et la maintenance du SMR ;
- Définition des caractéristiques des modules (transformation, contrôle, transport...) ;
 - Propriétés des modules types ;
 - Etat passif / actif ;
 - Mouvement avec les caractéristiques de travail.
 - Contrôle-commande ;
 - Conception des interfaces ;
 - Propriétés des éléments mécaniques ;
 - Géométries et dimensions ;
 - Raideur et amortissement ;
 - Fonctions auxiliaires ;
 - Information et système périphériques.
 - Éléments électriques.

I.3 Machine-Outil Reconfigurable

I.3.1 Introduction

Les SMR sont constitués d'ensembles qui répondent aux activités de transformation (usinage, assemblage...), de transport (robot). Lors de la conception de ces ensembles, il convient d'intégrer le concept de reconfigurabilité. [Abele, 2006] propose de définir le concept de Machine-Outil Reconfigurable (MOR) comme un équipement assurant la transformation (en particulier l'usinage) de manière autonome en respectant les contraintes de flexibilité et de productivité.

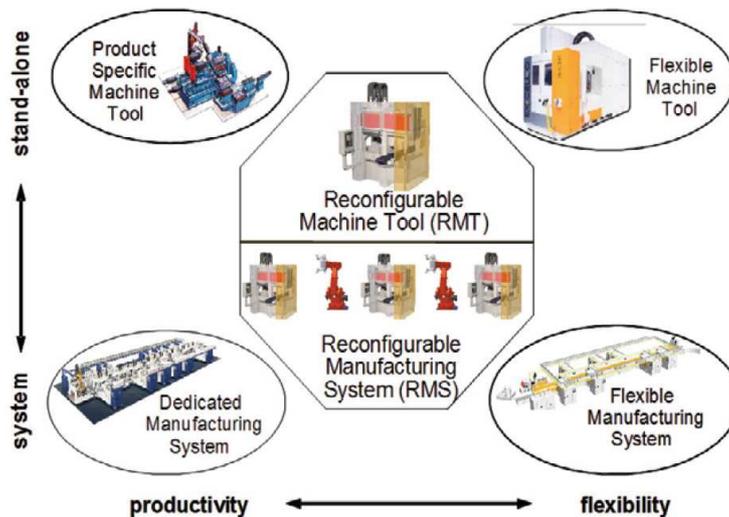


Figure I.8. Classification des systèmes de fabrication [Abele et al, 2006].

I.3.2 SHIVA, machine-outil multibroche

SHIVA est la première tentative de MOR initié par Garro et Martin [Garro, 1992], [Garro et Martin, 1993]. Ces travaux présentent une méthodologie de conception de la partie opérative de machines-outils en ayant intégré un niveau de reconfigurabilité de manière implicite. Les auteurs fondent leur travail sur le concept d'entité de fabrication définie quelques années plus tard dans l'ouvrage collectif sous la direction de Tollenaere [Tollenaere, 1998] en respectant les contraintes concomitantes de productivité et de flexibilité.

Ces travaux se positionnent au niveau de la conception d'éléments physiques de systèmes de fabrication de produit. Dans ce cadre, ils ont proposé une méthode de conception applicable aux machines outils, basée sur des concepts de modularité afin de parvenir à une réelle intégration de la partie commande. Sa méthode peut se décomposer en trois phases :

- l'analyse correspondant à la détermination du besoin et à son expression ;
- la spécification concernant la description des différentes fonctions mises en jeu ;
- la conception proprement dite consistant à traduire les différentes fonctions en composants physiques.

La synthèse structurale de SHIVA est constituée d'un grand nombre de broches qui réalisent des opérations d'usinage sur une pièce fixe. Les broches travaillent de manière séquentielle ou simultanée. La démarche de spécification permet, à partir d'un cahier de charges décrit en termes d'entités d'usinage, de rechercher des solutions d'architectures fonctionnelles de machine outils. Garro [Garro, 1992] a proposé un formalisme mathématique basé sur la logique temporelle dans l'objectif de traduire les concepts de simultanéité et/ou de séquentialité des opérations d'usinage.

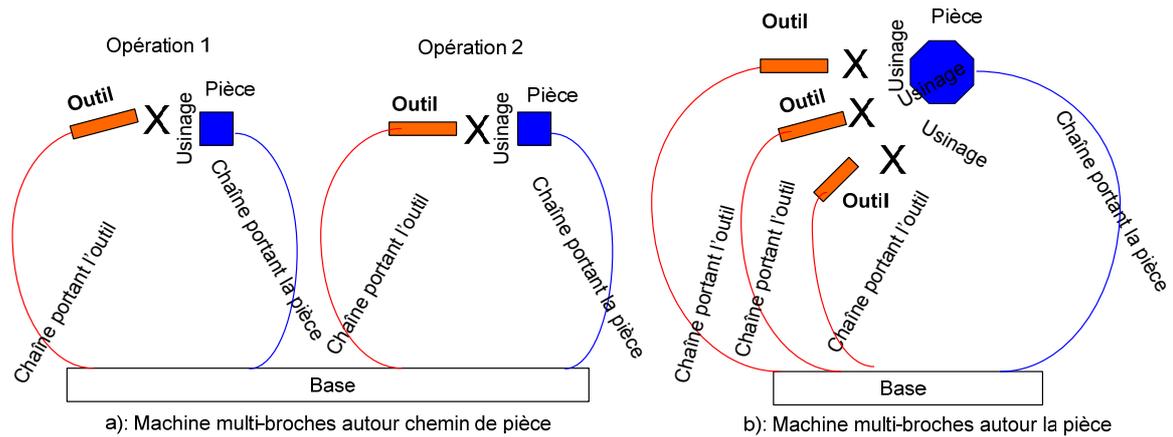


Figure I.9. Architecture de machines multibroches [Garro, 1992].

D'autre part, Garro [Garro, 1992] a utilisé le concept de broches-multiples pouvant réaliser plusieurs opérations en même temps mais le traitement de l'emploi de broches simultanément et la prise en compte de la problématique de mise et maintien en position des pièces n'ont pas été traitées.

Les travaux de [Patriiti, 1998] permettent de répondre partiellement aux problématiques précédentes. La méthodologie est basée sur un modèle de gamme distribuée et sur l'analyse du système physique à piloter. La formalisation proposée permet d'évaluer l'influence du système de pilotage sur la robustesse et la fiabilité du système de fabrication. Ces critères sont autant de paramètres qui peuvent aider le concepteur dans ses décisions. Enfin pour passer de la spécification à la réalisation, une modélisation du comportement des agents est proposée. Les méthodes développées et les expérimentations ont été implantées pour la machine-outil à structure parallèle Shiva.

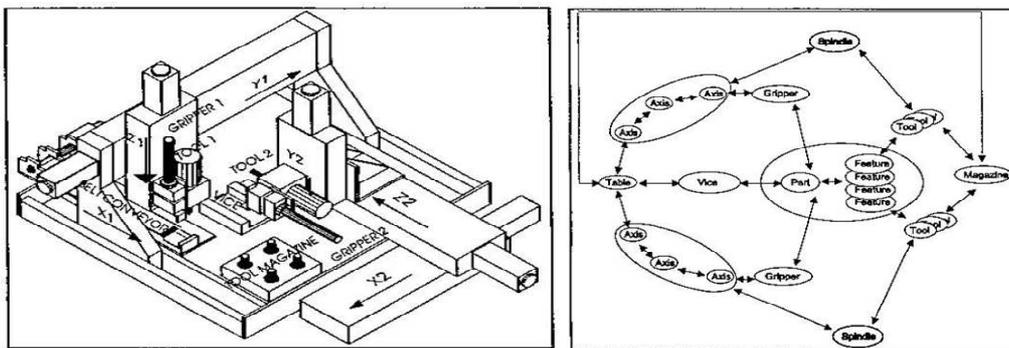


Figure I.10. Shiva – méthode.

I.3.3 Université du Michigan, Arch-Type RMT

En 1996, à l'Université du Michigan sous la responsabilité du Pr. Koren, est créé le Laboratoire ERC/RmS (Engineering Research Centre of Reconfigurable Machining Systems). Dans ce centre, Koren et son équipe proposent, développent et conçoivent une MOR. Dans le

compte rendu annuel de l'assemblée du CIRP, [Koren et al, 1999] évoque l'évolution des systèmes manufacturiers et l'évolution de SMF et SMD en SMR.



Figure I.11. Exemples de machine reconfigurable de mesure et d'usinage de culasses.

Cette équipe travaille essentiellement pour le secteur automobile où elle développe des systèmes reconfigurables destinés à l'usinage et au contrôle de culasse.

Moon dans son travail 2000 [Moon, 2000] propose une méthode de conception de MOR. Il a traité la génération de MOR à broche unique et multiple. Les informations d'entrée nécessaires sont classiquement le type de matériaux, les géométries et les tolérances des pièces constituant la famille de produits ainsi que les conditions de production (cadence, cycles...).

La spécificité de son travail réside pour la formalisation des mouvements de la représentation par vecteur dual pour la modélisation géométrique et cinématique de corps rigides en déplacements finis. Il propose une représentation par symboles graphiques des connections (interfaces) en vue de définir les différentes solutions d'architectures. La reconfigurabilité est traduite par des équipements modulaires dont les paramètres sont :

- l'identifiant du module ;
- disponibilité ;
- les types d'interfaces (mécanique, électrique, hydraulique, pneumatique...) ;
- encombrement et emplacement à l'aide de vecteurs duals;
- les transformations géométriques (les mouvements actifs et passifs, les courses mini et maxi...) à l'aide de vecteurs duals (e.g. $[x \ y \ z](0+\varepsilon_i)\{0 \ 0 \ 0\}^T + \varepsilon\{0 \ 0 \ 0\}^T$)

Enfin, il a développé des outils permettant de définir concevoir et valider une Machine-Outil Reconfigurable (MOR).Le projet [Moon et Kota, 2002] se décompose en :

- Définition géométrique des modules ;
- Evaluation de la précision de la machine-outil ;
- Modélisation du comportement dynamique des modules sous ADAMS ;
- Développement de nouveaux modules pour le MOR ;
 - Axe de type Arch.

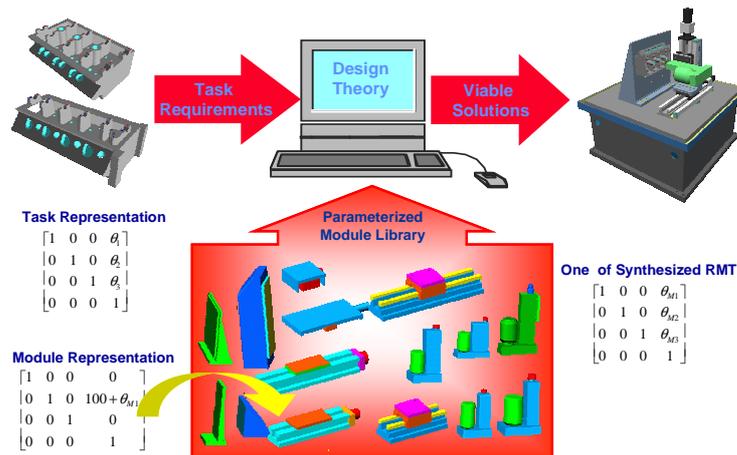


Figure I.12. Démarche de conception de Machine Outil Reconfigurable.

A ce jour, ce laboratoire est sponsorisé par le Nationale Science Fondation (NSF) et par de nombreuses entreprises automobiles. Les activités de recherche se décomposent en actions scientifiques de :

- développement d'outils, modèles, méthodologies économiques pour la conception rentable de système de fabrication (logiciels PAMS – Performance Analysis and Manufacturing Systems et SHARE – Systems Handling Allocation of REsources¹) ;
- développement de solutions, des stratégies et de bonnes pratiques concernant les informations et le contrôle des systèmes manufacturiers. Le cadre de ces activités porte sur les domaines du contrôle commande, de la surveillance, du diagnostic et de la sûreté mélangeant les logiciels (virtuel) et une plateforme (réel) ;
- développement de machines de contrôle reconfigurables intégrant la technologie de mesure par capteur sans contact destinées à assurer une inspection à 100% des pièces usinées.

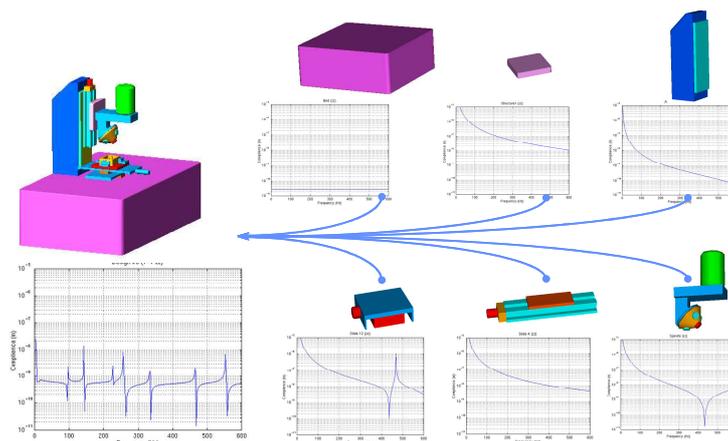


Figure I.13. Logiciel PRIMADE permettant de déterminer le comportement dynamique de chaque module de la MOR [Moon et Kota, 2002].

¹ <http://erc.engin.umich.edu/research/softwarenew.html> (consulté en 2009)

I.3.4 METEOR 2010

Sponsorisé par le ministère allemand de la recherche, le projet « METEOR 2010 » consiste à standardiser les composants des Machines Outils Reconfigurables qui interviennent lors de la constitution dans une machine outil multi techniques. Ce projet est sous la responsabilité du laboratoire « Institute of Production Management, Technology and Machine Tools (PTW) de l'Université de Technologie de Darmstadt et des industriels allemands (Ex-Cell-O, Schuster, MAPAL, Blüm, Rhöm...) [METEOR, web]. Ce travail apporte des réponses sur les principes de modularité, d'intégrabilité, convertibilité et extensibilité pour les machines-outils reconfigurables

Le projet consiste à développer le principe de reconfigurabilité par la modularité et l'adaptabilité des modules de machine outils dédiées à l'usinage. Les modules de cette Machine-Outil Reconfigurable doivent respecter (i) un coût minimum dû à un aménagement ou une transformation de la machine pour une nouvelle utilisation, (ii) une réduction des temps d'indisponibilité (pannes, dégradation, mise en course...) due à la maintenance par un remplacement à l'identique des modules fonctionnels et (iii) une capacité de réaliser des opérations de tournage, fraisage, de perçage..., de rectification, d'ébavurage voire de traitements de surface (durcissement par laser) en intégrant les opérations de positionnement et de maintien, de mesure des pièces (balançage et inspection) voire de lavage.

L'intégration de ces multiples fonctions introduit un potentiel de collisions ce qui impose des arrangements et des permutations des modules de l'espace de tâche. La virtualisation (modélisation et simulation) de cet espace est une obligation.

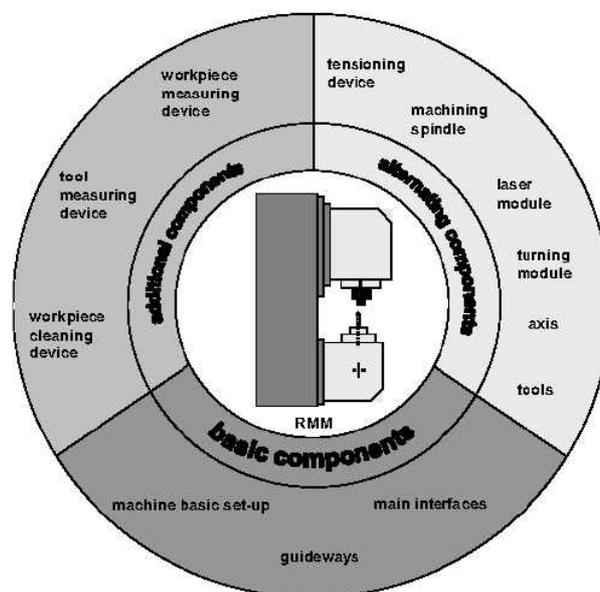


Figure I.14. Modules de la machine outil reconfigurable.

La standardisation des interfaces (mécanique, électrique, hydraulique, pneumatique...) est un enjeu majeur de ce type de machine. Les solutions de principe à cette problématique ne doivent pas être seulement laissées aux ingénieurs et techniciens. La compréhension des phénomènes mécaniques aux interfaces des composants comme l'exactitude de mise en position, le maintien des composants (comportement statique), le comportement dynamique

(raideur et amortissement...) est indispensable pour maîtriser la qualité géométrique de la machine et a fortiori de la pièce.

I.3.5 Modélisation des machines-outils

Les aspects de reconfigurabilité sont abordés sous plusieurs angles et avec une ampleur variable selon les concepteurs de machine-outil comme modularité, l'intégrabilité, la convertibilité et personnalisation.

La stratégie des sociétés comme INDEX (<http://www.index-werke.de>, consulté en décembre 2008) représente ces tendances sous le vocable machine-outil multifonctionnelle [Moriwaki, 2008]. Les gammes de machines-outils G400 ou V300 bénéficient de ces avancées de modularité en conception de composants standards, d'intégration des techniques (tournage, fraisage, rectification...), de personnalisation en s'adaptant aux besoins du client.

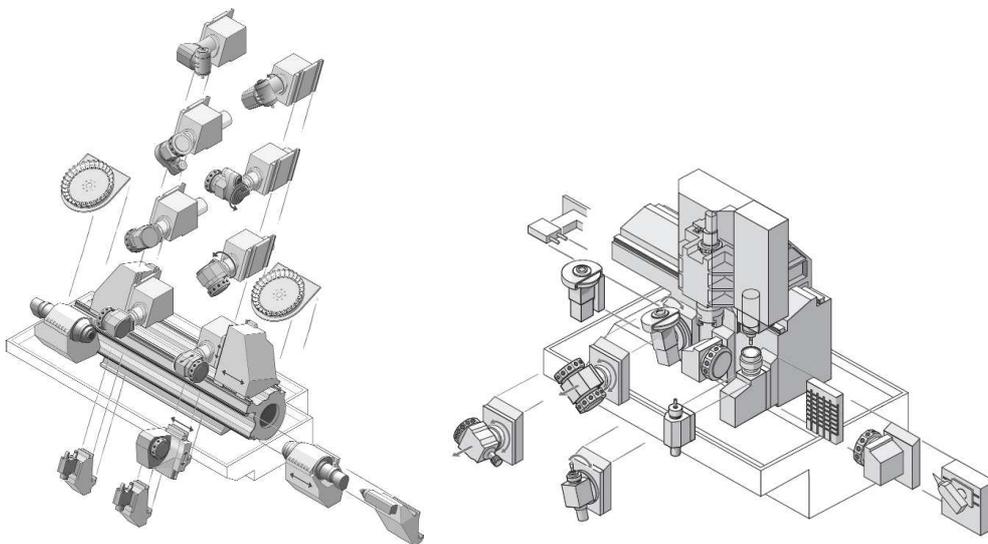


Figure I.15. Exemple d'intégrabilité, convertibilité, extensibilité concernant les produits de la société INDEX.

Quant à la convertibilité, l'ajout de fonctions d'environnement (mesure des outils, de pièces, de changeur d'outils...) contribuent à répondre à ce principe.

Les contraintes des machines-outils classiques sont les mêmes que les machines-outils reconfigurables. En effet, la description du cahier des charges d'une machine-outil classique se présente comme :

- Définition technologique de la machine-outil ;
 - Taille, géométrie des entités et de la pièce à usiner (dimensions de l'espace de travail, techniques d'usinage) ;
 - Capacité d'enlèvement de la matière (ébauche, finition en fonction des matériaux, définition du niveau de productivité) ;
 - Précision de la machine outils (répatabilité, exactitude, réduction des sources d'erreurs...) ;
 - Comportement cinématique (vitesse et accélération en travail et rapide ...) ;

- La taille du lot, la cadence (niveau d'automatisation) ;
- Le prix (analyse des coûts, investissements...).
- Sélection du nombre d'axes asservis en position et en vitesse ;
- Définition des mouvements principaux et secondaires (moteurs, rotation pièce ou outil) ;
- Définition de la structure ;
 - Configuration (banc, table, colonne fixes ou mobiles) ;
 - Structure des composants (acier, fontes, composites...) ;
 - Guidages (contact roulant ou frottant, hydrostatique...).
- Définition des systèmes de transformation de mouvement (vis à billes) ;
- Type et implantation du système de contrôle-commande ;
 - Axes (nombre, interpolation complexe) ;
 - Réglage de la commande (paramètres machines, courses...) ;
 - Interface « homme/machine » (personnalisation, mesure de paramètres spécifiques...).
- Définition des asservissements ;
 - Dispositif de mesures (capteurs de position, de déplacement, de température...) ;
 - Dispositif de contrôle (paramètres de commande).
- Automatisation ;
 - Communication (réseau locaux industriels) ;
 - Automatisation et programmation (PLC, sureté, sécurité).
- Environnement de production ;
 - Inspection et vérification pièces ;
 - Mesure des outils...

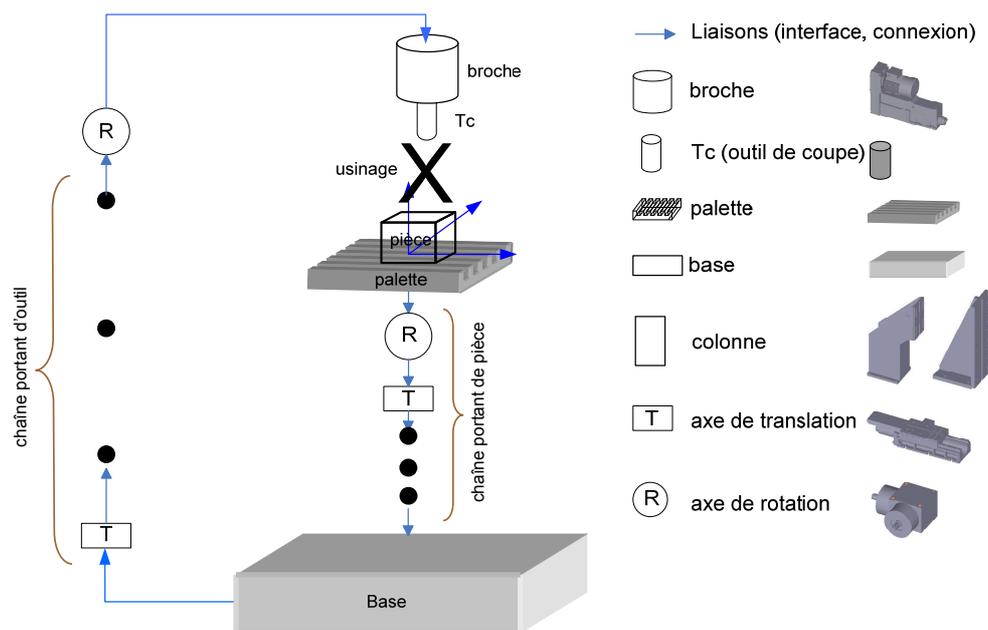


Figure I.16. Architecture d'une machine simple.

La modélisation mécanique a également été développée et s'intéresse au comportement dynamique des broches destinées à l'usinage grande vitesse [Gagnol, 2007] [Cao, 2007], ou sur les guidages linéaires [Al-Bender, 2005].

Par ailleurs, de nombreux travaux portent sur la modélisation géométrique et cinématique (parfaite et/ou perturbée) des machines outils [Chen, 2000], [Tutunea-Fatan et Feng, 2004], [Bohez, 2002]. La spécificité de ces travaux réside principalement sur les notions de configurations des machines-outils de 3 à 5 axes comportant une broche unique. Ces démarches font appel à la représentation formelle principalement au travers des outils mathématiques utilisant les principes de transformations en coordonnées homogènes.

I.3.6 Bilan

Les travaux concernant les systèmes de fabrication sont légions avec deux grands axes développant en (i) les concepts d'ordonnancement et (ii) l'intégration des données du marché en termes d'organisation, les processus (contrôle-commande). Ces travaux sont définis dans le cadre d'une structure internationale : l'IMS (<http://www.ims.org/>, site consulté en 2008). Au sein de la communauté du CIRP (Collège International pour la Recherche en Productique, International Academy for Production Engineering), le projet SPECIE (Scientific Technical Committees – Production Systems and Organisation) reste dans les mêmes approches que l'IMS. Il faut attendre les conférences du CIRP « Agile, Reconfigurable Manufacturing » (2001, 2003 et 2005) pour voir émerger de nouveaux concepts comme le SMR ou les MOR.

Garro [Garro, 1992] est un des premiers à penser à la reconfigurabilité dans le système de fabrication en introduisant la modularité. [Koren et Ulsoy, 2002] pose les principes et engage des travaux dans le cadre des SMR et MOR. Les projets de recherche allemands sont directement utilisés par les industriels du secteur de la machine outil en proposant des machines dites multifonctionnelles (e.g. INDEX)

Les tendances actuelles vont vers l'opérationnalisation des principes de reconfigurabilité (modularité, intégrabilité, convertibilité, extensibilité, personnalisation, diagnosticabilité).

La modularité et l'intégrabilité sont généralement obtenues par construction et les solutions portent essentiellement sur la prédéfinition d'un axe (translation, rotation) où les interfaces de chaque module sont déterminées par des liaisons d'encastrement démontables avec le bâti.

L'approche fonctionnelle permet de répondre sous forme de cahier des charges. Les systèmes technologiques dits de « point zéro » développés par les fabricants de montages d'usinage contribuent à la gestion des interfaces selon un point de vue mécanique. Mais peu d'approches méthodologiques sont proposées.

L'intégrabilité dans les domaines électriques, hydrauliques, pneumatiques (média et données) est peu développée, les solutions sont supportées par l'expérience dans ces domaines.

Les solutions concernant la convertibilité s'expriment par de nombreux travaux dans le domaine du contrôle-commande permettant l'adaptation aux nouvelles productions [Pritschow et al, 2003] du fait des systèmes de commande numérique à architecture ouverte et technologies sans fil par exemples.

Les solutions à l'extensibilité sont développées permettant le changement ou la mise en position rapide pour les broches et montages d'usinage (Point Zéro). Le laboratoire PTW de Darmstadt responsable du projet METEOR 2010 propose des solutions constructives dans ce sens.

Les différents travaux en sûreté, fiabilité de fonctionnement sont transférables pour répondre au principe de diagnosabilité en évaluant les niveaux de productivité [Freiheit, 2003].

Au bilan, la conception des Systèmes Manufacturiers ou des Machines-outils reconfigurables est un support industriel où s'exprime divers domaines scientifiques (de la mécanique à l'automatique, en passant par les problématiques d'organisation...). Au travers de la littérature, nous avons observé que les méthodologies sont peu ou prou développées.

De ce constat, nous proposons donc de définir une méthodologie permettant la conception de l'architecture et de la structure d'une MOR.

I.4 Méthodologie de conception de MOR

I.4.1 Cahier des charges

Notre méthodologie de conception de MOR s'appuie sur le concept d'entité de fabrication déjà fort utilisé en génération de la gamme de fabrication. Nous présentons les activités permettant de passer des entités d'usinage à la structure réelle de la MOR. Elle conduit au choix de la configuration de la machine-outil et son niveau de la reconfigurabilité.

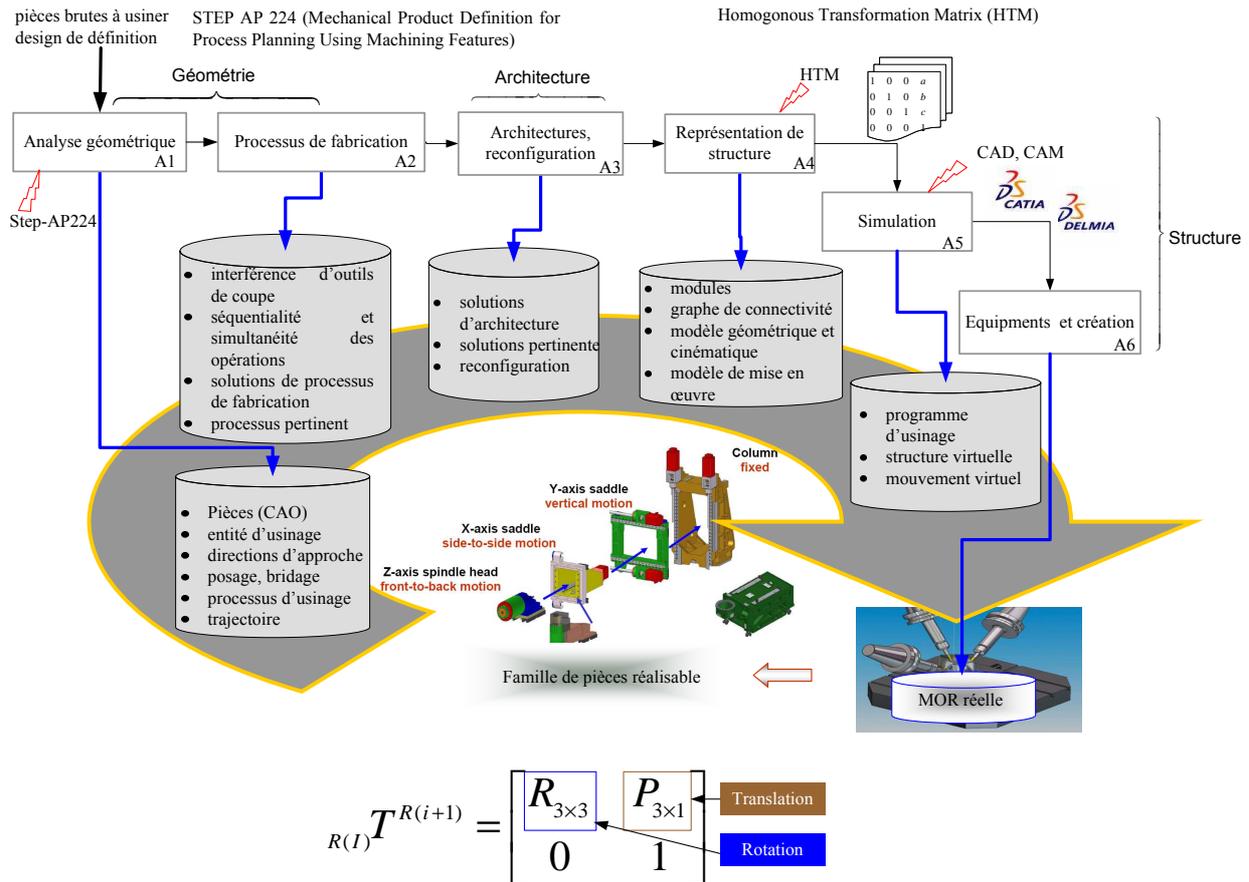
Cette méthodologie s'appuie systématiquement sur trois catégories de problématiques :

- La première est géométrique, requise à la spécification des connaissances associées à la famille de pièces et nécessaires à la génération de MOR. Cette problématique repose sur les questions suivantes :
 - 1 Quelle tâche doit être effectuée par la MOR ?
 - 2 Quels sont les processus de fabrication possibles ?
- La deuxième problématique est architecturale, elle conduit à la définition des solutions d'architecture de MOR répondant réellement à la réalisation de tâche d'usinage. Ce problème nous amène à répondre aux questions suivantes :
 - 3 Combien de broches convient-il d'installer ?
 - 4 Quelles opérations exécutées par chaque broche ?
 - 5 Quel ordonnancement pour chaque broche ?
 - 6 Dans quel ordre activer les broches installées sur MOR (si le mode d'activation est séquentiel ou simultané ou mixte) ?
 - 7 Combien d'axes sont requis pour chaque broche (mouvements requis) ?

Les réponses à ces questions déterminent non seulement l'architecture de MOR, mais aussi la productivité et les charges financières.

- La troisième problématique est structurale, conduit à la création physique de MOR.

Notre méthodologie s'articulant autour de 6 points clés (Figure I.17) répond systématiquement aux problèmes présentés ci-dessus :



$${}_{R(I)}T^{R(i+1)} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Translation
Rotation

Figure I.17. Notre méthodologie de conception de la MOR.

- Géométrie
 - A₁ l'analyse géométrique de famille de pièces à usiner : elle correspond aux activités de passage de la géométrie de la pièce à usiner (P) aux entités d'usinage (E_i) par un traitement analytique qui fait appel aux paramètres géométriques intervenants sur la description fonctionnelle de tâches de MOR, à l'aspect d'usinabilité et à l'aspect cinématique qui s'appuient sur la génération de MOR en manière d'opération nécessaire à l'exécution des entités ;
 - A₂ processus de fabrication : correspond aux activités de spécifications des processus de fabrication répondant à la réalisation de tâche d'usinage de la MOR.
- Architecture
 - A₃ architecture, configuration : activités de création des solutions architecturales de MOR qui est constituée par la définition de deux architectures. La première géométrique s'appuie sur la définition du nombre et des orientations des broches, la deuxième cinématique permet la réalisation de l'entité d'usinage (mouvements requis aux broches, programme d'usinage), la configuration actuelle et la reconfiguration future.
- Structure
 - A₄ structure de MOR : activité de représentation de modèle structural articulé, graphe de connectivité, assemblage, modèle direct, inverse et modèle global pour la mise en œuvre de MOR ;

- A₅ simulation: activités virtuelles (structure, programmes, mouvements) ;
- A₆ structure réelle : activité de choix des composants physiques.

Les actions A₁ et A₂ constituent des réponses aux questions 1 et 2 (sont traitées en chapitre II et III), A₃ répond aux questions de 3, 4, 5, 6 et 7 (chapitre IV) et A₄, A₅ et A₆ font l'objet du chapitre V.

I.4.2 Informations préalables

Un exemple d'application commun à l'ensemble des chapitres est proposé afin d'illustrer et de valider les concepts, les choix de solutions ou démarches de l'application. Cet exemple est un produit industriel : un carter et son couvercle appartenant au dispositif de pompe à huile de camion de Moteur SCANIA (illustré à la Figure I.18). Les demandes présentes de cette famille de pièce P_A (couvercle) et P_B (carter) sont produites à raison de 30 et 25 unités par heure respectivement (l'usine fonctionne 8 heures par jour, 5 jours par semaine et 50 semaines par an). Les demandes évolueront à 60 et 50 unités par heure dans 5 ans.

A l'heure actuelle, cette pièce est usinée sur des centres d'usinage 4 axes d'ancienne génération (temps copeau est de plus de 2 et 3.2 minutes environ pour P_A et P_B respectivement). Les temps techno-manuels (montage, démontage...) et de transfert sont très importants.

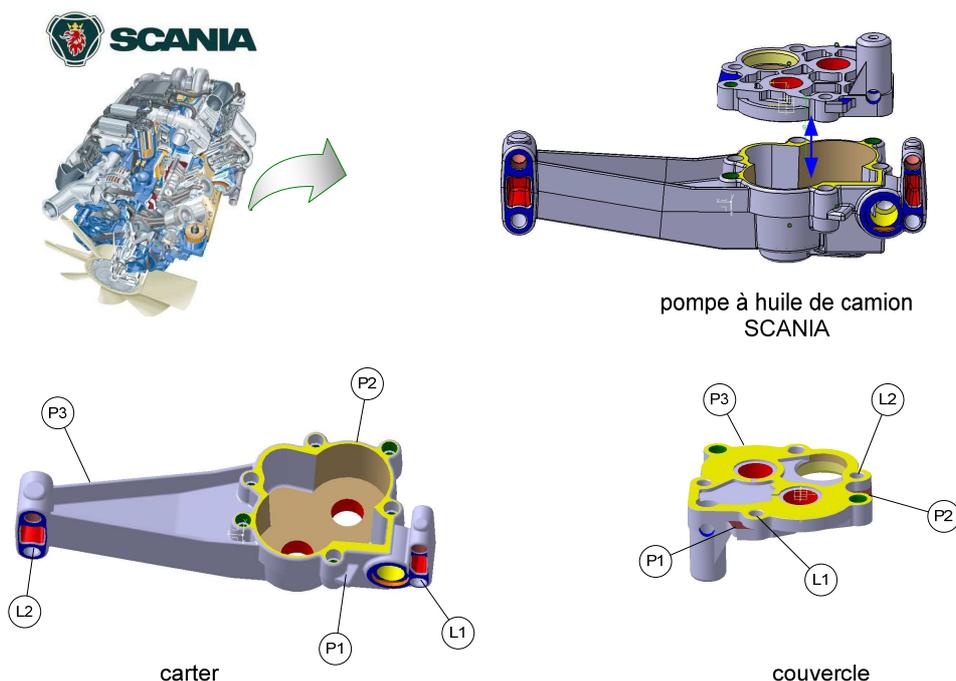


Figure I.18. Exemple d'application à l'ensemble des chapitres.

Le matériau constituant ces pièces est un alliage d'aluminium (AlSi9Cu, série 46500) sans traitement thermique. Le brut de fonderie est obtenu par moulage en coquille par haute ou basse pression selon les sous-traitants.

Ce type de pièces possèdent en matière de posage et bridage des spécificités par ajout de matière (entités P1, P2, P3) ainsi que l'utilisation d'alésages non usinés due à des passages de goujons (L1 et L2) en vue d'assurer la mise en position (Figure I.18).

II. Chapitre II : Machine-Outil Reconfigurable : Caractéristiques intermédiaires

II.1 Introduction

Après avoir mis en lumière dans le chapitre 1, les nouveaux concepts concernant le SMR et en particulier le MOR, il convient de proposer une méthodologie de conception de ce type de machine. Dans cette méthodologie, nous faisons appel à de nombreux travaux de recherche concernant la gamme d'usinage ainsi qu'à des représentations intermédiaires. Ceci constitue l'objectif de ce chapitre.

II.2 Représentation intermédiaire

Des caractéristiques intermédiaires utilisées pour effectuer des choix technologiques et pour converger vers une ou plusieurs solutions d'architecture de MOR. Dans la figure ci-après, nous définissons une démarche de conception de la structure d'une MOR par une succession d'étapes faisant appel à des données technologiques et caractéristiques spécifiques que nous nommons caractéristiques intermédiaires conduisant à une solution architecturale.

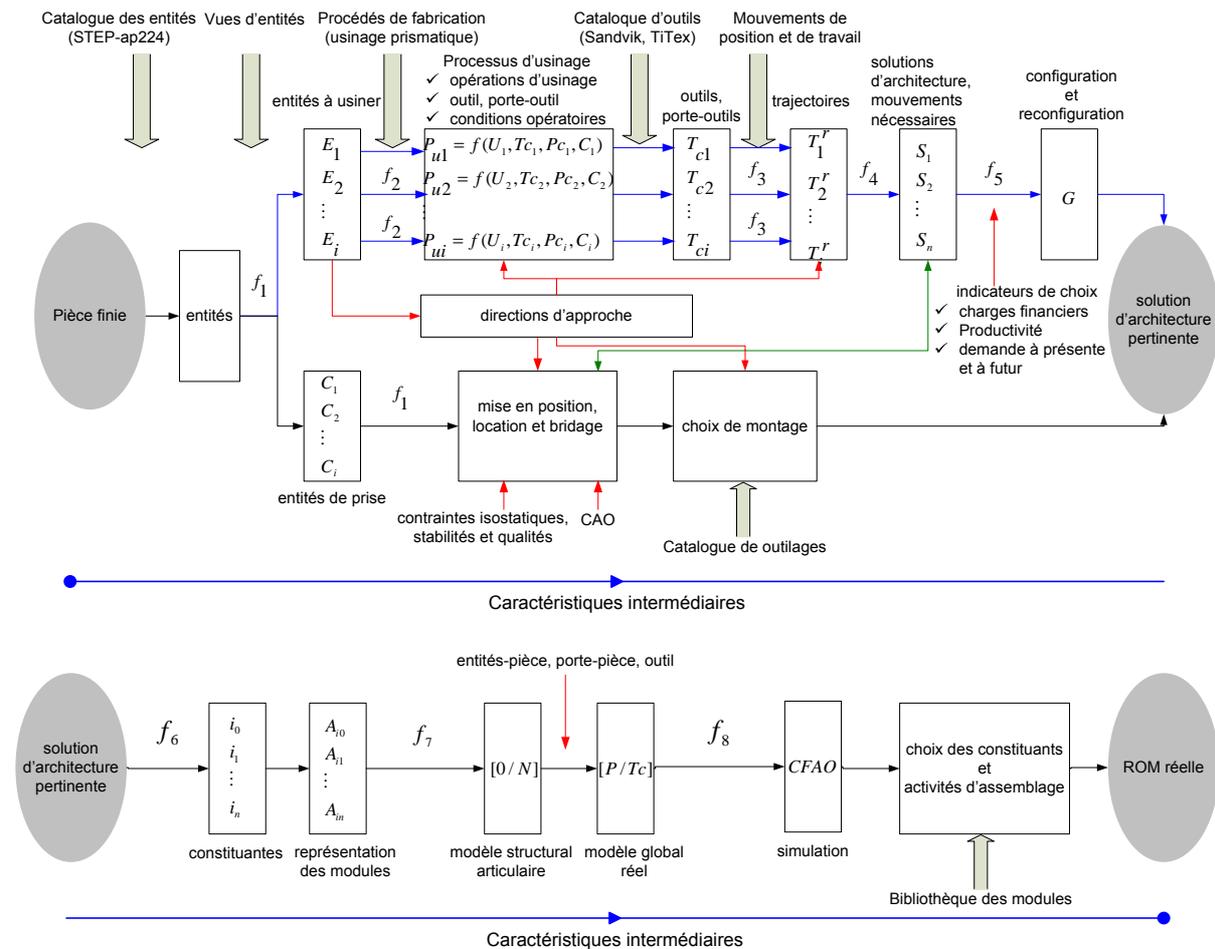


Figure II.1. Représentation intermédiaires du passage de famille de pièces à la MOR.

La méthodologie de conception architecturale (pour une famille de pièces) de la MOR se traduit par un ensemble d'activités (f) (voir Figure II.1).

Ainsi on définit les fonctions suivantes :

- $f_1 : P \longrightarrow E_i$ activité caractérisation des entités d'usinage (E_i) (traduction d'entité de conception en entité d'usinage) faisant appel aux paramètres géométriques intervenant sur les caractéristiques décrivant une MOR. La fonction (f_1) permet notamment de :
 - analyser des entités (entités à usiner, entités de posage, de bridage) par la caractérisation de divers formes géométriques admissibles sur les pièces à partir du catalogue des entités (STEP-AP224) ;
 - identifier les surfaces fonctionnelles ;
 - spécifier les surfaces de position, de localisation et de bridage ;
 - définir les directions accessibles au montage d'usinage.
- $f_2 : E_i \longrightarrow Pu$ activité de définition des processus d'usinage (Pu) à partir des caractères d'usinabilité des entités d'usinage. La fonction (f_2) permet de :
 - définir le processus d'usinage pour chaque entité à usiner ;
 - les opérations d'usinage liées à l'usinage d'entité,
 - les outils de coupe et porte-outils,
 - les conditions opératoires.
 - spécifier les directions d'approche des outils de coupe ;
 - définir les antériorités d'usinage.
- $f_3 : Pu \longrightarrow T'$ activité de spécification cinématique liée à la conception de la MOR, elle est associée à la description des mouvements nécessaires afin d'identifier les différentes positions et les mouvements liés aux broches. La fonction f_3 nous permet de :
 - définir les mouvements des outils de coupe lors de la réalisation des entités ;
 - générer des trajectoires ;
 - spécifier les volumes balayés formulés lors des mouvements des outils.
- f_4 : activité de création des solutions architecturales de la MOR répondant à la réalisation de famille de pièces spécifiée et qui s'appuient sur la définition du nombre et des orientations des broches, et sur la définition cinématique (mouvements requis des broches, programme d'usinage) ;
- f_5 : activité de configuration et reconfiguration qui sont des créations actives (broches, axes, amplitudes) de MOR. Elle permet la réalisation des tâches d'usinage en prenant en compte la/les demandes de client et/ou de marché présent et futur. En effet, le passage d'une configuration à une autre est une fonction à prendre en compte lors de la conception de machine ;
- f_6 : activité de représentation et de modélisation des constituants de la MOR ;
- f_7 : activité de représentation de modèle structural articulé, graphe de connectivité, assemblage, modèle direct, modèle inverse et modèle global pour la mise en œuvre de la MOR ;
- f_8 : activité de choix des composants physiques en vue de définir la structure.

Après avoir introduit les paramètres caractéristiques intermédiaires, nous nous concentrons dans la première partie à la notion d'entité apparue dans les années 80 comme point de départ. En effet, nous nous sommes basés particulièrement sur le concept des entités d'usinage (géométrie de type $2^{1/2} D$). Cette description des pièces définit les données intrinsèques et extrinsèques relatives à chaque entité. Par ailleurs, elle nous permet de spécifier les différentes connaissances relatives à la fabricabilité (capacité de réaliser les surfaces par usinage) des entités.

Ensuite dans la deuxième partie, nous introduisons la notion de volume d'encombrement représentant le volume (dimensions et géométrie) de la pièce. Il permet de définir globalement le volume qu'occupera la pièce dans l'espace de tâche de la MOR. D'autre part, ce volume d'encombrement de pièces (enveloppe extérieure) ainsi que les faces et leurs orientations déterminent le « polyèdre caractéristique » nécessaire au traitement des problèmes de mise en position.

Nous utilisons le concept d'accessibilité comme élément de choix à la définition d'une ou des directions d'approche d'outil capables sans rencontrer aucun obstacle dû à la morphologie de la pièce.

Enfin en troisième partie, nous définirons les activités de mise en position de pièces dans le référentiel de MOR de manière à garantir un usinage tout en respectant les spécifications dimensionnelles et géométriques au travers de contraintes géométriques décrivant les espaces fonctionnels et les contraintes technologiques relatives aux isostatismes selon des critères de stabilité et de qualité.

La génération de la gamme (plusieurs posages, plusieurs opérations) proprement dite a été écartée nous nous limitons au type de produit réalisé en un seul posage (voire deux selon la complexité des pièces). La gamme résulte d'un ordonnancement fonction des contraintes liées aux spécifications de tolérancement et de cadence.

II.2.1 Concept d'entité

II.2.1.1 Contexte

La notion d'« entité » nommée ainsi en France, correspond au terme anglais « feature ». Ce concept apparaît dans les années 80 comme le point commun de rapprochement entre les divers acteurs de description des pièces (métier de concepteur) et les modèles de préparation à la fabrication (métier de gammiste) [Derras, 1998].

Le principe de description de l'entité s'est appuyé sur la volonté d'intégrer un haut niveau sémantique des fonctions intervenant sur les pièces lors de son cycle de développement du produit et du processus de fabrication. Ce concept s'est décliné et appliqué à d'autres domaines comme la conception, l'analyse, le calcul de structure, les matériaux. Le groupe GAMA (1990) en a donné la définition générale :

« Un groupement sémantique (atome de modélisation) caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisé pour décrire un objet indécomposable utilisé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et l'utilisation des produits et des systèmes de production » [Tollenaere, 1998].

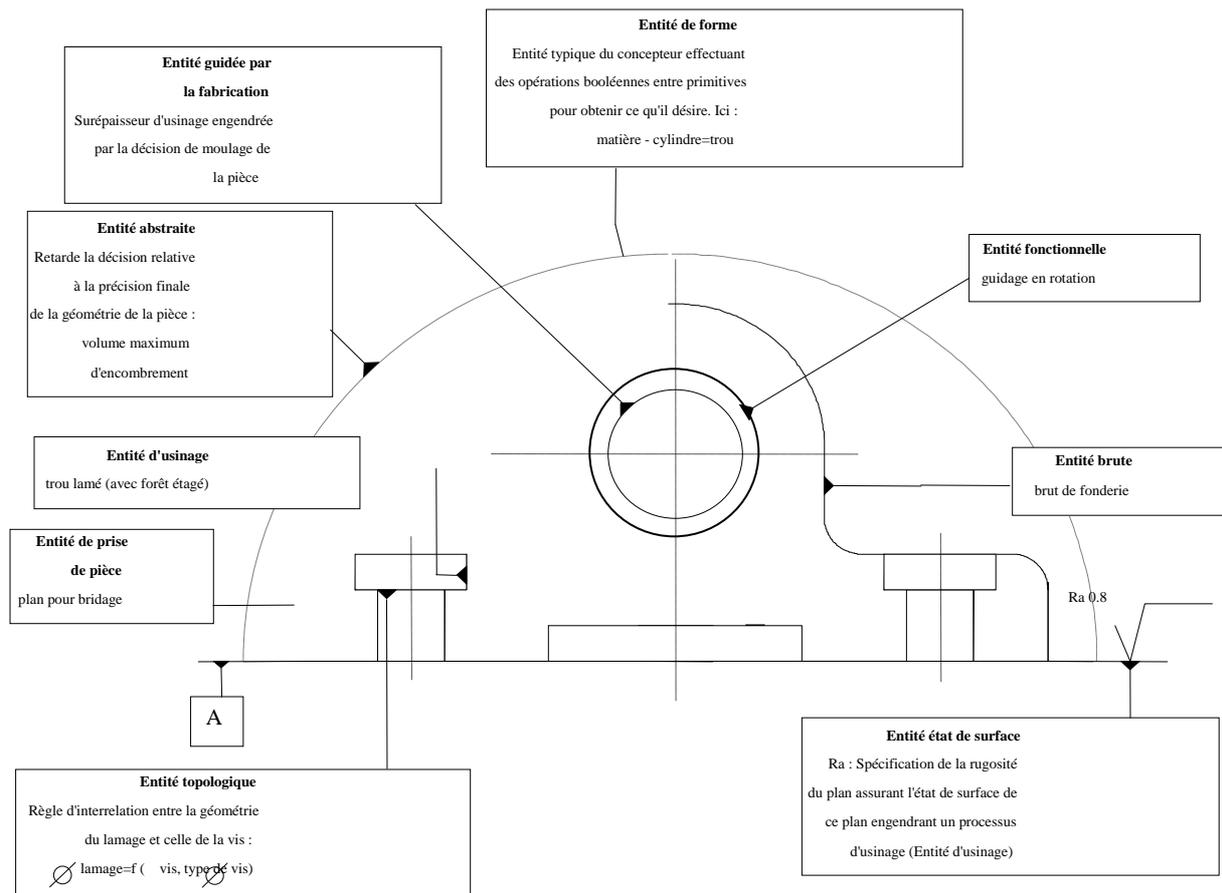


Figure II.2. Types des entités (selon le groupe GAMA) [Tollenaere, 1998].

D'Acunto et Martin dans [Cordebois, 2003] en ont donné la définition suivante :

« L'entité est une représentation, généralement, sous forme de géométrie nominale. Elle est sensiblement la même pour tous les intervenants. Or, la topologie de l'entité est sémantiquement différente pour chacun des intervenants ». La Figure II.2 montre les différentes vues des entités liées aux activités de conception et aux activités de fabrication.

En effet, il existe un nombre quasi-illimité de types d'entités, il est toujours possible de définir un type qui répond à de nouveaux besoins et qui mémorise les informations et les connaissances désirées.

II.2.1.2 Entité d'usinage

II.2.1.2.1 Définition

Nous utilisons essentiellement le point de vue « entité d'usinage » (machining feature) dans ce travail comme un moyen de description. Ainsi, le concept d'entité d'usinage nous permet de prendre en compte les différents éléments mis en évidence en les regroupant dans une structure de données acceptable pour toutes les opérations d'usinage relatives aux pièces à usiner. Parmi les nombreuses définitions proposées, nous préférons celle du groupe GAMA en a donné la définition suivante :

« Une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour

lesquelles un processus d'usinage est connu, ce processus est quasi indépendant des processus des autres entités » [Gama, 90].

On a désigné l'entité d'usinage dans ce travail par le symbole (E_i).

II.2.1.2.2 Classification des entités d'usinage

Il n'existe pas un nombre limité et standard d'entités d'usinage permettant la définition complète d'une pièce. En effet, il est difficile de définir *a priori* les diverses entités d'usinage représentant les différentes pièces mécaniques. L'existence d'une entité est liée à l'existence d'un processus d'usinage permettant sa réalisation. Le catalogue des entités utiles au modèle de représentation des pièces résulte du domaine de l'expert en fabrication [Villeneuve, 1990]. Parmi plusieurs classifications de types des entités d'usinage, nous adoptons celle du protocole STEP AP-224 ISO 10303 (Mechanical Product Definition for Processing Planning Using Machining Features). Elle contient toutes les données de représentation et d'échange exigées pour définir les données nécessaires afin d'usiner une pièce mécanique.

En effet, la référence AP-224 définit largement les entités d'usinage par une bibliothèque structurée, mais également permet la définition des entités d'usinage en termes de B-rep. La deuxième édition de la référence AP-224, éditée en avril 2001, a classifié 16 catégories différentes d'entités d'usinage (voir annexe. A) caractérisées par 51 paramètres [Karmer et al, 2001].

La référence AP-224 ne peut être utilisée seule. Elle est complétée par les références AP-203ed.2 (géométrie en CAO et tolérancement) (voir Figure II.3).

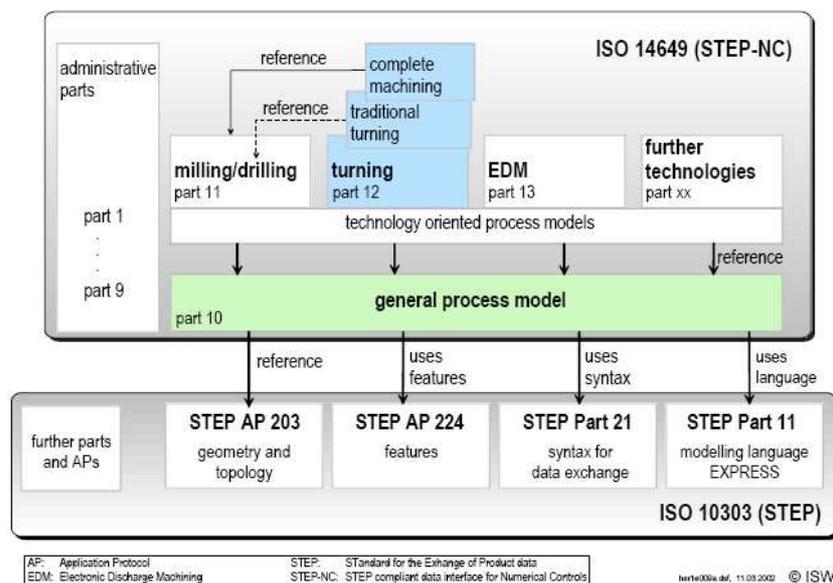


Figure II.3. Référence AP-224.

Nous nous appuyons sur le concept d'entités d'usinage réalisables (Annexe A) par des opérations d'usinage réalisées sur des pièces prismatiques tel que les opérations axiales (perçage, alésage...) et fraisage (en bout et/ou en roulant).

II.2.1.2.3 Description des entités d'usinage

Les entités d'usinage, que nous avons défini, sont décrites selon trois types de données :

- intrinsèques (propres à l'entité) ;
- extrinsèques (liées à l'entité et à son environnement) ;
- et d'usinabilité (Figure II.4).

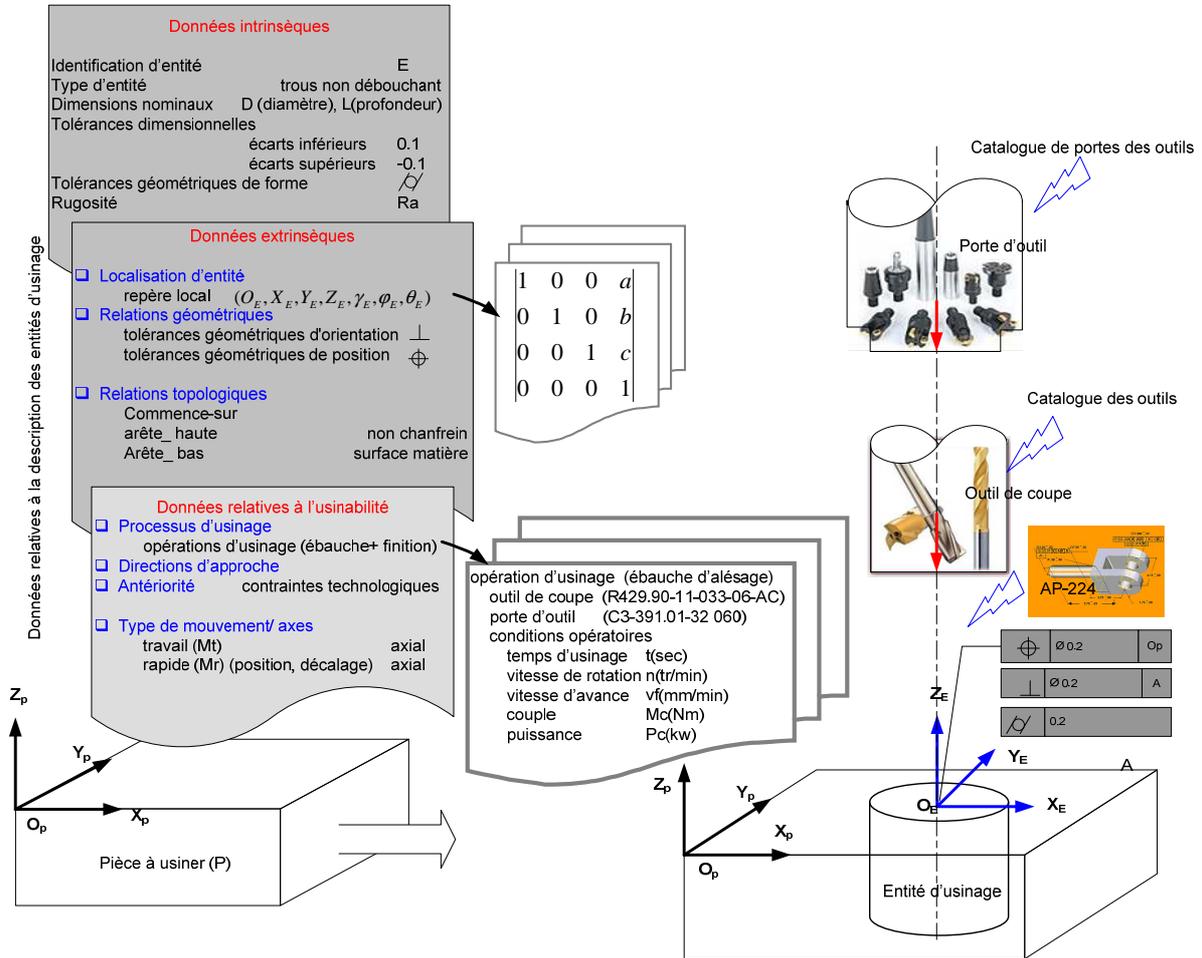


Figure II.4. Exemple des entités d'usinage et des données de description.

II.2.1.2.3.1 Données intrinsèques relatives à l'entité d'usinage

Chaque entité d'usinage fait appel à des paramètres internes de description (dimensions, tolérance, rugosité, etc.), précisant les données que nous regroupons sous le terme de données intrinsèques désignées par $(D_{E_i}^m)$ (Figure II.4) localisées dans le repère $\mathcal{R}(E_i)$ et fonction de :

- (E_i) identifiant le nom de l'entité ;
- (Y_i) traduisant le type de l'entité (trou, rainure...)
- (A_i) comme les dimensions nominales et les tolérances dimensionnelles (écarts inférieurs et supérieurs admissibles par exemple) ;
- (Q_i) le caractère qualité (e.g. R_a) ;

- (Rf_i) indiquent les spécifications géométriques relatives aux défauts de forme (rectitude, planéité...).

soit :

$$D_{E_i}^{in} = f(Y, A, Q, Rf)_i \quad (i=1 \rightarrow n) \quad \text{dans } \mathfrak{R}(E_i) \quad (\text{II.1})$$

II.2.1.2.3.2 *Données extrinsèques relatives à l'entité d'usinage*

La deuxième rubrique désigne les paramètres externes permettant de décrire les relations de l'entité en fonction de son environnement.

Tout d'abord à chaque entité, un repère local cartésien $\mathfrak{R}(E_i; O_{E_i}, x, y, z)$ ou de manière simplifiée $\mathfrak{R}(E_i)$ est défini comme par :

- O_{E_i} , l'origine (un point caractéristique : e.g. centre du cercle coté débouchant d'une entité trou) ;
- le vecteur z est défini sortant de l'entité ou de la matière ;

axe (Z) = axe de trou

axe (Z) \perp surface

- les axes x et y sont orthogonaux à z . L'orientation de ces deux axes est fonction de la géométrie générale de la pièce.

Pour définir les données relatives entre les entités localisées dans le repère $\mathfrak{R}(E_i)$, nous rassemblons sous le terme de « données extrinsèques » $D_{E_i}^{ex}$ (Figure II.4) les informations suivantes:

- (R_{G_i}) comme relations géométriques d'orientation (parallélisme, perpendicularité ...) et de position (localisation, symétrie, concentricité ...) ;
- (R_{T_i}) comme relations topologiques. Souvent implicite au niveau de la conception, elles permettent de caractériser une relation de voisinage entre deux entités. Par exemples la spécification topologique s'écrit « l'entité E_1 commence sur E_2 , l'entité E_1 débouche sur E_2 ».

La description externe d'une entité d'usinage E_i est définie par ensemble des données suivantes :

$$D_{E_i}^{ex} = f(\mathfrak{R}(E_i), R_G, R_T)_i \quad (i=1 \rightarrow n) \quad (\text{II.2})$$

La connaissance de ces relations géométriques et topologiques est nécessaire en fabrication pour traiter les problèmes d'inférence entre entités. Suivant le type de relation exprimée et la qualité des entités, un ordre entre les opérations associées peut être imposé.

II.2.1.2.3.3 *Données relatives à l'usinabilité d'entités*

En vue de lever l'ambiguïté du terme « usinabilité », nous définissons l'usinabilité d'une entité d'usinage comme un ensemble de données opératoires liées à son processus d'obtention par ablation. Les données décrivant l'usinabilité ($D_{E_i}^U$) de l'entité E_i se présentent comme (Figure II.4):

- (Pu_i), le processus d'usinage constitué d'une liste ordonnée d'opérations ;
- Opérations ;
 - où (U_i) désigne l'opération pour une technique d'usinage ;
 - avec (Tc_i) comme outils de coupe et porte-outil ;
 - et (C_i) indiquant les conditions opératoires (vitesse de coupe, avance...).
- (Da_i) la ou les directions accessibles (directions d'approche) ;
- (R_{ati}) relations d'antériorité (contraintes d'antériorité entre les opérations).

L'usinabilité de l'entité E_i est décrite par $D_{E_i}^U$ comme suit :

$$D_{E_i}^U = f(Pu, Da, R_{at})_i \quad (i=1 \rightarrow n) \quad \text{dans } \mathfrak{R}(E_i) \quad (\text{II.3})$$

II.2.1.2.3.4 Description finale

Ainsi, la description intégrale de l'entité d'usinage E_i est complètement définie selon les équations (II.1), (II.2) et (II.3) spécifiant les données $D_{E_i}^{in}$, $D_{E_i}^{ex}$ et $D_{E_i}^U$. Ainsi :

$$E_i = f(D_{E_i}^{in}, D_{E_i}^{ex}, D_{E_i}^U) \quad (i=1 \rightarrow n) \quad (\text{II.4})$$

L'équation précédente (II.4) fournit donc au concepteur de la MOR une description sémantiquement et suffisamment explicite de l'entité d'usinage d'un point de vue métier, contenant l'ensemble des données nécessaires à la conduite de son raisonnement.

II.2.1.3 La pièce et les entités d'usinage

Le passage des entités de conception à celles d'usinage est encore une réelle problématique. Décrire une entité d'usinage est toujours empreint de partialité car lors de la description le gammiste y ajoute implicitement son expertise (connaissance des processus, des machines-outils, des outils...). En intégrant les différents états intermédiaires (de la finition à l'ébauche), il prédétermine des entités et les processus ad hoc... Néanmoins de nombreux travaux ont porté sur la reconnaissance des entités d'usinage [Regli, 1995], [Regli et al, 1997].

Nous concernant, le passage du modèle CAO en un modèle des entités d'usinage est donc le résultat d'analyse d'un expert basée sur les connaissances des entités d'usinage selon STEP AP-224.

A l'issue de l'identification des entités d'usinage nous proposons une description sous la forme suivante :

$$P_j = \bigcup_{i=1}^{i=n} E_i^j \quad (\text{II.5})$$

avec E_i^j les entités à usiner (i) de la P_j la pièce (j).

Pour notre exemple d'application (couvercle et carter de la pompe hydraulique) à partir de catalogue des entités d'usinage (protocole de STEP AP-224). Le couvercle (P_A) est constitué de neuf entités (Figure II.5.a). Le carter (P_B) est composé des dix sept entités (Figure II.5.b.)

Selon l'équation (II.5) le couvercle P_A est constitué de :

$$P_A = E_1^A \wedge E_2^A \wedge E_3^A \wedge E_4^A \wedge E_5^A \wedge E_6^A \wedge E_7^A \wedge E_8^A \wedge E_9^A \tag{II.6}$$

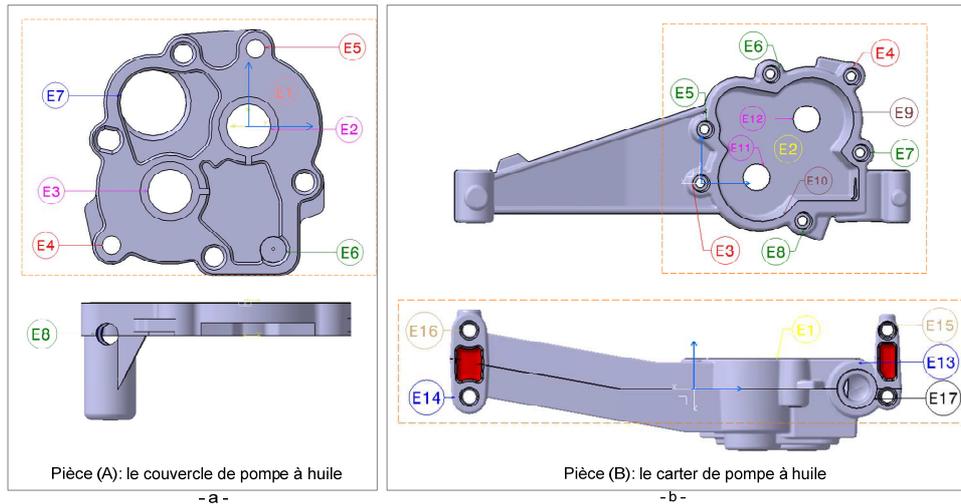


Figure II.5. Entités d'usinage des pièces de la pompe à huile (P_A et P_B).

Selon l'équation (II.5) le carter P_B est constitué de :

$$P_B = E_1^B \wedge E_2^B \wedge E_3^B \wedge E_4^B \wedge E_5^B \wedge E_6^B \wedge E_7^B \wedge E_8^B \wedge E_9^B \wedge E_{10}^B \wedge E_{11}^B \wedge E_{12}^B \wedge E_{13}^B \wedge E_{14}^B \wedge E_{15}^B \wedge E_{16}^B \wedge E_{17}^B \tag{II.7}$$

Les types des entités d'usinage sont consignés dans le tableau ci après.

Pièces					
A (le couvercle)		B (le carter)			
Entités à usiner		Entités à usiner			
Nom	Type	Nom	Type	Nom	Type
E1	Surface	E1	surface	E10	demi-cylindre
E2	trou débouchant alésé	E2	surface	E11	trou débouchant alésé
E3	trou débouchant alésé	E3	trou lamé	E12	trou débouchant alésé
E4	trou lamé	E4	trou lamé	E13	surface
E5	trou lamé	E5	trou taraudé	E14	surface
E6	trou lamé	E6	trou taraudé	E15	trou lamé
E7	trou débouchant alésé	E7	trou taraudé	E16	trou lamé
E8	trou percé	E8	trou taraudé	E17	trou lamé
E9	trou lamé	E9	demi-cylindre		

Tableau II.1. Entités à usiner du couvercle (P_A) et du carter (P_B).

II.2.2 Notion de Volume d'encombrement

Le volume physique matérialisant la pièce à usiner occupe une partie importante de l'espace de travail disponible sur MOR. Les composants de la machine, les outils et porte outils de coupe ne doivent en aucun cas entrer en collision ou en interférence avec l'enveloppe de pièce et/ou des dispositifs du posage et du bridage au cours des phases de préparation de la machine.

Il est donc nécessaire de définir le volume d'encombrement de la pièce qui représente le volume globalement occupé par la pièce dans l'espace de tâche de la MOR. La modélisation du volume peut être créée automatiquement à l'aide de modèle de CAO (respectant toutes les dimensions imposées par les spécifications du dessin de définition de la pièce et l'environnement d'usinage). La Figure II.6 illustre les volumes d'encombrement du couvercle de pompe à huile à l'état brut et le volume d'encombrement total, occupé par la morphologie du couvercle et les dispositifs de montage. Le volume d'encombrement est déterminé à l'aide de l'outil d'environnement/simulation de machine-outil CN » dans Catia V5.

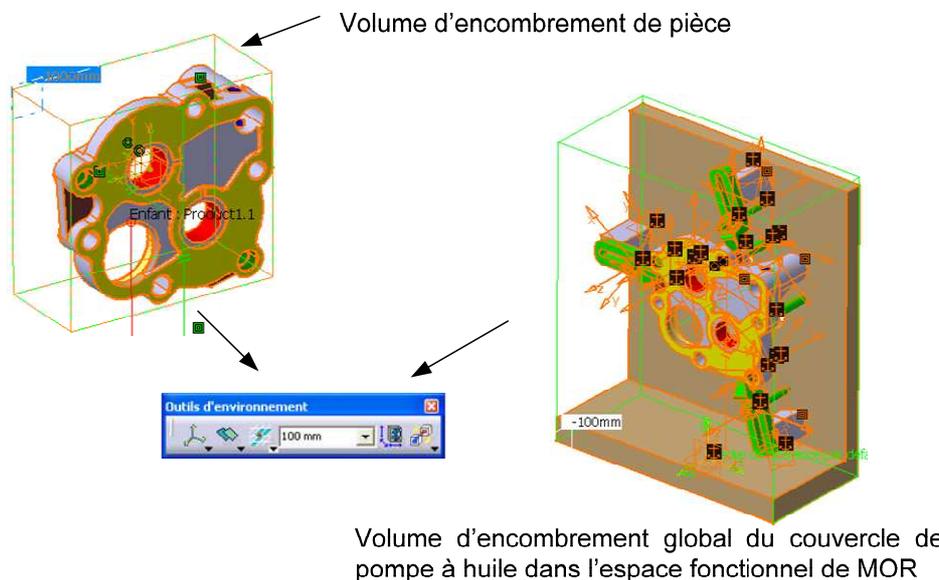


Figure II.6. Volumes d'encombrement de couvercle au sien du processus de fabrication.

II.2.3 Concept d'accessibilité

Nous utilisons la notion d'accessibilité comme un élément critique à la définition d'une ou de directions possibles d'approche de l'outil. Elle se définit comme une trajectoire le long de laquelle l'outil de coupe a un accès à l'entité sans aucun obstacle compte tenu de la morphologie de la pièce et/ou avec les dispositifs du posage et/ou du bridage. L'évaluation de l'accessibilité d'une ou des entités d'usinage s'appuie sur la planification des trajectoires d'usinage en vue de déterminer toutes les possibilités d'accès. Selon [Martin et al, 2001, 2002], il est possible de définir l'accessibilité comme :

« Accessibilité: ensemble des directions d'outils permettant d'atteindre une surface S à réaliser sans collision dans cette direction ».

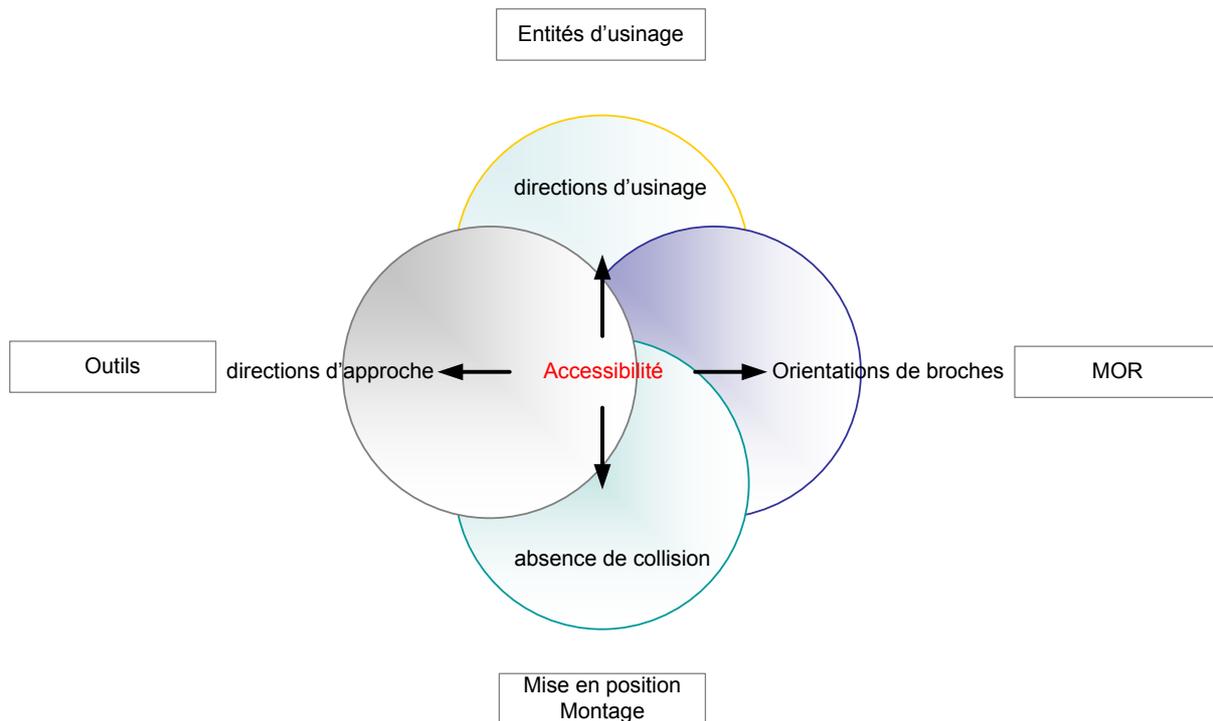


Figure II.7. Accessibilité entre différentes activités.

Les mouvements permettant d'atteindre l'entité d'usinage au travers des directions possibles d'accès détermineront les directions d'approche. Nous pouvons faire appel à la bibliothèque de stratégies d'approche et de retrait définie par l'AP 238.

La définition des directions d'accessibilité résulte donc de la prise en compte des directions d'approche, des directions d'usinage (trajets des outils), des interférences entre les outils et le montage. Ces directions d'accès permettent de définir l'orientation des broches.

Nous pouvons distinguer l'accessibilité locale ou globale d'une entité. Concernant le calcul d'accessibilité localement d'une entité s'identifie par un cône spécifiant toutes les directions accessibles d'usinage en évitant les collisions avec la morphologie de la pièce (Figure II.8). L'accessibilité locale d'un petit élément de surface ΔS est définie comme étant l'ensemble des directions permettant de toucher ΔS et définit le cône d'accessibilité local. L'accessibilité d'une entité est définie par l'union des directions du cône d'accessibilité local des points de la surface à usiner. Par contre, l'accessibilité globale correspond aux directions du cône d'accessibilité locale pour lesquelles l'outil ou son support n'entrent pas en contact avec d'autres parties de la pièce (gestion des collisions).

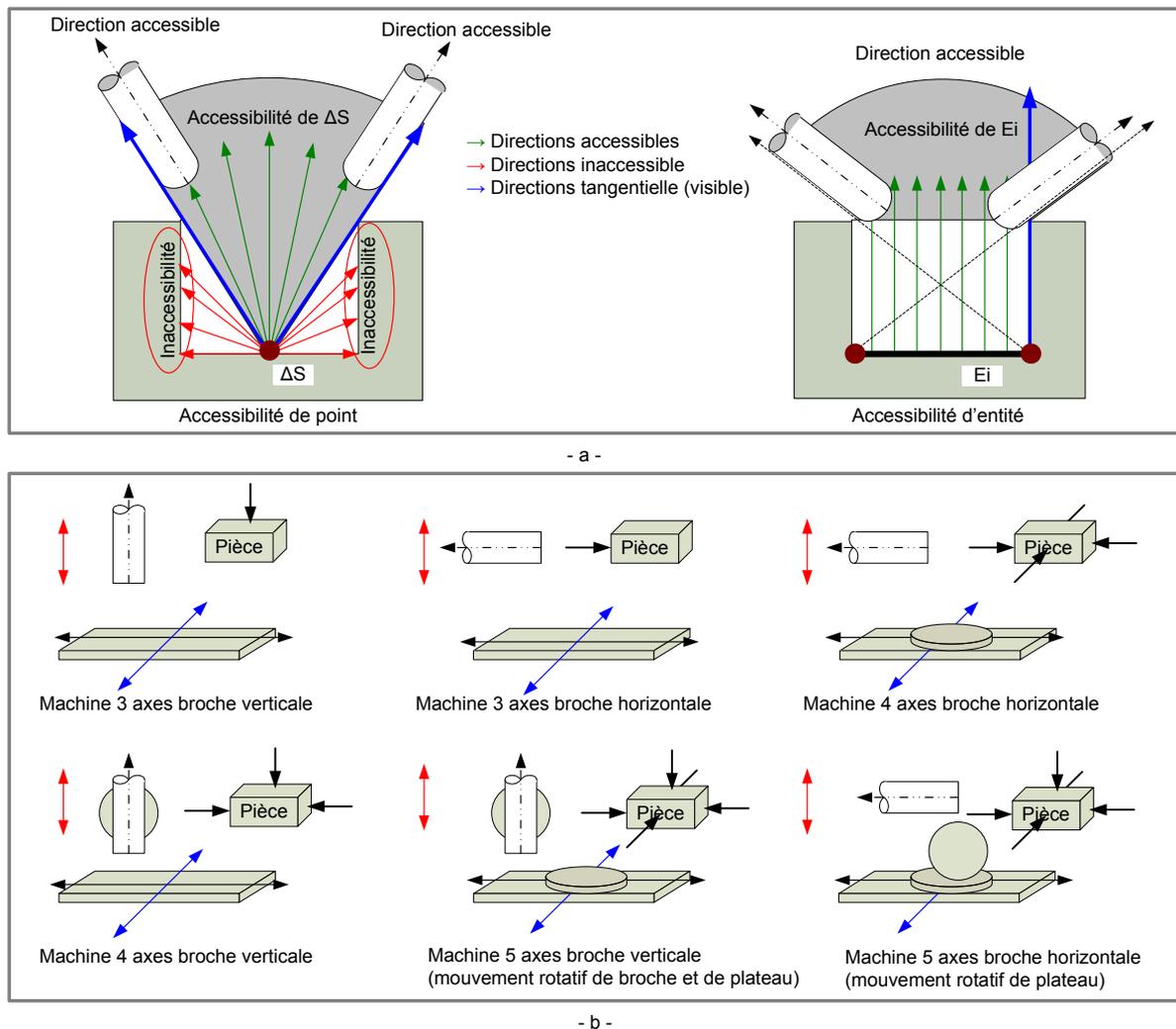


Figure II.8. (a) Cône d'accessibilité de point et d'entité, (b) accessibilité de pièce pour des opérations axiales suivant le type de machine.

La Figure II.8 représente l'accessibilité d'un point ΔS , d'une entité E_i (Figure II.8.a) (en utilisant une fraise boule) et l'accessibilité d'usinage des pièces dans le cas de centres d'usinage classiques (3, 4 et 5 axes) (Figure II.8.b) à l'aide d'une fraise deux tailles (travail en bout ou en roulant).

II.2.3.1 Direction d'usinage

Les directions d'usinage sont associées à l'attribut d'usinabilité des entités. La définition des directions d'usinage n'est pas triviale. En effet, prenons l'exemple d'une surface à fraiser, l'emploi de l'opération en fraisage en bout ne nécessite qu'une seule direction d'usinage (la normale de surface confondue avec la normale de l'outil), tandis que pour une opération de fraisage en roulant, la direction d'usinage est orthogonale à la surface générée. Pour les opérations axiales généralement réalisées à partir d'outils tournants (fraise boule, fraise deux tailles, foret, alésoir,...) (où le type d'outil est de plus à considérer pour définir l'accessibilité d'une entité). La direction d'usinage est parallèle à la direction d'approche d'outil ainsi à l'axe d'outil.

Nous distinguons de même la notion de direction principale et secondaire. Prenons l'exemple de la réalisation d'une entité d'usinage en fraisage combiné, il existe donc deux directions d'usinage en l'occurrence orthogonale. Il est donc indispensable d'en définir une principale selon des critères géométriques cinématiques (surfaces génératrices et directrices) et technologiques (état de surface, stabilité)...

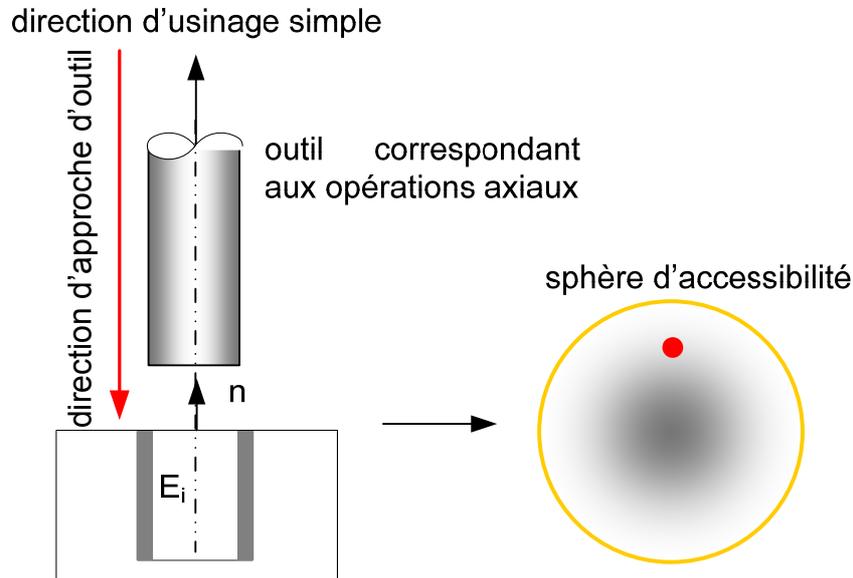


Figure II.9. Direction d'usinage simple et sa présentation par une sphère d'accessibilité.

Certaines entités peuvent avoir plusieurs directions d'usinage. Nous distinguons deux types configurations de directions d'usinage concernant les entités 2.5D :

- La direction d'usinage dite simple : l'entité n'a qu'une direction d'usinage. c'est la direction la plus simple utilisée par exemple pour l'usinage de trous non débouchant ou le lamage (Figure II.9) ;
- Les directions d'usinage dites multiples: l'entité est réalisable par certaines directions d'usinage, par exemple le trou débouchant ayant deux directions d'usinage (Figure II.10) ou un plan qui dispose de cinq directions d'usinage soit une direction correspondante au fraisage en bout et les autres au fraisage en roulant (Figure II.10).

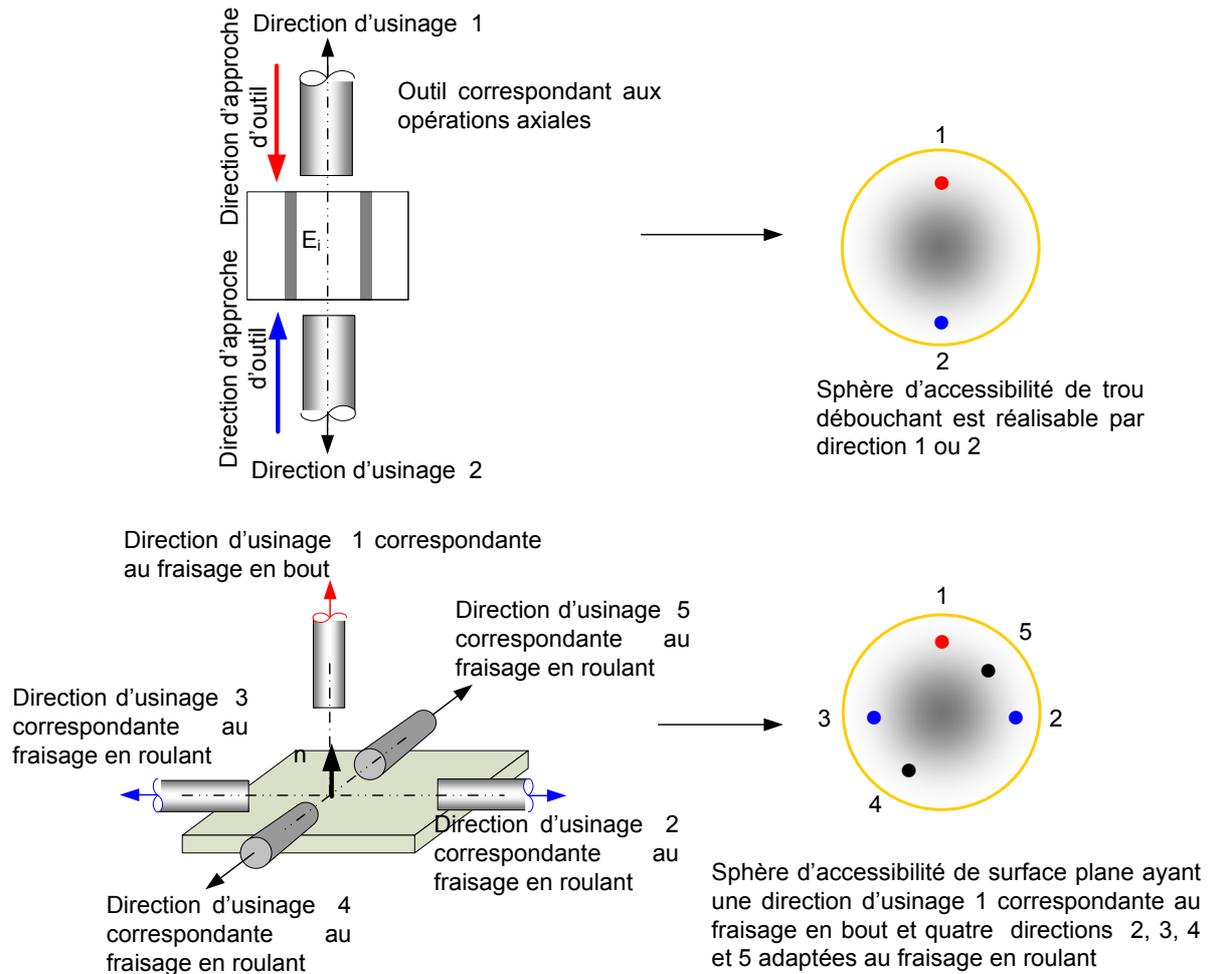


Figure II.10. Directions d'usinage multiples et ses présentations sur sphère d'accessibilité.

Pour notre exemple d'application, le Tableau II.2 illustre les directions d'usinage éventuelles des entités du couvercle et du carter correspondant à l'usinage prismatique sans aucun risque de collision.

Directions d'usinage éventuelles des entités							
P _A (le couvercle)							
Entités à usiner		Directions du polyèdre caractéristique du couvercle					
Nom	Type	X+	X-	Y+	Y-	Z+	Z-
E1	surface	1	1	1	1		1
E2	trou débouchant alésé	0	0	0	0	1	1
E3	trou débouchant alésé	0	0	0	0	1	1
E4	trou lamé	0	0	0	0	0	1
E5	trou lamé	0	0	0	0	0	1
E6	trou lamé	0	0	0	0	0	1
E7	trou débouchant alésé	0	0	0	0	1	1
E8	trou percé	0	0	1	0	0	0
E9	trou lamé	0	0	0	0	1	1
P _B (le carter)							
Entités à usiner		Directions du polyèdre caractéristique du carter					
Nom	Types	X+	X-	Y+	Y-	Z+	Z-
E1	surface	1	1	1	1	0	1

E2	surface	0	0	0	0	0	1
E3	trou lamé	0	0	0	0	0	1
E4	trou lamé	0	0	0	0	0	1
E5	trou taraudé	0	0	0	0	0	1
E6	trou taraudé	0	0	0	0	0	1
E7	trou taraudé	0	0	0	0	0	1
E8	trou taraudé	0	0	0	0	0	1
E9	demi-cylindre	0	0	0	0	0	1
E10	demi-cylindre	0	0	0	0	0	1
E11	trou débouchant alésé	0	0	0	0	1	1
E12	trou débouchant alésé	0	0	0	0	1	1
E13	surface	1	0	1	0	1	1
E14	surface	0	1	1	0	1	1
E15	trou lamé	0	0	1	0	0	0
E16	trou lamé	0	0	1	0	0	0
E17	trou lamé	0	0	1	0	0	0
		1	directions possible sans collision				
		0	directions impossible				

Tableau II.2. Directions d'usinage éventuelles (directions d'approche) du couvercle et du carter.

Enfin, l'accessibilité de la pièce est l'intersection de l'ensemble des accessibilités des entités à réaliser en un seul posage.

II.3 Montage d'usinage

II.3.1 Posage et bridage

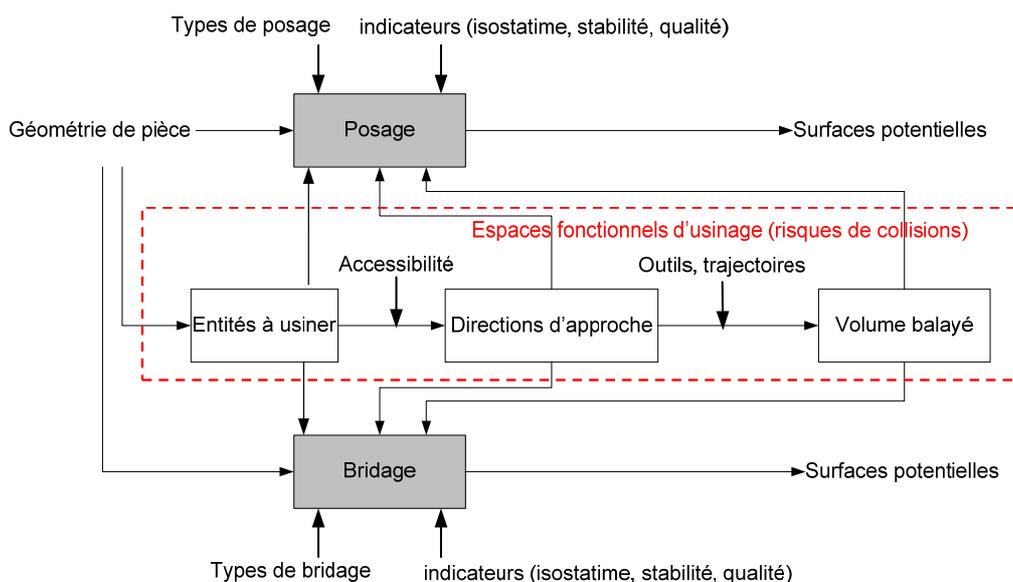


Figure II.11. Posage et bridage.

Selon [Paris, 1995], la définition du posage est « un ensemble d'opération d'usinage, réalisée sans démontage de la pièce, ni transfert du couple pièce/porte-pièce d'une broche de machine à une autre ». Ce point de vue traduit la relation pouvant exister entre la sous-phase et la machine et ceci dans une gamme d'usinage conventionnelle. Néanmoins cette définition est applicable dans le cadre de la conception de MOR.

Quant au bridage, [Paris, 1995] indique qu'il « *permet donc d'assurer l'équilibre de la pièce soumise aux différents efforts et de la maintenir sur ses points d'appui* ». Concernant la conception de MOR, le bridage est en relation avec les problématiques de volume d'encombrement et les risques de collisions des outils lors d'activité d'usinage des entités.

Par ailleurs, l'orientation du montage d'usinage concrétisant le posage et le bridage de la pièce s'oriente, se positionne, se localise en fonction des broches constituant la MOR. La fonction de mise et maintien en position ne peuvent être traitées séparément (Figure II.11) et interfère avec l'entité d'usinage et en particulier les caractéristiques d'usinabilité.

II.3.2 Fonctions élémentaires

II.3.2.1 Posage

Dans le contexte de production en série, le posage et le bridage sont déterminés préalablement lors de la définition des bruts. L'ajout de formes géométriques facilite la mise et le maintien en position. Ces géométries supplémentaires sont impérativement localisées et positionnées en fonction des surfaces fonctionnelles. De plus, elles constituent alors les référentiels au balançage du brut (spécification de liaison au brut).

Ces surfaces doivent positionner la pièce dans le référentiel de la MOR de manière à garantir l'usinage en respectant les spécifications dimensionnelles et géométriques. Ces conditions de tolérancement permettent de régler le montage d'usinage sur la machine-outil. Les fonctions de ces surfaces doivent suivre les éléments suivants :

- L'isostaticité car chaque pièce de la famille doit occuper une position unique ou le même état statique dans le référentiel de la MOR. La position est obtenue en éliminant les six degrés de liberté de la pièce (trois degrés en rotation : R_x , R_y et R_z , trois degrés en translation : T_x , T_y et T_z) dans le référentiel de la machine ;
- Le respect des conditions de reproductibilité au regard des spécifications dimensionnelles et géométriques des surfaces à usiner ; il faut positionner de manière identique et précise en tenant compte de la variabilité des pièces ;
- Le respect des conditions de répétabilité telle que la pièce montée et démontée (quelque soit la variabilité dimensionnelle et géométrique) se repositionne avec exactitude à chaque fois.

Par ailleurs, le nombre de posage et bridage doit être minimisé de façon à diminuer les temps et coûts de fabrication et à garantir la qualité requise des pièces, nous avons imposé (pour nos exemples d'application) :

Un posage unique du couvercle P_A et du carter P_B de pompe à huile

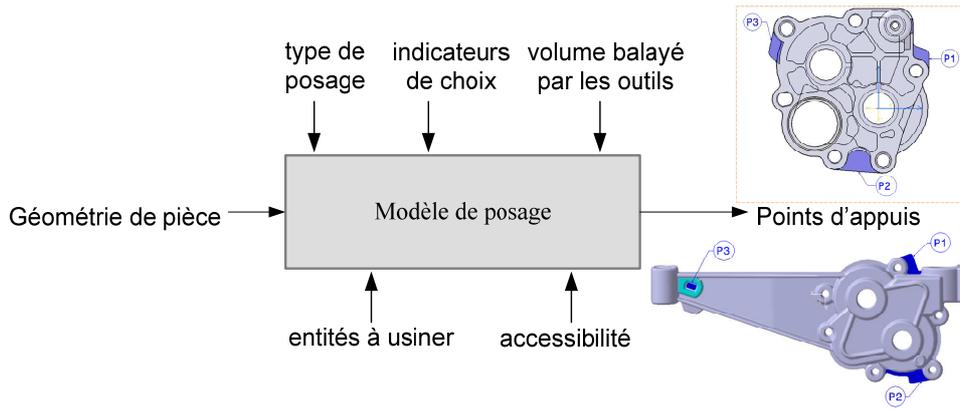


Figure II.12. Modèle du posage.

Le modèle de posage (Figure II.12) se définit de manière quantitative par la modélisation géométrique et qualitative en définissant des indicateurs indiquant les choix de posage en vue de la conception de MOR.

S’agissant des aspects géométriques, il convient de définir un repère $\mathfrak{R}(Pe)$ de mise en position associé au montage d’usinage. Il doit coïncider aux entités brutes concourant à la mise en position de la pièce $\mathfrak{R}(P)$.

Ensuite, le repère de mise en position du porte-pièce $\mathfrak{R}(Ps)$ sur la table (Figure II.13) doit coïncider avec le repère de la palette de la machine-outil ou de la MOR $\mathfrak{R}(Pa)$.

La traduction de ces variations de repère est modélisable au travers de relations matricielles en coordonnées homogènes $\mathfrak{R}(Pe) / \mathfrak{R}(Ps)$.

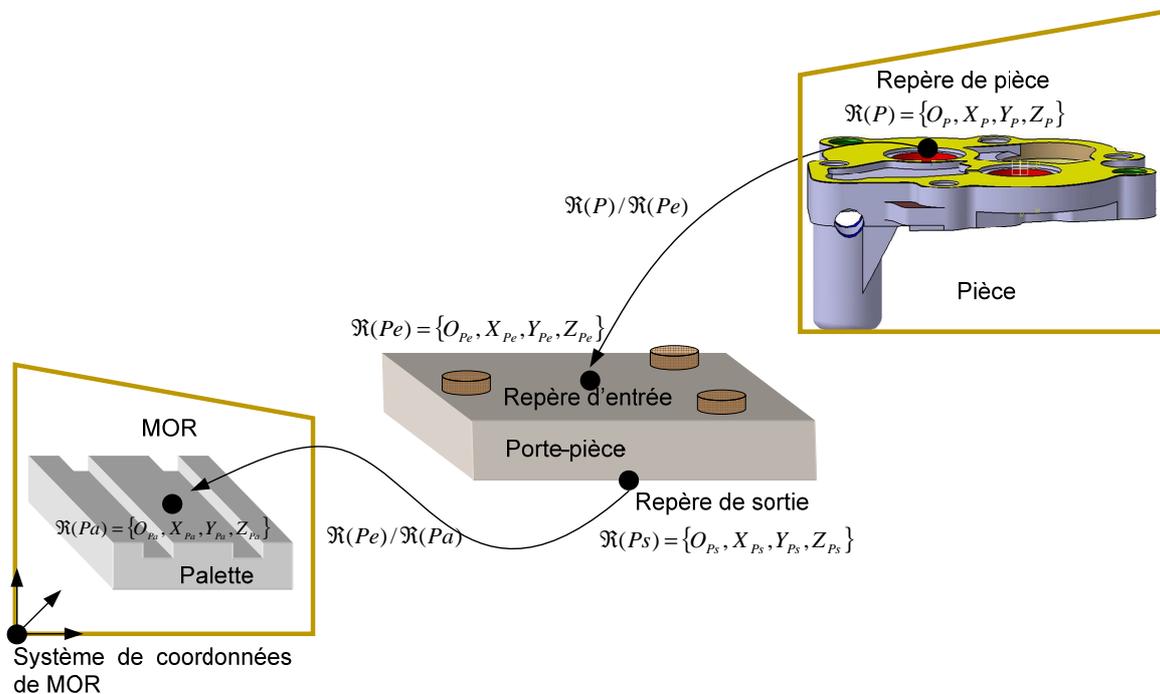


Figure II.13. Mise en coïncidence pièce, porte-pièce et la palette de machine lors d’assemblage.

Concernant les aspects qualitatifs, les indicateurs de choix de posage en vue de la conception de MOR sont :

- Stabilité globale de l'isostatisme (position des trois points d'appui associés à un appui plan et la relation entre la médiane et la médiatrice) ;
- La stabilité locale du contact pièce/montage (nature d'appuis en fonction des surfaces de la pièce);
- Les conditions de reproductibilité et de répétabilité (Cf. fonctions élémentaires en posage).

Avec ces termes, nous pouvons quantifier la capabilité de la mise en position.

II.3.2.2 Bridage

La même démarche de création de géométries de posage est appliquée aux géométries de bridage. Cette fonction est influencée par les techniques d'usinage appliquées à la pièce. Les actions mécaniques en fraisage ou perçage ne se déclinent pas par le même torseur.

Le bridage doit respecter un nombre de fonctions comme :

- L'équilibre statique (s'opposer au propre poids de la pièce) et dynamique (aux effets d'inertie dans le cas de pièces tournantes) ;
- La stabilité des conditions de maintien en position telle que des écarts ou décalages de la position (déplacements ou décollement) de pièce soient minimes en fonction des efforts (points d'application, directions et intensités variables) de coupe des opérations d'usinage ;
- Le respect de la qualité des surfaces obtenues (cf. ci-dessus) telle que le positionnement et le maintien doivent limiter les déformations locales de la pièce occasionnant des défauts macro-géométrique (écarts de position et de localisation des entités) et réduire les vibrations occasionnant des défauts micro-géométriques (stabilité de coupe).

Le modèle de bridage (Figure II.14) présente les activités permettant d'identifier les points ou zone de bridage (C_s) en vue de garantir les risques de collision.

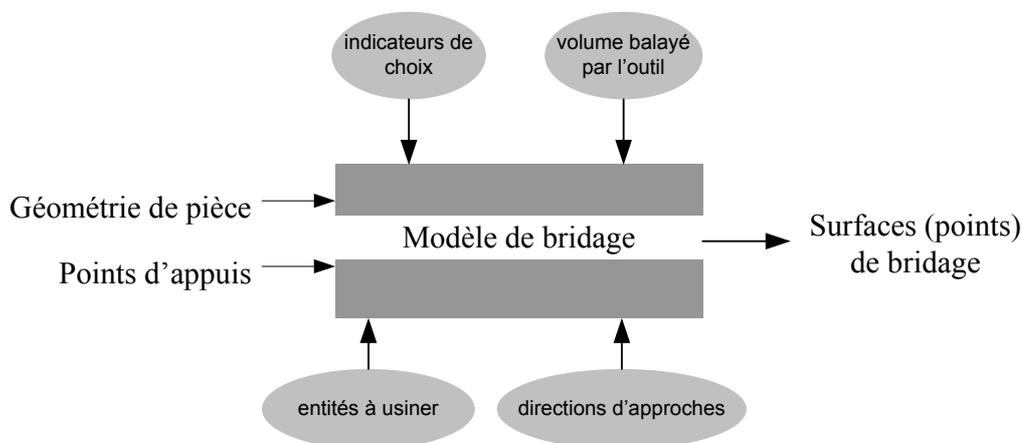


Figure II.14. Modèle de bridage.

Nous introduisons les indicateurs suivants permettant de spécifier le bridage par :

- La caractérisation du torseur des actions mécaniques, par la qualité de placement des brides ;
- Le déplacement et les déformations locales et globales imposés par le serrage ;
- L'accessibilité du ou des systèmes de serrage (gestion des collisions outils/environnement de production).

II.3.2.3 Autres fonctions

Lors de la définition d'un montage d'usinage, on doit respecter trois fonctions essentielles :

- la première concerne le posage et le bridage ;
- la deuxième l'interface entre le montage et la machine-outil ;
- la troisième l'architecture et la structure du montage d'usinage lui-même.

La deuxième fonction relève de la réalisation d'une liaison complète démontable respectant les principes de conception. Cette fonction n'est pas étudiée dans ce mémoire.

Néanmoins, il existe des possibilités d'orienter et localiser le montage d'usinage et en conséquence les pièces montées dans l'espace de travail de la machine-outil soit horizontalement soit verticalement (Figure II.15).

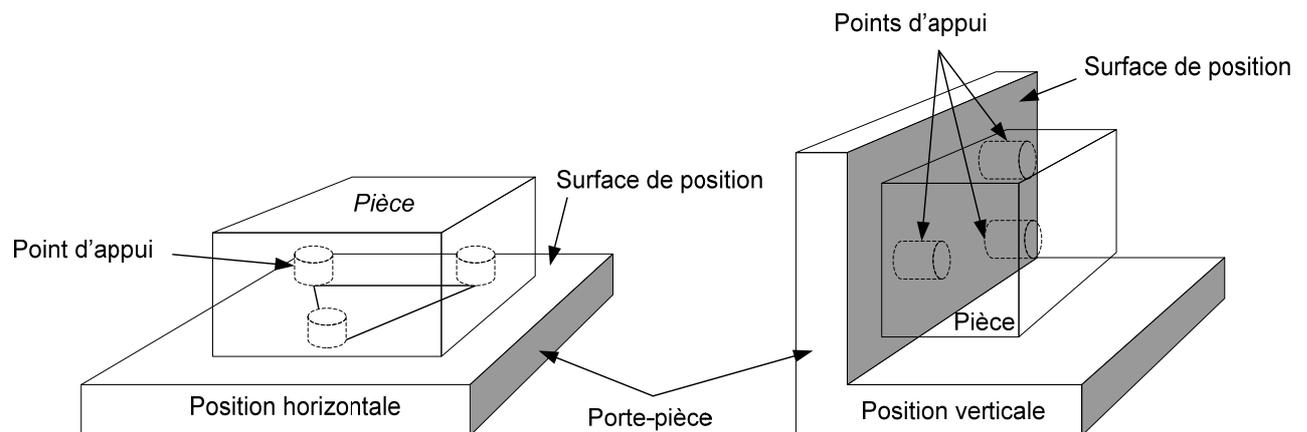


Figure II.15. Types de position.

Quant à la troisième fonction, l'architecture et la structure imposent de définir des contraintes supplémentaires, en particulier en relation avec les directions d'usinage, les volumes de balayage par l'outil et l'accessibilité des entités.

Surtout il est nécessaire de tenir compte de cette contrainte lors de la réalisation d'entité d'usinage ayant des directions d'accès potentielles opposées.

En effet, la trajectoire de l'outil et le volume balayé par celui-ci peut conduire à des risques de collisions avec les composants du montage d'usinage (Figure II.16.a) et à complexifier le montage.

Par exemple, les entités à usiner E_7^A et E_9^A du couvercle P_A (Figure II.16.a) sont usinables selon les directions d'approche Da_{z-} ou Da_{z+} suivant les directions $Z-$ ou $Z+$ successivement.

- exécution selon Da_Z . (Figure II.16.b) impose un espace fonctionnel, en fonction des déplacements des outils de coupe d'après (Z-), ne signale pas aucune collision avec les dispositifs du montage. Un volume fonctionnel de dégagement supplémentaire est à créer entre la pièce et les composants du montage. Par ailleurs, ce dégagement doit tenir compte des obligations d'évacuation des déchets (copeaux et lubrifiant entre autres).
- exécution selon Da_{Z+} (Figure II.16.c), dans ce cas, l'espace fonctionnel, qui est fonction de déplacement des outils de coupe d'après (Z+), signale des collisions avec la base du montage. Nous pouvons éviter ce problème par la réalisation d'un trou, correspondants aux E_7^A et E_9^A dans la base, permettant d'accéder aux entités.

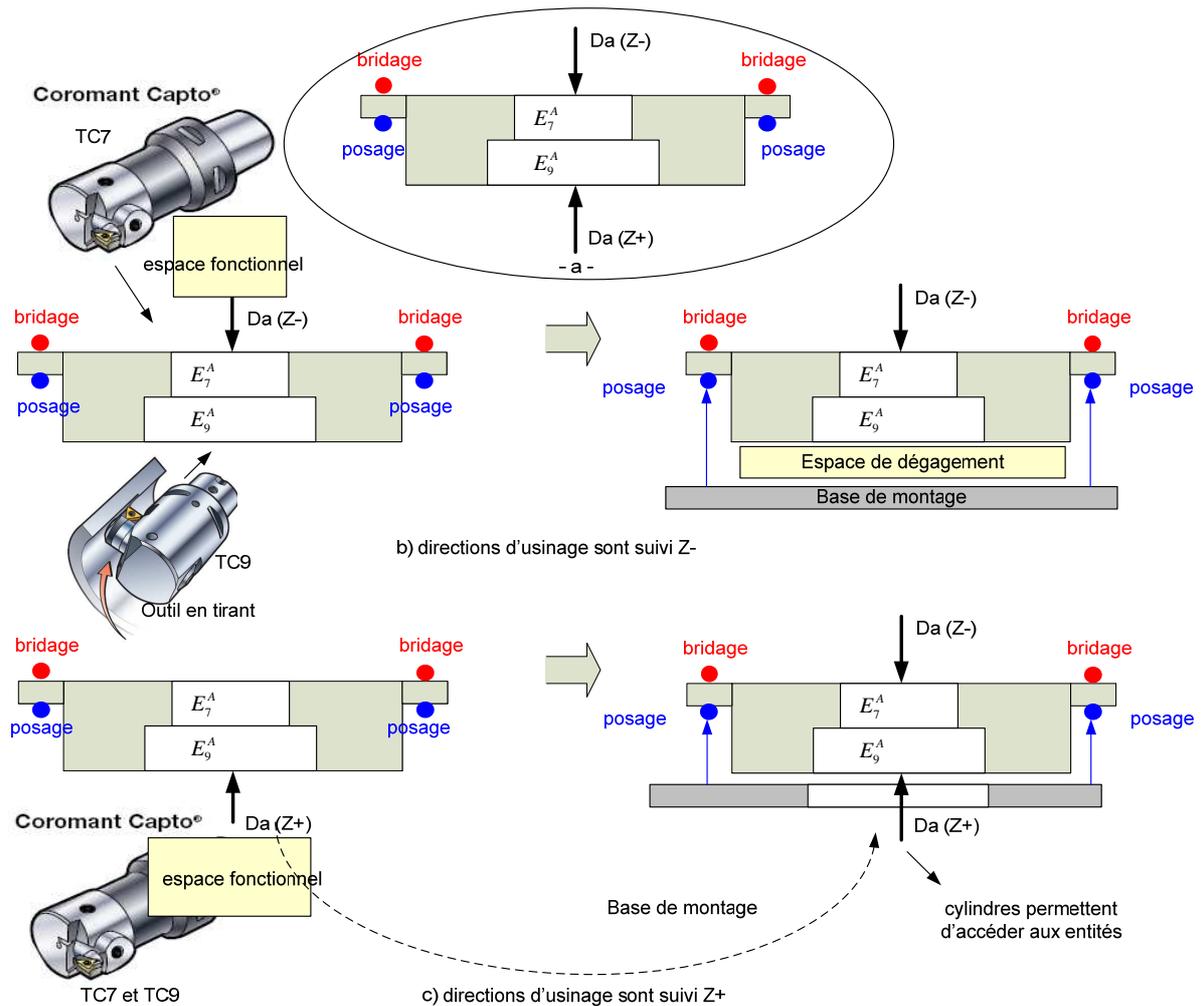


Figure II.16. Montage d'usinage.

La décision du choix entre ces deux solutions à ce niveau n'est pas encore possible (le processus de fabrication approprié à l'usinage est encore inconnu (voir chapitre IV)). Le choix est spécifié en fonction de la détermination du processus de fabrication suivant les contraintes techniques, économiques ou logistiques.

Par ailleurs, des indicateurs concernant les fonctions complémentaires doivent être définis comme [Zirmi, 2006] :

- le caractère de compacité (niveau haut) limitant le volume d'encombrement (espace de tâche de la machine-outil ou MOR) ;
- le caractère (mécanique) de rigidité (niveau haut) limitant les risques de vibration, par ailleurs la compacité réduit aussi ces mêmes risques ;
- aptitude à l'emploi facilitant le montage et démontage de la pièce, l'évacuation des copeaux et des fluides de coupe (réduction des perturbations sur la cadence de production).

A ce stade de l'étude ces critères sont à prendre en compte lors de la conception du montage d'usinage. Néanmoins pour ce qui concerne la conception de la MOR, le critère de compacité est celui qui est indispensable.

II.3.3 Application aux pièces P_A et P_B

Pour le couvercle, le service d'industrialisation, a spécifié déjà trois entités brutes (pour la mise et le maintien en position), L'une est définie par un ajout d'un volume de matière (P_1^A, P_2^A et P_3^A avec C_1^A, C_2^A et C_3^A) placée de façon régulière autour de la pièce (Figure II.17). La seconde entité correspond à un alésage débouchant non usiné (L_1^A). La troisième entité brute (L_2^A) est un alésage non débouchant et non cylindrique de forme oblong. Le couvercle est ainsi positionné par trois points d'appuis P_1^A, P_2^A et P_3^A qui éliminent trois mouvements T_{Z-} , R_x et R_y , localisé par L_1^A et L_2^A qui éliminent T_x et T_y . Le bridage est assuré par les surfaces C_1^A, C_2^A et C_3^A bloquant la translation T_{Z+} .

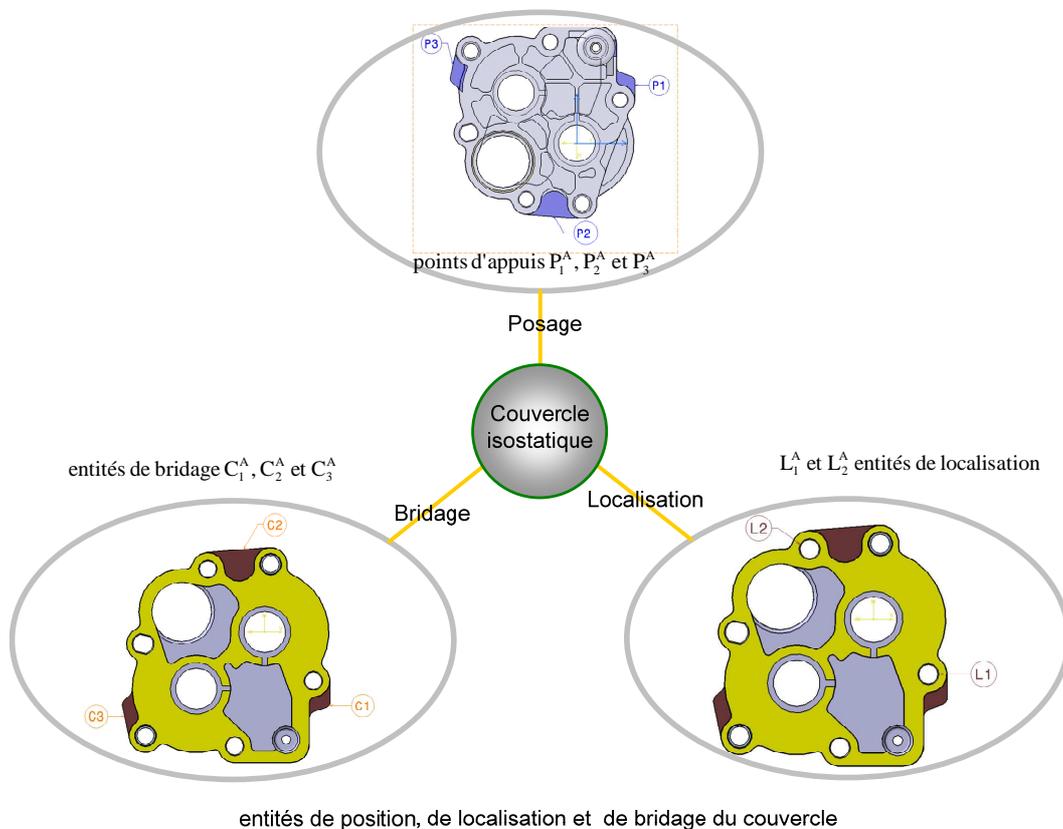


Figure II.17. Entités de posage, de localisation et de bridage du couvercle.

Concernant le carter (Figure II.18), la même méthode est appliquée. La première entité brute est définie par un ajout d'un volume de matière (P_1^B, P_2^B et P_3^B avec C_1^B, C_2^B et C_3^B) placée de façon régulière autour de la pièce (Figure II.18). La seconde entité correspond à un alésage borgne non usiné (L_1^B). La troisième entité brute (L_2^B) est un alésage non débouchant et non cylindrique de forme oblong. Le corps est ainsi positionné par trois points d'appuis P_1^B, P_2^B et P_3^B qui éliminent trois mouvements T_z, R_x et R_y , localisé par L_1^B et L_2^B qui éliminent T_x et T_y . Le bridage est assuré par les surfaces C_1^B, C_2^B et C_3^B bloquant la translation T_{z+} .

La mise en position respecte les indicateurs de stabilité globale et locale. Concernant les critères de reproductibilité et répétabilité, la société qui a industrialisé ces pièces a mis en place ce qu'il appelle la « qualification process » comportant en particulier les modes opératoires, la capacité et la sécurité-ergonomie. Dans le mode opératoire, cette société a conçu un dispositif de mesure de remise en position et bridage évaluant les dispersions de cette opération.

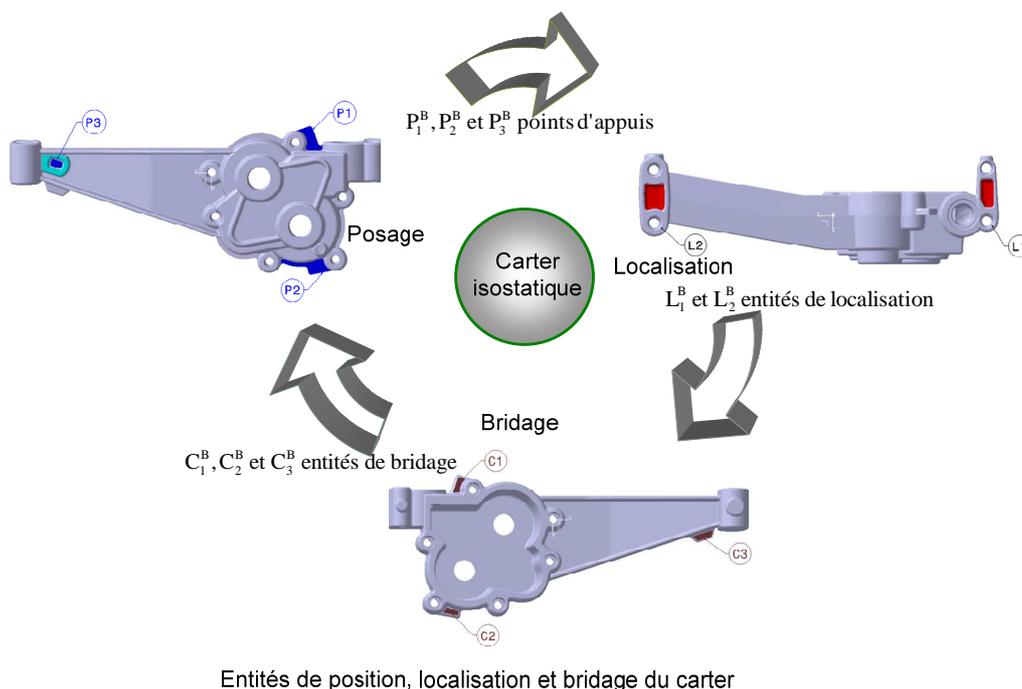


Figure II.18. Entités de posage, de localisation et de bridage du carter.

Concernant le bridage pour le couvercle et respectivement pour le corps de pompe, le gammiste propose d'appliquer les actions mécaniques de maintien aux points C_1^A, C_2^A et C_3^A (Figure II.17) et respectivement C_1^B, C_2^B et C_3^B (Figure II.18). Ce choix répond aux trois indicateurs :

- le placement des brides de serrage (opposé aux appuis plans) fournit une stabilité de maintien en position ;
- Les déformations locales et globales sont négligeables ;
- L'accessibilité est conservée par l'emploi des trois brides.

II.4 Géométrie intermédiaire caractéristique

Afin de définir le volume de l'espace occupé par la pièce et son environnement et ses directions d'accessibilité, le concept de polyèdre caractéristique a été défini pour des applications mécaniques (architecture, figures).

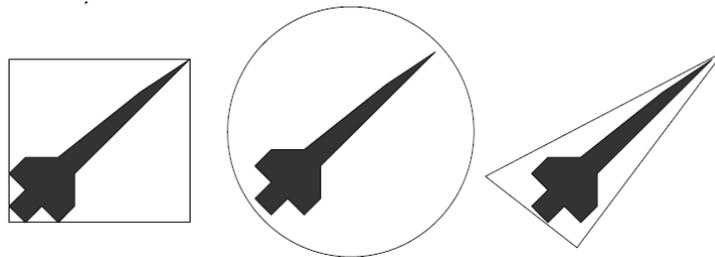


Figure II.19. Exemple de polyèdres convexes

Ce polyèdre peut être complexe et convexe (Figure II.19). Nous reprenons ce concept pour notre domaine d'application afin de définir la géométrie intermédiaire caractéristique de la pièce qui associée dans un objectif de moindre engagement de l'ensemble des paramètres et formes géométriques représentatif de l'encombrement, de l'accessibilité, des surfaces de posage et de bridage. Ces éléments sont des domaines d'entrée pour la conception de l'architecture de la MOR et ils constituent des contraintes pour la re-conception ou l'évolution des produits, dans un concept d'ingénierie collaborative, n'est pas figée.

Aussi par cette approche, nous introduisons la notion géométrie (polyèdre) caractéristique définissant le volume englobant de la pièce à usiner. Il constitue une façon pratique pour regrouper les entités d'usinage en fonction des directions de ces faces. Le polyèdre caractéristique permet de définir les paramètres intermédiaires dans le processus de conception de la MOR.

Dans le cadre de notre application, le polyèdre du couvercle englobe la pièce par six directions (Figure II.20). Le carter de pompe est englobé également par six directions formant le polyèdre caractéristique de celui-ci (Figure II.21).

Nous représentons les caractéristiques d'aspect fonctionnel à l'aide de cette géométrie caractéristique de la pièce et à l'aide du concept de volume d'encombrement. Par exemple la Figure II.20 présente les entités à usiner, les entités de posage, les directions d'approche des outils formalisant l'aspect fonctionnel du couvercle P_A à l'aide du polyèdre caractéristique avec une solution de montage d'usinage.

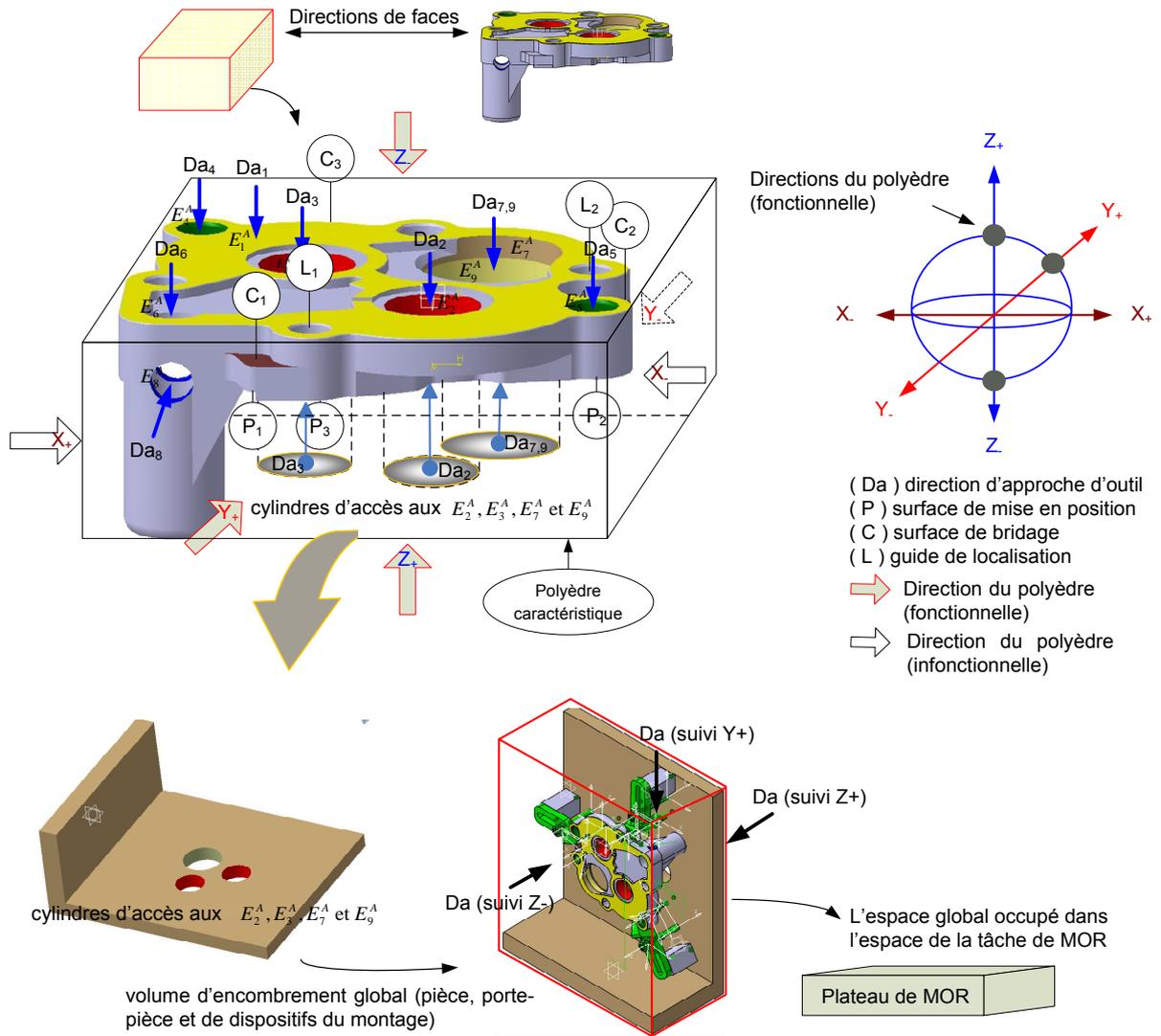


Figure II.20. Géométrie caractéristique intermédiaire du couvercle P_A.

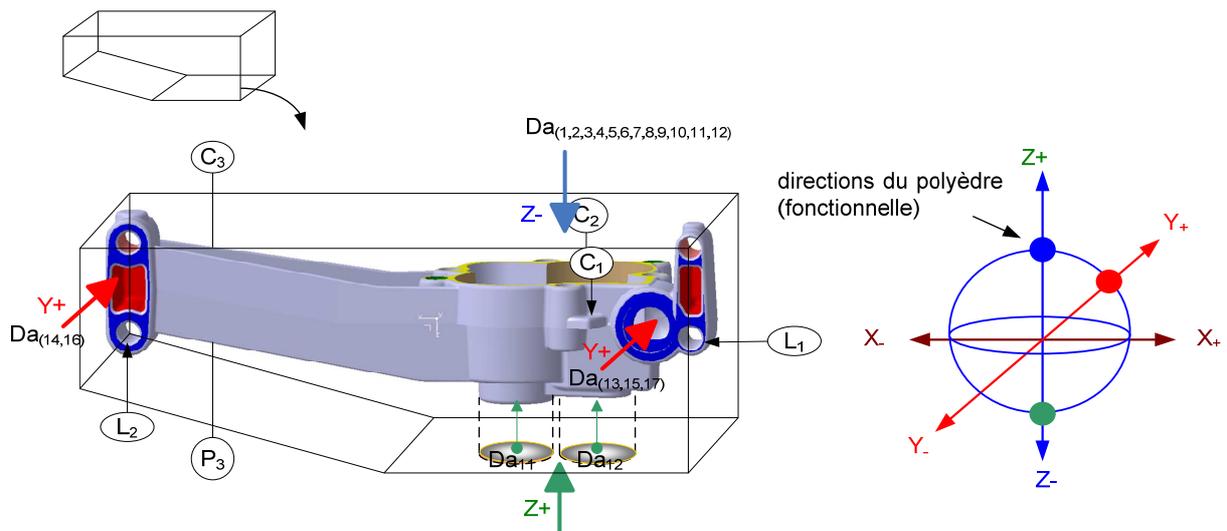


Figure II.21. Géométrie caractéristique du carter P_B.

II.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté des notions utiles et essentielles à notre travail. Elles constituent le point d'entrée pour la conception de la MOR.

Tout d'abord, nous avons introduit le concept d'entité et le recensement des différentes vues de celles-ci. Ensuite, on a caractérisé l'entité d'usinage par des données de description relatives à la représentation interne, externe et à l'usinabilité. À partir de ces données, nous définissons un volume d'encombrement de la pièce et du ou des montages d'usinage pour définir l'espace de tâche, le nombre de broche, les mouvements indispensables pour concevoir la MOR.

Par ailleurs, nous avons défini la géométrie intermédiaire caractéristique qui permet de guider à la détermination de l'architecture de la machine.

III. Chapitre III : Processus, Opérations

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons mis en évidence des notions associées à la description des familles de pièces ainsi que la formulation des données requises à la démarche de création de MOR. Ce chapitre est destiné à mettre en évidence les données indispensables concernant les processus et les opérations d'usinage et en particulier la définition des outils en vue de la simulation virtuelle. En effet, les mouvements des outils pour chaque opération contribuent à la définition des contraintes géométriques et cinématiques lors de la génération de l'architecture géométrique et de la cinématique de la MOR.

Dans ce chapitre, nous proposons un ensemble de modèles et outils en vue de formaliser l'opération d'usinage, les outils de coupe associés, de la gamme sont extraits les processus et opérations d'usinage. A chaque processus est défini un et seul outil de coupe. Les outils portent les caractères géométriques (dimensions, formes...), technologiques (dents, conditions de coupe...). Par ailleurs, l'outil porteur de ces caractères associés aux caractères de l'entité conduit à la détermination des trajectoires d'usinage. Une formalisation des transformations géométriques de l'outil au cours de l'usinage permet de définir des volumes de balayage permettant de définir les mouvements broche et axes pour chaque entité.

De plus, l'utilisation de la CFAO CATIA contribue à visualiser, simuler des processus et opérations ainsi que l'ensemble de ces volumes de balayage.

III.2 Processus d'usinage

III.2.1 Définitions

Pour ce qui nous concerne, la gamme d'usinage que nous définissons correspond de préférence à une liste de processus pour un et unique posage. En effet, les pièces mécaniques réalisées sur les LTD ou SMD voir sur le SMR ou MOR possèdent une gamme usuellement d'une ou deux phases au maximum. Par principe, le posage unique autorise un gain de productivité (aucune manipulation) et un gage de respect des spécifications de fabrication. C'est pour cette raison que la gamme se dissocie par la détermination des processus et opérations d'usinage et les volumes de balayage des outils.

Le processus d'usinage est déterminé pour chaque entité à usiner. Selon P Bourdet [Gama, 1990] un ensemble de définitions est présenté dans cet ouvrage tel que le processus comme « *une suite ordonnée interruptible de séquences d'usinage* » où la séquence d'usinage comme « *une suite ordonnée ininterrompible ou insécable d'opérations d'usinage en vue de réaliser une géométrie donnée* » et enfin l'opération d'usinage comme « *étant le travail d'un outil qui produit une et une seule forme géométrique* ». Pour ce qui nous concerne, le processus d'usinage d'une entité d'usinage est alors une suite d'opérations d'usinage associées aux outils et porte-outils auxquels sont associées des conditions opératoires. Le choix de ce processus d'usinage tient compte de l'évolution de la géométrie de l'entité du brut à la forme fonctionnelle (Figure III.1).

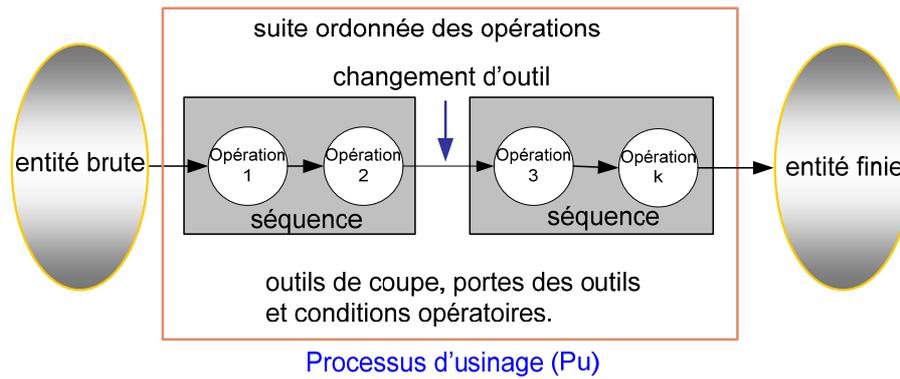
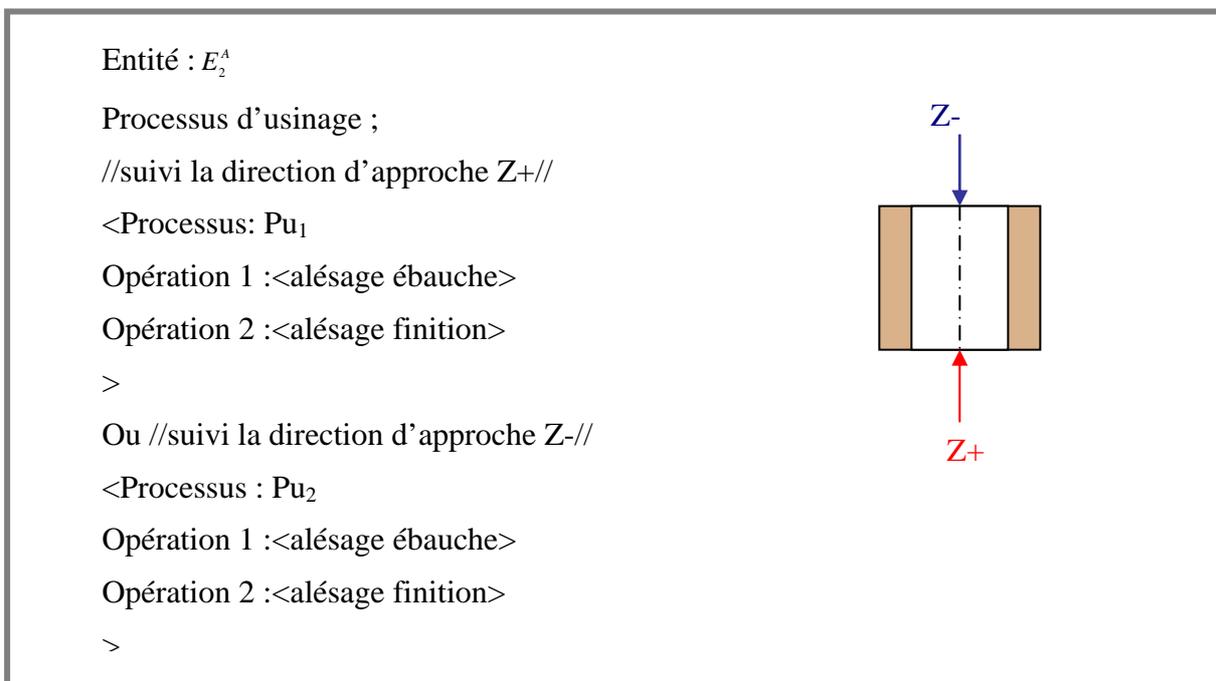


Figure III.1. Processus d'usinage.

Par exemple



III.2.2 Proposition de modèles de représentation du processus d'usinage

Nous désignons le **processus d'usinage par (Pu)** et l'**opération d'usinage** par le symbole (**U**). Ainsi une entité à usiner E_i donnée est le résultat de la fonction de processus associé et sera noté par :

$$E_i = f(Pu_i) \quad (III.1)$$

Où

$$Pu_i = \sum_{k=1}^{k=n} U_{1ei} \wedge M(U_{2ei}) \wedge M^2(U_{3ei}), \dots, \wedge M^x(U_{kei}) \quad (\text{III.2})$$

k : nombre d'opération

ei : symbole d'entité

Si bien que le traitement complet d'une pièce est fonction d'un ensemble des processus d'usinages associés aux entités à réaliser. Il est noté comme suit:

$$P = \sum_{i=1}^{i=n} f(Pu_1, Pu_2, \dots, Pu_i) \quad (\text{III.3})$$

Chaque opération U est mise en œuvre par un outil de coupe (Tc) et réalisée par un ensemble de conditions opératoires (Co). Ainsi,

$$U = f(Tc, Co) \quad (\text{III.4})$$

Nous appelons **volume d'usinage (Vu)** la description fine du volume qui doit être effectivement usiné en vue de la génération d'une entité d'usinage E_i .

Le volume d'usinage (Vu) permet de traduire les caractères intermédiaires associés à la pièce brute et finie. Ces caractères sont définis par les conditions suivantes :

- D'enlèvement de volume de matière ; l'union des volumes d'usinage de ou des entités à usiner d'une famille de pièce. Le volume (P) correspond à l'ensemble des volumes de matière à enlever contenant l'ébauche, la semi-finition et la finition. Le volume (S) correspond au volume brut. Le volume (Vu_{ei}) définit le volume d'usinage de l'entité E_i . Il se définit par :

$$Vu = \bigcup_{i=1}^{i=n} Vu_{ei} = S - P \quad (\text{III.5})$$

- d'interférence d'usinage ; ces interférences correspondent à la différence entre le volume d'usinage (volume enlevé au cours de l'usinage) et la pièce finie (P).

$$Vu \cap P = \phi \quad (\text{III.6})$$

- de réalisation ; un volume de matière à enlever doit contribuer à réaliser la pièce finie (P). Les modalités se traduisent par :

- le volume d'usinage doit contribuer à enlever des matériaux de la pièce brute (S).

$$Vu \cap S \neq \phi \quad (\text{III.7})$$

- le volume d'usinage doit contribuer à réaliser des surfaces fonctionnelles (usinées).

$$\partial Vu \cap \partial P = \partial f \neq \phi \quad (\text{III.8})$$

∂Vu , ∂P et ∂f présentent alors l'enveloppe du volume d'usinage, les surfaces de pièce finie (P) et les surfaces fonctionnelles successivement.

III.2.3 Proposition de modèle d'opérations d'usinage

La description d'une opération d'usinage est fondamentalement liée à la description de l'outil (ou famille d'outils) lors de la définition du processus d'usinage. Le passage du processus d'usinage aux opérations est encore une problématique en soit. Néanmoins de nombreux travaux en la matière [El Maraghy, 1993] [Sabourin et Villeneuve, 1996] [Srinivasan et Sheng, 1999a, 1999b] (Chang 2001) [Tiwari et al, 2001] [Denkena et al, 2007] proposent des méthodologies de détermination et définition d'opérations dans des gammes d'usinage. Concernant les travaux au sein du laboratoire « University of Windsor, Intelligent Manufacturing Systems Centre » dirigé par H. El Maraghy, [Azab et ElMaraghy, 2007, 2009] propose de définir des gammes alternatives et reconfigurables d'usinage à partir d'opérations élémentaires d'usinage (perçage, fraisage...). Ils utilisent le concept de précédence ou d'antériorité en fonction d'un graphe de cotation fonctionnelle en minimisant le nombre de posages et le nombre de changements d'outils.

Nous concernant, la définition de l'opération au travers de l'outil de coupe est indispensable. La définition géométrique associée aux conditions opératoires (vitesse de coupe et d'avance, stratégie d'usinage et trajectoires) permet de définir les volumes balayés lors de l'usinage. Les modes de balayage de l'outil permettent donc de définir la cinématique nécessaire à la MOR. La Figure III.2 présente le module « entité / opérations d'usinage ».

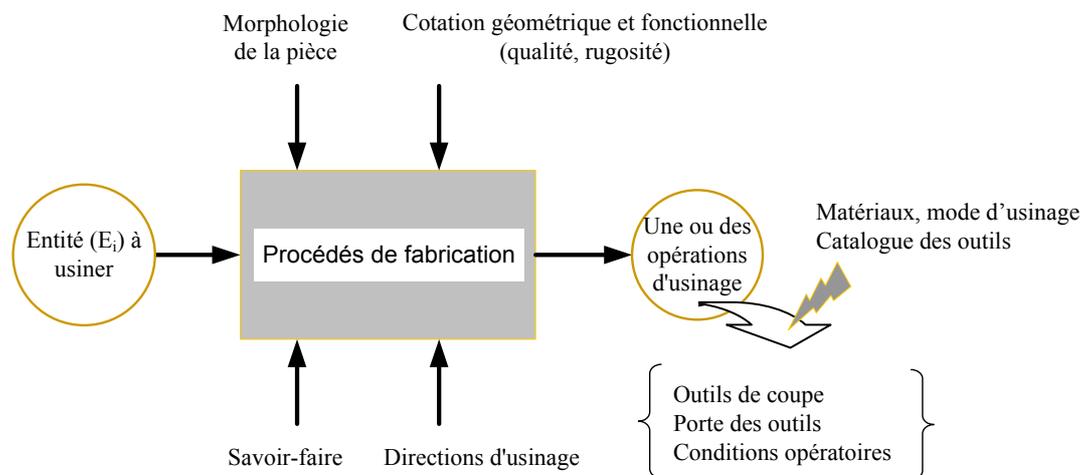


Figure III.2. Module fonctionnel de choix des opérations d'usinage.

III.2.3.1 Définition des outils de coupe

A chaque entité d'usinage est associé un ensemble d'opérations d'usinage. A ce stade et de manière non optimisée, nous associons dans un premier temps un outil à une opération d'usinage. Cette hypothèse est fortement défavorable dans le cadre de la détermination du nombre de broches portant les outils. Néanmoins, il est possible d'effectuer des regroupements d'outils permettant d'associer un outil à plusieurs opérations (principe de moindre engagement lors de l'élaboration d'une gamme d'usinage). L'exemple est envisageable de regrouper des opérations d'ébauche et de finition en modifiant les conditions

de coupe. Il en est de même lors de regroupement d'outils lors d'opérations axiales (perçage-lamage-chanfreinage). Ces regroupements ne changent en rien à la définition de l'outil telle que nous la proposons.

Cependant les données de base relatives à une entité permettant de choisir les outils pour chaque opération sont définis comme suit :

- Le nombre d'opérations d'usinage (ébauche, ½ finition, finition) associée à l'entité E_i ;
- Les spécifications dimensionnelles et géométriques de l'entité E_i (longueur, profondeur, forme, tolérance, rugosité...) ;
- Le mode (opposition, avalant...) et stratégie d'usinage (type de balayage) ;
- Le(s) matériau(x) travaillé(s) ainsi que leurs états mécaniques résiduels.

En vue d'assurer une définition de l'outil et en conséquence son choix, nous nous repons sur les travaux qu'ont effectués [Edalew et al, 2001] présentant une méthode de sélection automatique d'outils.

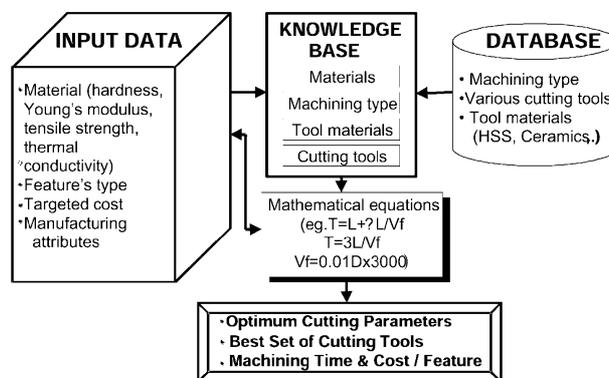


Figure III.3. Exemple de méthode de choix d'outil selon (Edalew et al, 2001).

Nous avons déterminé des caractéristiques dites géométriques et technologiques. Le premier indicateur caractérise la forme et les dimensions de l'outil en relation avec la forme finale à obtenir par rapport à une ou des entités (en mode d'ébauche, ½ finition ou finition). Les caractères géométriques définissant l'outil peuvent être en fraisage par exemple le diamètre, la longueur utile coupante. Ensuite, le second définit les conditions de coupe (sources industrielles et commerciales comme les données catalogue) ainsi que les modes d'attachement (rallonge, extension...). Selon [Wang et al, 2006] les outils de coupe en fraisage sont définis par une enveloppe de types cylindrique, hémisphérique, torique et conique choisies en fonction du processus d'usinage de l'entité.

Nous n'avons pas souhaité détailler d'autres indicateurs dans une première approche. Mais la définition complète de l'outil (partie active, attachement...) géométriquement [Tandon et Khan, 2009] est incontournable en vue de proposer un système de simulation virtuel de l'usinage [Yao et al, 2002, 2006] permettant de vérifier l'ensemble des comportements géométrique, cinématique, dynamique...

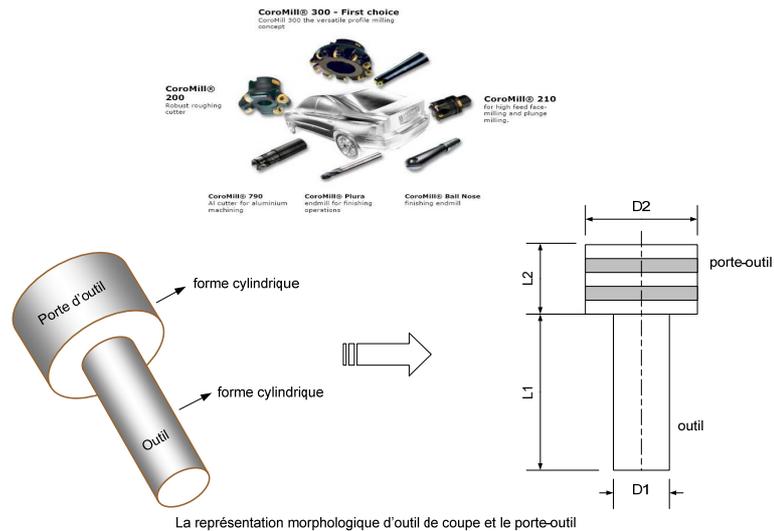


Figure III.4. Volume d'encombrement d'outils de coupe.

La définition de l'outil ne serait pas complète si les différents repères localisant l'outil (partie active et attachement) ne sont pas précisés. La partie active de chaque outil de coupe est définie par un repère $\mathcal{R}(T_c)$. L'attachement (interface broche/outil) est défini par un repère $\mathcal{R}(T_v)$.

$$\mathcal{R}(T_c) = \{O_{T_c}, X_{T_c}, Y_{T_c}, Z_{T_c}\} \quad \text{partie active} \quad (III.9)$$

$$\mathcal{R}(T_v) = \{O_{T_v}, X_{T_v}, Y_{T_v}, Z_{T_v}\} \quad \text{attachement}$$

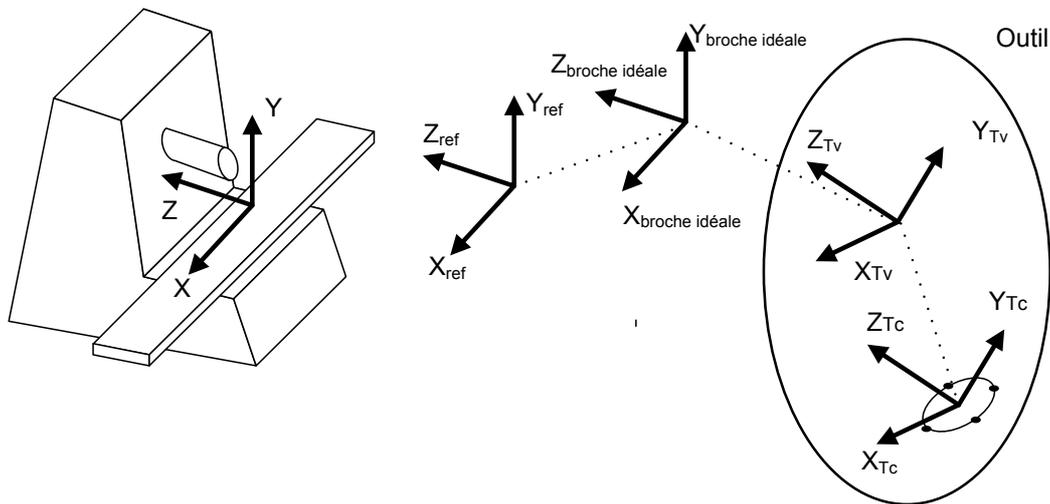


Figure III.5. Repère référentiel d'outil de coupe.

Plus généralement, tous les logiciels CFAO proposent des bibliothèques d'outils génériques. Nous avons modélisé l'enveloppe des outils (partie active et attachement) généralement par des formes cylindriques (Figure III.4).

Le tableau ci après (Tableau III.1) synthétise les résultats des choix d'outil pour chaque opération relative à une ou plusieurs entités opérations concernant les pièces comme le

couvercle et le carter de pompe en prenant en compte, les opérations d'usinage associées aux différentes entités de notre exemple d'application sont spécifiées.

Directions d'usinage éventuelles des entités					
P _A (le couvercle)					
Entités à usiner		Processus d'usinage			
Nom	Types	Direction d'usinage	Opérations d'usinage (U)	Mode d'usinage	Outils de coupe (Tc)
E1	Surface	Z-	fraisage en bout	ébauche U_{1e1}^A	R390-025A25-11H
				finition U_{2e1}^A	R390-025A25-11H
E2	trou débouchant alésé	Z+ W Z-	alésage	ébauche U_{1e2}^A	R429.90-20-040-09-AC
				finition U_{2e2}^A	R429.90-20-040-09-AC
E3	trou débouchant alésé	Z+ W Z-	alésage	ébauche U_{1e3}^A	R429.90-20-040-09-AC
				finition U_{2e3}^A	R429.90-20-040-09-AC
E4	trou lamé	Z-	lamage	finition U_{1e4}^A	R429.90-11-033-06-AC
E5	trou lamé	Z-	lamage	finition U_{1e5}^A	R429.90-11-033-06-AC
E6	trou lamé	Z-	lamage	ébauche U_{1e6}^A	R429.90-11-033-06-AC
				finition U_{2e6}^A	R429.90-11-033-06-AC
E7	trou débouchant alésé	Z+ W Z-	lamage	finition U_{1e7}^A	391.38A-1A-T09A
E8	trou débouchant percé	Y+	perçage	finition U_{1e8}^A	R842-1000-30-A1A 1210
E9	trou lamé	Z+ W Z-	lamage	finition U_{1e9}^A	391.38A-1A-T09A
			lamage	finition U_{1e9}^A	Outils spécifique R825B- AF17STUP0902A
P _B (le carter)					
Entités à usiner		Processus d'usinage			
Nom	Types	Direction d'usinage	Opérations d'usinage (U)	Mode d'usinage	Outils de coupe (Tc)
E1	surface	Z-	fraisage en bout	ébauche U_{1e1}^B	R390-020A20-11L
				finition U_{2e1}^B	R390-020A20-11L
E2	surface	Z-	fraisage en bout	ébauche U_{1e2}^B	R390-020A20-11L
				finition U_{2e2}^B	R390-020A20-11L
E3	trou lamé	Z-	lamage	finition U_{1e3}^B	R429.90-11-033-06-AC
			taraudage	U_{2e3}^B	R217.14C060125AK17N
E4	trou lamé	Z-	lamage	finition U_{1e4}^B	R429.90-11-033-06-AC
			taraudage	U_{2e4}^B	R217.14C060125AK17N
E5	trou taraudé	Z-	taraudage	U_{1e5}^B	R217.14C060125AK17N
E6	trou taraudé	Z-	taraudage	U_{1e6}^B	R217.14C060125AK17N
E7	trou taraudé	Z-	taraudage	U_{1e7}^B	R217.14C060125AK17N
E8	trou taraudé	Z-	taraudage	U_{1e8}^B	R217.14C060125AK17N
E9	demi-cylindre	Z-	alésage	finition U_{1e9}^B	391.38A-2-046 50 088A
E10	demi-cylindre	Z-	alésage	finition U_{1e10}^B	391.38A-2-046 50 088A
E11	trou débouchant alésé	Z- W Z+	alésage	ébauche U_{1e11}^B	R429.90-20-040-09-AC
				finition U_{2e11}^B	R429.90-20-040-09-AC
E12	trou débouchant alésé	Z- W Z+	alésage	ébauche U_{1e12}^B	R429.90-20-040-09-AC
				finition U_{2e12}^B	R429.90-20-040-09-AC

E13	surface	Y+	fraisage en bout	ébauche U_{1e13}^B	R390-020A20-11L
				finition U_{2e13}^B	R390-020A20-11L
E14	surface	Y+	fraisage en bout	ébauche U_{1e14}^B	R390-020A20-11L
				finition U_{2e14}^B	R390-020A20-11L
E15	trou lamé	Y+	lamage	finition U_{1e15}^B	R429.90-08-024-06-AB
E16	trou lamé	Y+	lamage	finition U_{1e16}^B	R429.90-08-024-06-AB
E17	trou lamé	Y+	lamage	ébauche U_{1e17}^B	R429.90-20-040-09-AC Puis R429.90-14-040-09-AC Ou outil spécifique coromant U TM416,20
				finition U_{2e17}^B	
W=ou exclusif					

Tableau III.1. Opérations d'usinage associées aux entités du couvercle et du carter, outils de coupe appropriés.

III.2.3.2 Définition des conditions opératoires

S'agissant des conditions opératoires, ce sont des grandeurs géométriques et cinématiques intervenant dans la coupe des matériaux. A chaque opération d'usinage sont déterminés les paramètres relatifs :

- à la géométrie de coupe (profondeur de coupe (ap) [mm], engagement de coupe (ae) [mm], profondeur d'alésage (de trou) (L) [mm]...);
- aux géométries d'outils (diamètre (D) [mm]), des informations technologiques (nombre de dents (Z)...);
- à la cinématique (avance par dent (fz) [mm], vitesse de coupe (Vc) [m/min]).

Ces conditions de coupe qui sont à renseigner dans les moyens de simulation FAO en vue de calculer par exemple :

- la fréquence de broche (n) [tr/min];
- la vitesse d'avance (Vf) [mm/min];
- les temps d'usinage (t) [sec];
- les puissances de coupe (Pc) [kW].

Pour ce qui nous concerne nous avons utilisé la bibliothèque de Sandvik Coromant (<http://www.coromant.sandvik.com/fr>) pour déterminer les conditions opératoires. Nous avons utilisé ces logiciels dans le but de déterminer les conditions relatives aux opérations d'usinage à partir des paramètres physiques relatifs à l'outil et à l'opération tel que la matière à usiner, la dureté, l'épaisseur du copeau, l'angle d'attaque, la profondeur, etc. Ces conditions figurent comme attributs en vue de la description de l'usinabilité de chaque entité. A l'aide de CATIA, nous avons caractérisé chaque entité par un fichier de données associées à la réalisation de celle-ci (Figure III.6).

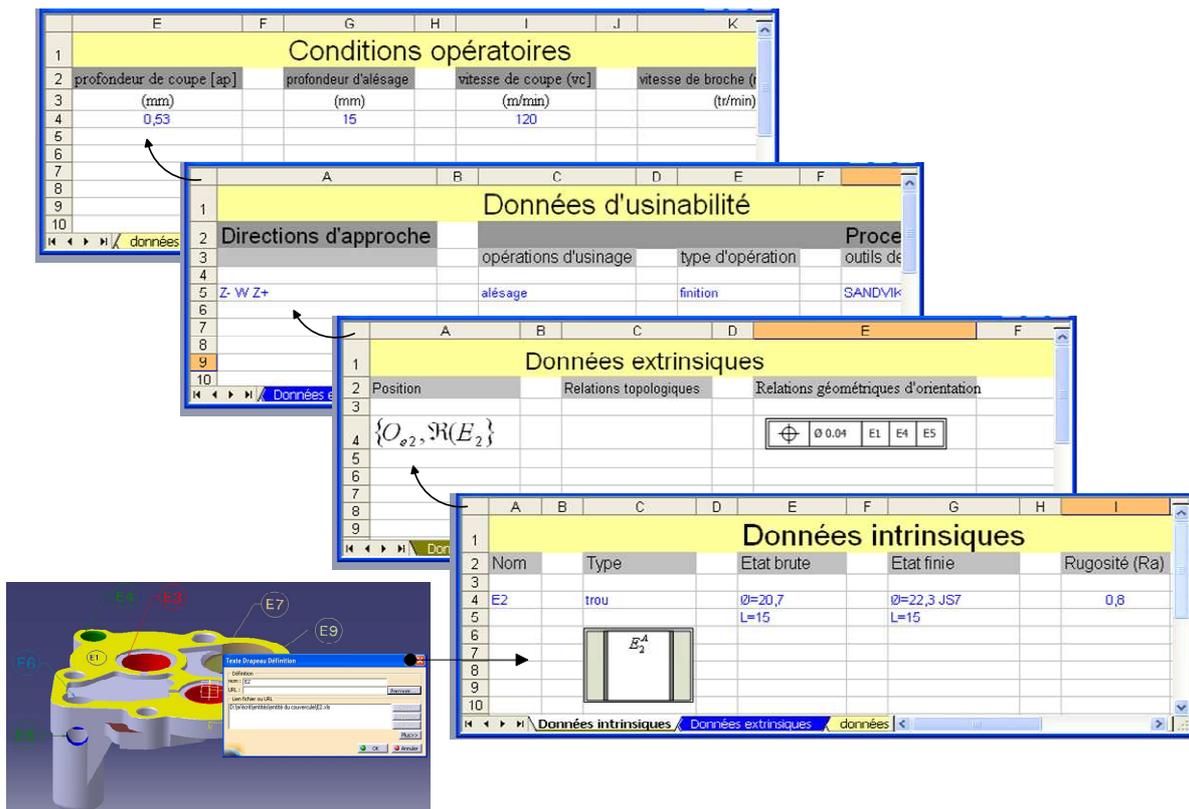


Figure III.6. Modèle de représentation annoncée sur Catia.

III.2.3.3 Cinématique de l'outil (trajectoires)

La spécification cinématique de la MOR est associée systématiquement à la description des mouvements nécessaires à la réalisation des entités. Ces mouvements sont définis par deux conditions cinématiques : le taux de rotation (ou fréquence de rotation de la broche) et la vitesse de déplacement de l'outil dans l'espace de tâche là (mouvement, direction d'avance).

III.2.3.3.1 Hypothèse

Nous nous sommes fixés un champ d'application de conception de MOR destinés à la réalisation de famille de pièce dont la morphologie est principalement de type prismatique. Cette situation conduit donc à des classes de mouvements de broche et d'axes spécifiques. Nous concernant, l'hypothèse est de considérée que le mouvement de coupe est fourni essentiellement par la rotation de la broche et les mouvements d'avance rapide et de travail sont fournis par les axes (linéaires ou rotatifs).

III.2.3.3.2 Typologie de mouvements d'avance

Deux principaux types de mouvements sont à définir pour la MOR. Le premier est le mouvement cartésien PAP (Point à Point) et le deuxième mouvement polaire DAD (Direction à Direction).

Nous appelons **mouvement cartésien PAP** le mouvement de translation d'outil de coupe de O_1 à O_2 , de O_2 à O_3 et de O_3 à O_4 (Figure III.7) ayant la même direction d'approche,

réalisant suffisamment tous types des entités d'usinage 2.5D pour l'usinage prismatique. En effet, la description pratique du mouvement PAP est exprimée en fonction du déplacement d'outil entre deux positions consécutives en gardant la direction d'approche. On a articulé le mouvement de PAP aux mouvements axiaux, radiaux et mixte :

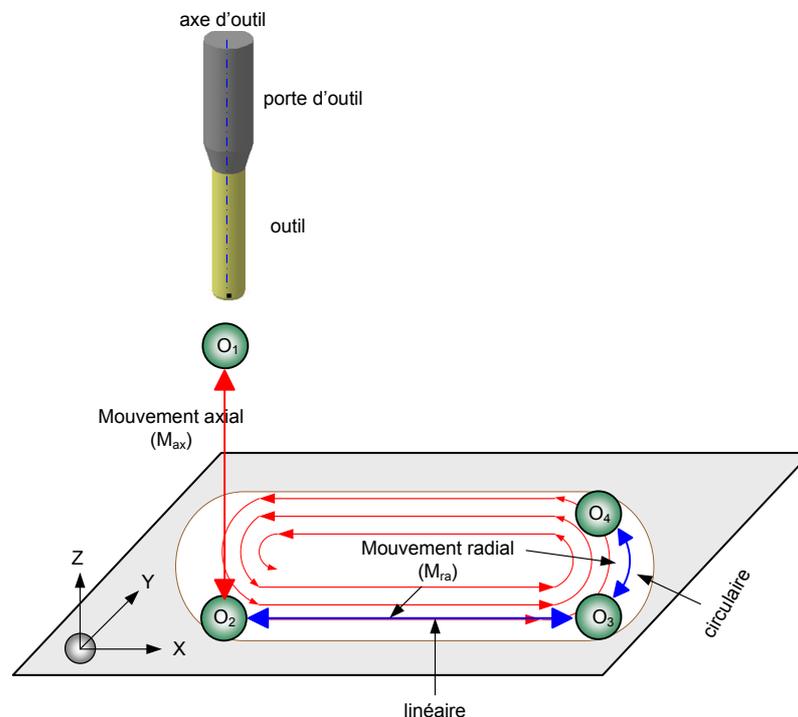


Figure III.7. Mouvement cartésien PAP.

- L'outil se déplace de O_1 à O_2 (Figure III.7) dans la direction de l'axe d'outil. Puisque cette direction est fixée pendant les opérations d'usinage axiales. Le vecteur du mouvement d'outil est régulièrement perpendiculaire de la surface d'usinage et identique à l'axe d'outil. Nous désignons ce mouvement par **mouvement axial** (M_{ax}). Les exemples typiques de ce type du mouvement concernent les opérations axiales telles que perçage de trous et/ou alésage ;
- L'outil de coupe se déplace dans la direction radiale (Figure III.7). Le mouvement radial se traduit par deux types de trajets. Le premier est linéaire de O_2 à O_3 et le deuxième circulaire de O_3 à O_4 (Figure III.7). On désigne ce mouvement par **mouvement radial** (M_{ra}). Les exemples typiques des mouvements (linéaire et circulaire) concernent les opérations de fraisage prismatiques (en bout) tel que le surfacage de l'entité E_1^A du couvercle P_A ;
- Le déplacement d'outil de façon simultanée axiale et radiale définit un nouveau mode de mouvement que nous appelons **mouvement mixte** (M_m). Ce mouvement permet de réaliser des surfaces complexes.

D'ailleurs, nous appelons **mouvement polaire DAD** (Figure III.8), le mouvement de transformation lors de l'évolution de direction d'approche de l'outil dans la direction A (nécessaire à l'exécution des opérations réalisables avec la direction Z) vers la direction B (nécessaire aux autres opérations réalisable avec X). Les exemples typiques de mouvement DAD concernent les axes rotatifs des machines-outils (quatrième et/ou cinquième axe).

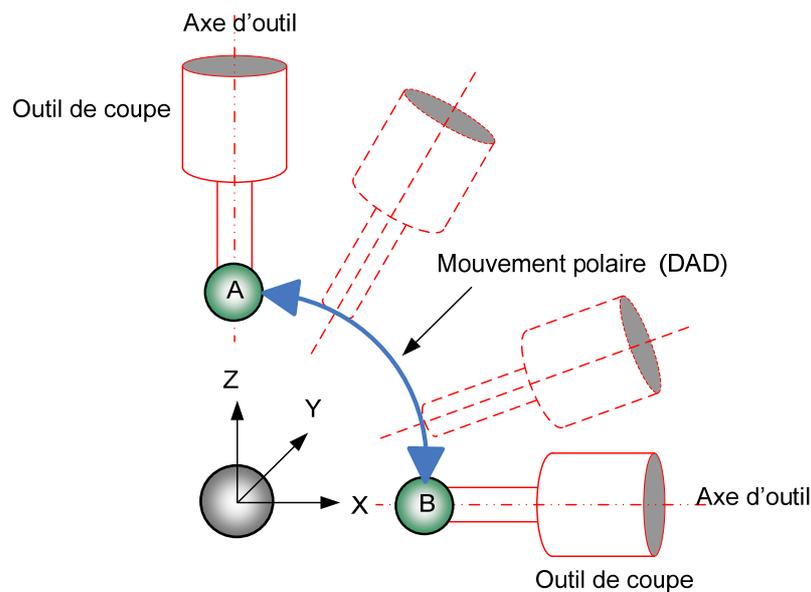


Figure III.8. Mouvement d'outil de coupe DAD.

III.2.3.3.3 Détermination de trajectoires

La définition de la trajectoire d'usinage impose un ensemble de contrôles de façon à réaliser les entités conforme au dessin de définition.

Il existe un nombre de travaux concernant la génération de trajectoires et tout particulièrement avec le nouveau standard qu'est STEP-NC en s'appuyant sur le format de construction géométrique de solide. La détermination des trajectoires est de relever les mouvements indispensables pour réaliser l'entité et identifier les mouvements nécessaires à la MOR.

Nous appelons la trajectoire (T^f) associée aux mouvements successifs nécessaires à l'exécution de l'usinage de l'entité (E_i). Selon la figure ci après (Figure III.9), la description géométrique revient à définir un point de référence de l'outil (repère d'outil $\mathcal{R}(T_c)$) par rapport à l'entité à usiner. La définition des points référentiels attachés à l'outil et également à l'entité à usiner sont:

- Le « point de référence d'outil $\mathcal{R}(T_c)$ » représentant la position et l'orientation d'outil par rapport au repère d'entité à usiner $\mathcal{R}(E_i)$ (parallèlement au repère de la pièce $\mathcal{R}(P)$);
- Le « point d'entrée (Pe) » représentant le point de départ d'usinage d'entité E_i ;
- Le « point de sortie (Ps) » représentant le point de finie d'usinage d'entité E_i .

Les points d'entrée, sortie et de référence d'outil, constituent les caractères permettant au concepteur de MOR de prendre en compte des contraintes de collisions.

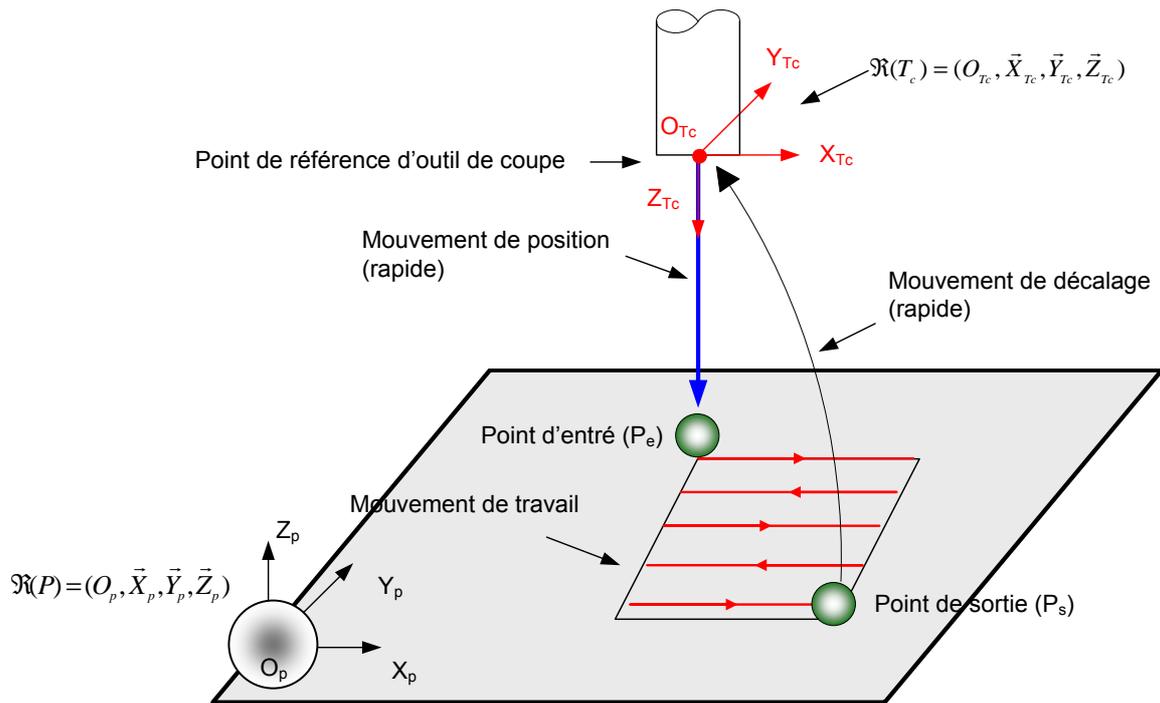


Figure III.9. Points référentiels de trajectoire, mouvement de trajectoire.

La description cinématique revient à définir la transformation géométrique relative au mouvement de l'outil entre les points référentiels O_{Tc} , P_e et P_s en spécifiant les types de mouvements (PAP). Nous appelons ces mouvements :

- Le mouvement rapide (Mr) avec l'information « inactif » ;
 - Mouvement de position présentant la translation d'outil de O_{Tc} à P_e ;
 - Mouvement de décalage présentant la translation d'outil de P_s à O_{Tc} .
- Le mouvement de travail (Mt) avec l'information « actif » présentant la translation d'outil de P_e , à P_s .

III.2.3.3.4 Représentation mathématique de la trajectoire

La représentation de la trajectoire décrivant mathématiquement les parcours d'outil au travers des repères des points référentiels (référence d'outil, point d'entrée et point de sortie) est représenté par la Matrice de Transformation en coordonnées Homogènes (MTH). Selon la figure ci-après (Figure III.10), nous présentons un exemple correspondant à une trajectoire d'alésage d'un trou à l'aide de tête d'alésage à plaquette unique. L'usinage est effectué par un passage d'ébauche et un passage de finition (même outil).

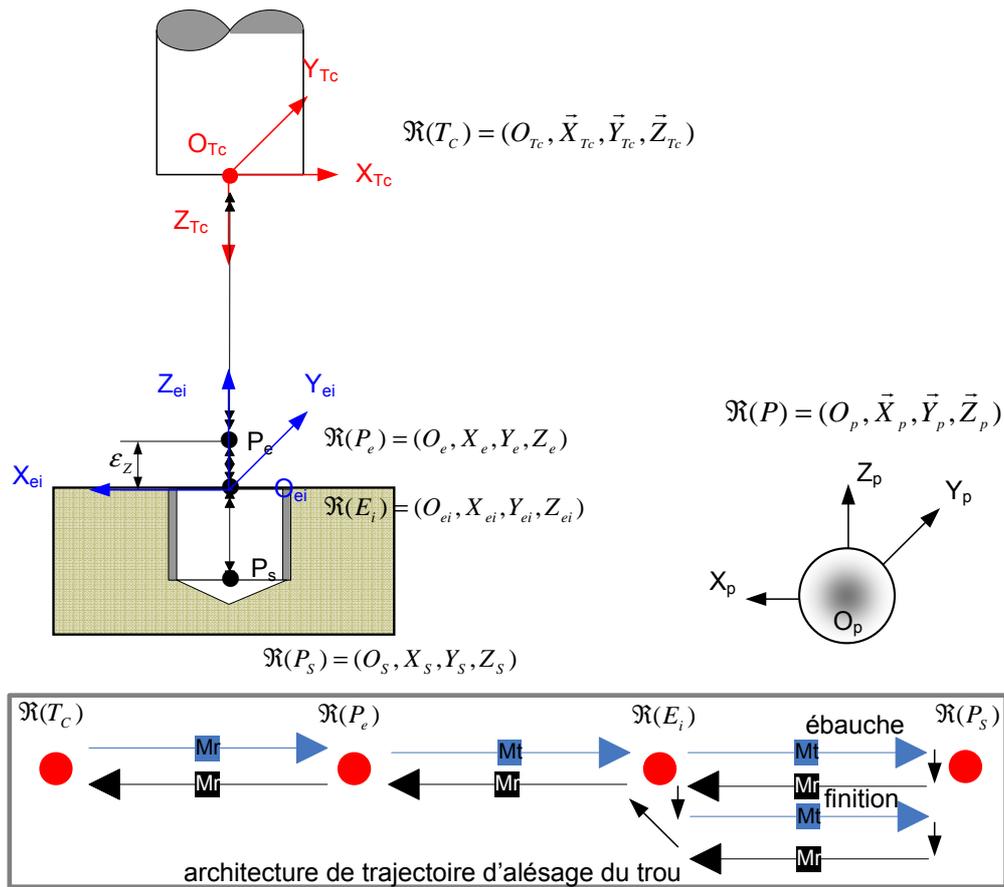


Figure III.10. Trajectoire d'outil : alésage un trou.

Le Tableau III.2 décrit les points caractéristiques de la trajectoire d'outil d'alésage d'un trou défini (Figure III.10).

Mr position de O_{T_c} à P_e	La position de l'outil doit être telle que la trajectoire guidant O_{T_c} en P_e ne produise pas de collision
Mt de P_e à O_{e_i}	On a ménagé une distance de sécurité ϵ_z (environ 0.5-1 mm) par rapport au point de départ d'usinage
Mt de O_{e_i} à P_s	Mouvement de travail réalisant le passage d'ébauche
Mr décalage de P_s à O_{e_i}	Mouvement inversé axial
Mt de O_{e_i} à P_s	Mouvement de travail réalisant le passage de finition
Mr décalage de P_s à P_e	Mouvement inversé axial
Mr de P_e à O_{T_c} (ou à l'entité E_{i+1})	Mouvement décalage

Tableau III.2. Points référentiels de trajectoire d'outil d'alésage de trou représenté en Figure III.10.

La trajectoire est représentée mathématiquement par MTH comme suite :

$${}_{R_i}T^{R_{i+1}} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ pour } (i = 1 \rightarrow n) \tag{III. 10}$$

Ce formalisme permet de décrire la transformation géométrique de l'outil du repère \mathcal{R}_i au repère \mathcal{R}_{i+1} projeté dans le repère \mathcal{R}_{i+1} . Où $R_{3 \times 3}$ présente l'évolution d'orientation de \mathcal{R}_i à \mathcal{R}_{i+1} , tandis que $P_{3 \times 1}$ présente la translation de \mathcal{R}_i à \mathcal{R}_{i+1} .

III.3 CFAO : Outil d'aide à la simulation

III.3.1 Logiciel CATIA

Pour la génération de programme d'usinage d'une pièce (entité/opération/outil), nous nous appuyons sur les fonctionnalités de l'outil de CFAO en utilisant une base de données graphique. En effet, la CFAO (CATIA V5, DELMIA V5...) offre un confort dans la rédaction du programme d'usinage puisque l'utilisation d'une machine 3 axes est alors considérée comme une configuration spécifique de la MOR.

Pour l'usinage d'entités relatives aux pièces prismatiques, l'intérêt d'un tel système de CFAO permet de traiter la majeure partie des opérations à partir d'une modélisation 3D des pièces. Il reste à l'opérateur à définir les opérations d'usinage et leurs paramètres, les outils de coupe avec leurs indicateurs géométriques, les points référentiels de trajectoire (points d'entrée, point de sortie (lors de surfacage), distance de sécurité) et les types de transformations (axiale, radiale...) d'approche et/ou de décalage (dans l'objectif d'éviter les collisions) par macro dans CATIA V5. Ensuite, il est possible de générer automatiquement le code CN en mode interactif (Figure III.11).

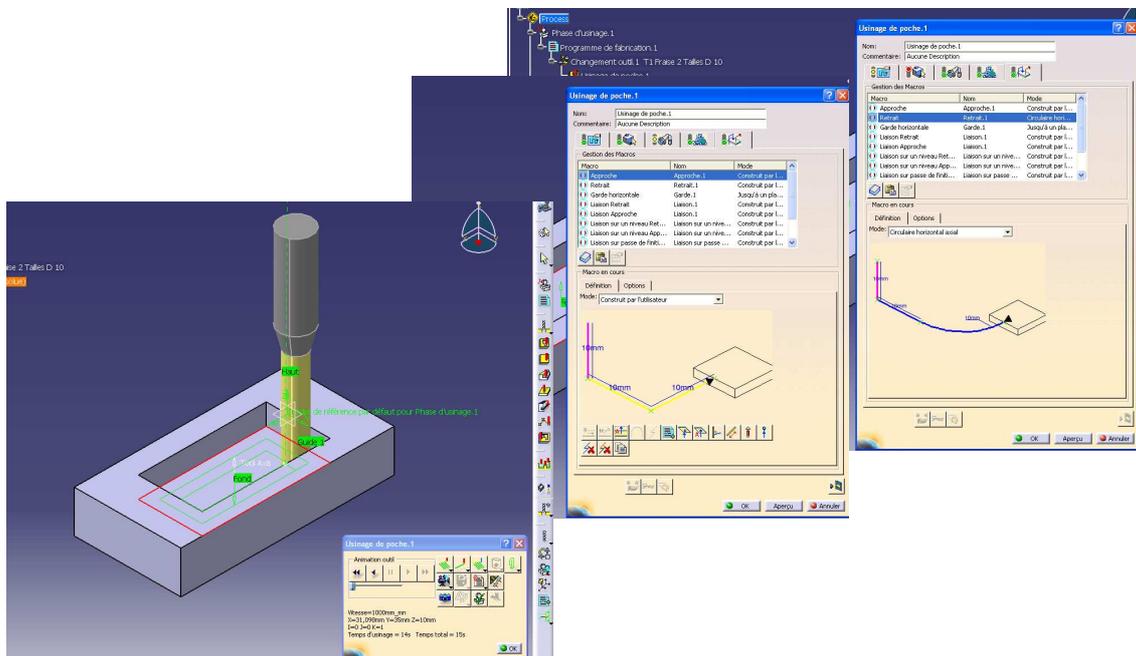


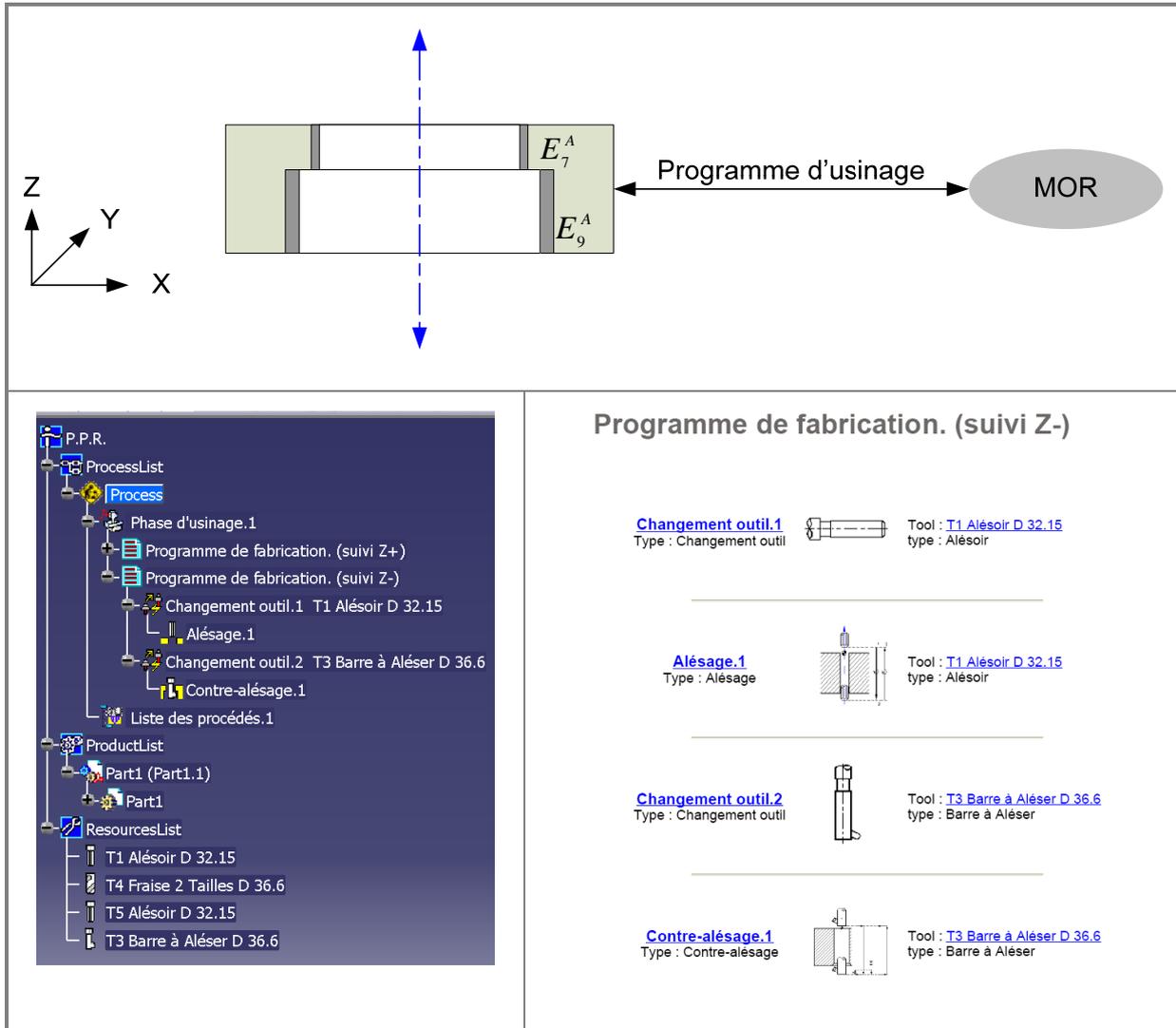
Figure III.11. Génération des trajectoires sur CATIA.

Pour la MOR à type multibroches, nous avons défini pour chaque broche un programme indépendant correspondant au processus de fabrication effectué sur celle-ci. Nous pouvons

ainsi utiliser la programmation automatiquement impliquant l'ensemble de choix chronologiques et technologiques fait par logiciel de CFAO (CATIA).

III.3.2 Exemple d'application

L'exemple ci après est une illustration de la démarche de génération de processus d'usinage et en particulier de définition d'opérations.



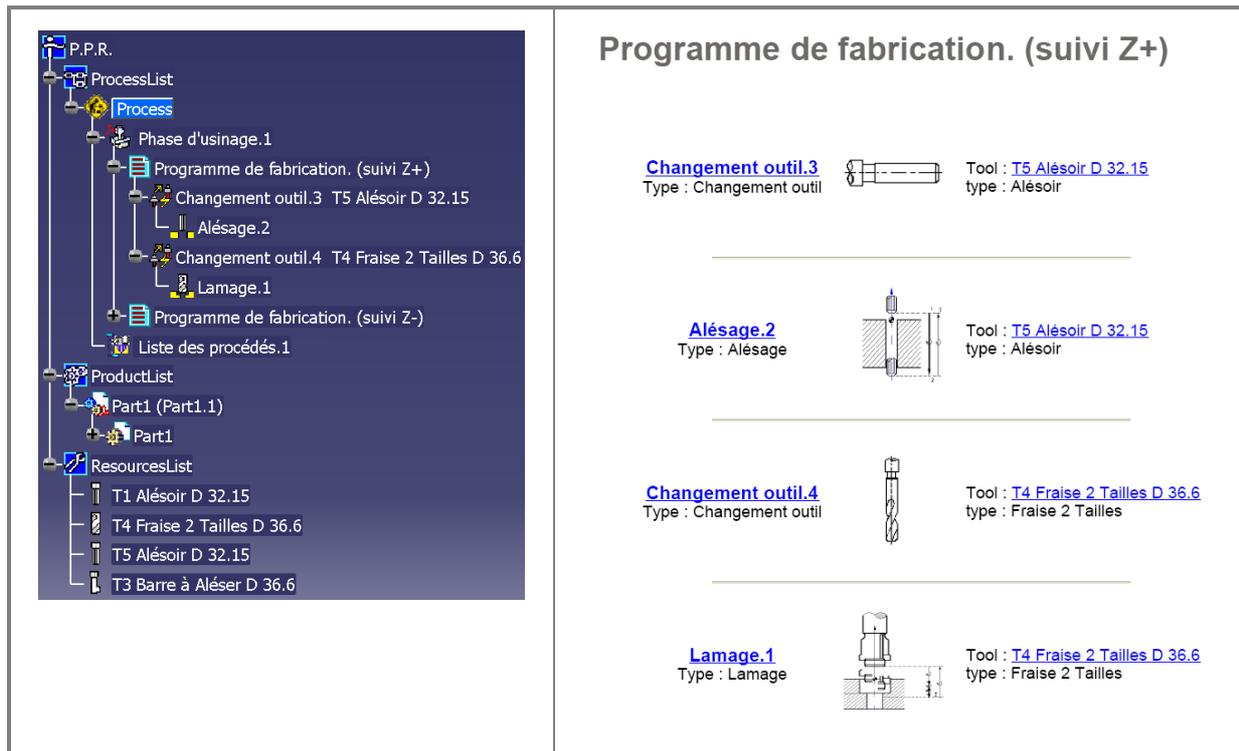


Tableau III.3. Programme d'usinage des entités E_7^A et E_9^A .

Soit les entités suivantes E_7^A et E_9^A du couvercle P_A . Deux réalisations sont possibles selon les directions d'usinage (Z- ou Z+).

En effet, en cas de la direction d'approche d'outil suivi Z-, E_7^A est alésée à l'aide d'un alésoir classique tandis que, E_9^A est réalisée par contre-alésage à l'aide d'alésoir spécifique (barre à alésoir). Par contre, en cas de la direction d'approche d'outil suivi Z+, E_7^A et E_9^A sont alésées à l'aide des alésoirs classiques.

Tableau III.3 représente le programme d'usinage concernant E_7^A et E_9^A selon les directions d'usinage accessibles.

III.3.3 Volume balayé

III.3.3.1 Description

Nous appelons **volume balayé** (V_b) le volume occupé par l'outil tenu en broche de MOR en fonction des trajectoires et des conditions de coupe nécessaires à la réalisation d'une entité E_i .

Pour chaque position d'outil, il est possible de spécifier un contour d'outil, si bien que le mouvement d'outil définit un ensemble de contours représentant le volume balayé créé en fonction de la translation et/ou rotation de l'outil. La Figure III.12 illustre les volumes balayés pour les opérations de translation (Figure III.12.a) et de rotation (Figure III.12.b).

Pour des outils de différents types cylindriques, les silhouettes des mouvements sont présentées par des sections d'outil disposées régulièrement et perpendiculaires à la trajectoire [Kumar et al, 2000].

L'outil de coupe est décrit souvent selon le modèle B-Rep (modèle de représentation de frontière qu'est un modèle 3D solide dans lequel chacun des solides le composant est défini par ses éléments frontières et les surfaces qui en constituent la peau).

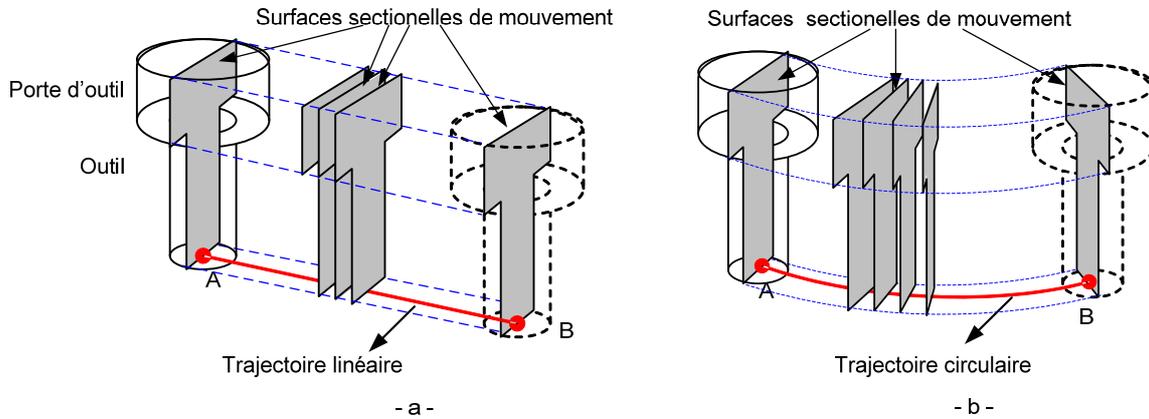


Figure III.12. Silhouettes des mouvements linéaire et circulaire.

III.3.3.2 Génération du volume balayé par l'outil

Pour réaliser la génération de l'enveloppe ou volume de balayage en vue d'identifier les interférences et collisions, il est indispensable de modéliser géométriquement et cinématiquement la machine-outil n axes et l'outil tenu en broche (voir Figure III.13) (balayé du point initial A au point final B).

L'outil est défini selon Abdel-Malek [Malek et Yang, 2005] en respectant leur système de coordonnées (dénote par T_c) comme suite :

$${}^{T_c}\Gamma(u) = [f1(u) \ f2(u) \ f3(u)]^T \tag{III.11}$$

Où $u = [u_1 \dots u_m]^T$, $u_i^L \leq u_i \leq u_i^U$, $i = 1, \dots, m$. L'outil est identifié en respectant le système de coordonnées de la broche (b) par :

$$\begin{bmatrix} {}^b r^u(u) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^b R_{T_c} & {}^b r^{T_c} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{T_c} r^u(u) \\ 1 \end{bmatrix} \tag{III.12}$$

Où

- ${}^b R_{T_c}$ est la matrice d'orientation du système de coordonnées d'outil en fonction du système des coordonnées de broche ;
- Avec ${}^b r^{T_c}$ est le vecteur de l'origine de broche n à l'origine d'outil.

La transformation géométrique de l'outil T_c du point initial A au point final B suivant la trajectoire T^T est réalisée par i axes de la MOR ($i = 1 \dots n$), elle est représentée par une matrice de transformation en coordonnées homogènes comme suite :

$${}^A T^B(v) = \begin{bmatrix} {}^A R^B(v) & {}^A r^B(v) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Où $v = [v_1 \dots v_m]^T$ sont les coordonnées de la trajectoire (coordonnées associées aux axes de transformation).

D'après le travail de Abdel-Malek et Yang [Malek et Yang, 2005], La description géométrique complète du volume balayé est assurée en multipliant l'équation (III.13) par le vecteur de position décrivant l'outil de coupe ${}^b r^u$ équation (III.12) :

$$\begin{bmatrix} \xi(q) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R^B(v) & {}^A r^B(v) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^b R_{Tc} & {}^b r^{Tc} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{Tc} r^u(u) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Où $\xi(q)$ est un vecteur (3x1) de position qui est fonction de la transformation géométrique de A à B (DOF axes de la machine) et des paramètres géométriques de l'outil. A partir de l'équation (III.14), nous pouvons simuler les volumes balayés par les outils.

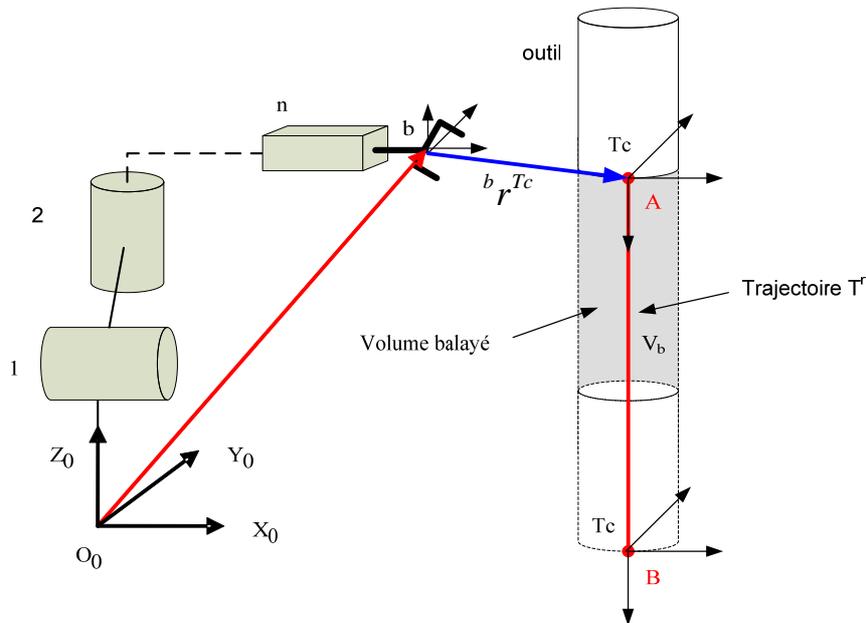


Figure III.13. Volume balayé par un outil de coupe en broche.

Nous nous sommes intéressés à simuler le volume balayé des outils sous CATIA comme moyen de vérification des contraintes d'interférences ou de collisions. CATIA facilite la simulation et permet de fournir pour chaque outil le volume balayé au travers des trajectoires et conditions opératoires imposés.

Par ailleurs, il reste à la charge d'un concepteur de définir les trajectoires et les paramètres dimensionnels des outils de coupe requis. La Figure III.14 présente le volume balayé lors de l'usinage d'une poche fermée par des trajectoires simples (allers-retours).

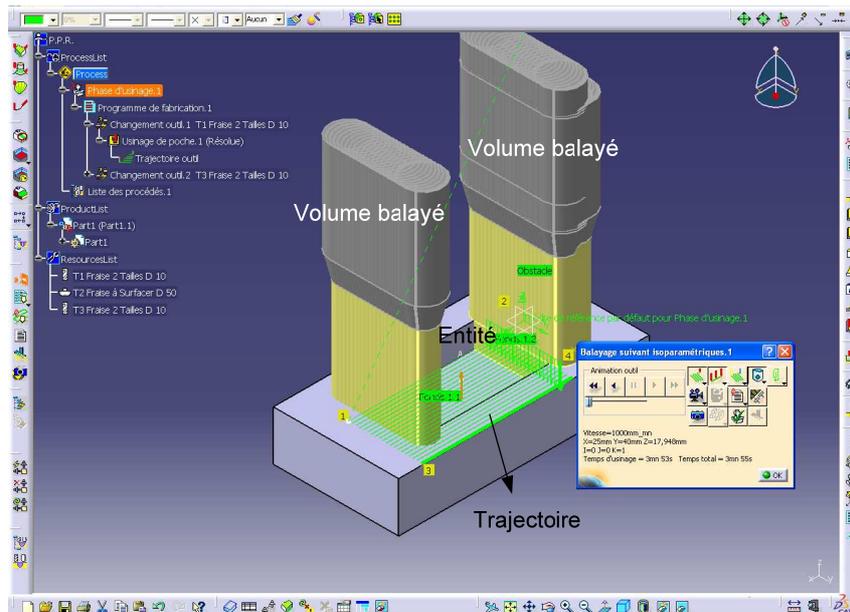


Figure III.14. Vue de volume balayé simulé par CATIA.

III.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons traité deux aspects liés à la réalisation des entités d'usinage auxquelles est associée la définition des opérations d'usinage en vue de préparer la conception de MOR.

Tout d'abord, l'usinabilité ou la fabricabilité des entités par la MOR, des données requises à l'usinage de chaque entité (directions d'usinage, processus, opérations d'usinage, outils de coupe, porte-outils et conditions opératoires). Ces données doivent être assurées par la MOR.

Concernant les aspects cinématiques, nous avons proposé une représentation des mouvements des outils de coupe lors de l'usinage permettant aussi de générer toutes les trajectoires nécessaires à l'exécution des entités 2.5D et qui doivent être assurées par MOR.

Par ailleurs, les trajectoires d'usinage sont identifiées selon deux aspects :

- la description des différents repères (point générateur de l'outil) par rapport à l'entité à usiner (point d'entrée et point de sortie) ;
- la description cinématique qui revient à la transformation géométrique que doit suivre l'outil entre les points référentiels. Ainsi, les mouvements des outils de coupe lors de l'exécution des entités sont définis par un ensemble des points de contrôle.

Enfin, nous avons présenté et formalisé les volumes balayés lors des mouvements des outils (à partir de la définition géométrique des outils et les trajectoires). La définition des volumes balayés est une fonction essentielle requise pour identifier les interférences ou collisions des outils avec l'environnement.

**IV. Chapitre IV : Processus de
fabrication, Architecture
géométrique et cinématique,
Configuration et Reconfiguration**

IV.1 Introduction

Au cours de deux chapitres précédents, la description des tâches à effectuer par la MOR a été présentée avec une description de types géométriques (entités, mise en position, directions d'approche...), technologiques (processus d'usinage, opérations, outils de coupe, conditions opératoire) et cinématiques (mouvements des outils, trajectoires, volume balayé), définissant pratiquement les tâches qui doivent être réalisées pour usiner une famille de pièces. Pour réaliser ces tâches, il est nécessaire de proposer et de disposer des solutions d'architecture puis de configuration et reconfiguration de MOR.

Dans ce chapitre nous nous intéressons donc à :

- créer les solutions d'architecture de MOR répondant à la fabrication de la famille de pièces ;
- choisir la solution pertinente en fonction d'indicateurs relatifs à la productivité, aux charges financières ;
- définir la reconfiguration de MOR ne répondant qu'aux demandes de clients et/ou de marché présent et futur.

IV.2 Contraintes de fabrication

IV.2.1 Contraintes d'antériorité

Les contraintes d'antériorité ou les critères d'antériorité d'usinage des opérations permettent de définir la séquentialité à suivre dans le processus de fabrication afin de satisfaire des contraintes dimensionnelles, géométriques et matériaux liées aux technologies d'usinage utilisées. Par exemple, il n'est pas possible de tarauder un trou sans l'avoir percer auparavant. Dans ce cas, l'opération de perçage d'un trou est dite alors « antérieure » à l'opération de taraudage du même trou. Les contraintes d'antériorité tiennent compte des stratégies d'usinage lors des intersections d'entités, de l'existence de l'usinage en ébauche, demi-finition et finition, *etc...* L'ordre dans lequel vont être réalisées les opérations d'usinage a une influence sur la qualité de la pièce, il faut donc en tenir compte lors de la création de contraintes d'antériorité.

Le problème de définition de la séquentialité d'usinage a été traité par Villeneuve et Sabourin [Villeneuve, 1990, 1995] dans le cas de pièces prismatiques et Anselmetti [Anselmetti et al, 1995, 1996] dans le cas de pièces axisymétriques, le tout à partir des contraintes et des règles de fabrication. Villeneuve dans ses travaux a proposé un modèle « Génération Ascendante de Processus et de Carte de Visite Séquence » qui représentent précisément une formalisation des connaissances de processus de fabrication et permettant l'obtention de processus d'usinage possibles d'une entité (entités d'usinage alésage) en partant de son état géométrique fini et en remontant par étapes successives d'usinage jusqu'à son état brut. [Sabourin, 1995] a présenté une validation d'une méthodologie d'analyse de pièce en vue de l'assistance à la création de la gamme pour toutes les opérations d'usinage par outils tournants sur pièces de morphologie essentiellement prismatique. La démarche présentée repose sur une définition de mode opératoire des entités d'usinage par l'expression des connaissances métiers sous forme

de tâche et de règles de production et également sur le séquençement des opérations d'usinage en utilisant une stratégie de planification sous contraintes (issues de l'analyse des spécifications géométriques et des relations topologiques définies entre les différentes entités et des possibilités cinématiques). Par ailleurs, D'Acunto et Martin [Cordebois, 2003] ont proposé des exemples de règles métiers en fonction des contraintes géométriques et topologiques.

IV.2.1.1 Interaction topologiques

Nous retrouvons deux types d'interactions topologiques (fonctions des relations topologiques) : (i) la réalisation de l'entité E_i impose la réalisation préalable de l'entité E_j ; ou bien (ii) la réalisation de l'entité E_i impose la réalisation de l'entité E_j par type d'opération (selon D'Acunto et Martin [Cordebois, 2003]).

La 1^{ère} règle propose des alternatives concernant les opérations d'usinage assurées par et sur une broche dans le cas de la réalisation d'entités et impose également des alternatives entre les broches dans le cas de la réalisation d'opérations effectuées par des broches différentes (deux broches par exemple). Si bien qu'elle traduit la temporalité et exclut la simultanéité d'usinage (sur la broche et entre les broches de la MOR à type multibroches).

Type des entités	Interaction topologique	Contraintes	Règles métier
Surface plane E_i et alésage E_j	Commence-sur	Si E_j commence sur E_i	Réaliser ébauche de E_i avant ébauche de E_j
		Si E_j commence sur E_i et si Ra de $E_i < 1.6 \mu m$	Réaliser ébauche de E_j avant finition de E_i
	Débouche-sur	Si E_j débouche sur E_i et le brut de E_i incliné/ E_i	Réaliser E_i avant E_j
		Si E_j débouche sur E_i et le brut de E_i incliné/ E_i et le brut de E_i est perpendiculaire à E_j	Réaliser E_j avant E_i
Alésage E_i et E_j	Débouche-dans	Si E_i débouche dans E_j et qualité de $E_j \leq 7$ ou $Ra \leq 1.6 \mu m$	Réaliser finition de E_i avant de finition de E_j
		Si E_i débouche dans E_j et les diamètres sont équivalents	Réaliser E_j avant E_i
		Si E_i débouche dans E_j et $E_i \ll E_j$	Réaliser E_i avant E_j
	Sécants	Si les diamètres sont équivalents	Réaliser l'alésage le plus long ou le plus précis avant l'autre

Tableau IV.1. Exemples de règles en fonction des contraintes topologiques [Cordebois, 2003].

Le Tableau IV.1 d'après D'Acunto et Martin [Cordebois, 2003] présente des exemples des règles métiers en fonction des interactions topologiques.

IV.2.1.2 Interactions géométriques

Nous spécifions les interactions géométriques à partir des relations géométriques identifiées entre les entités. Les interactions géométriques se représentent à partir des règles métiers et se

définissent quand des entités sont liées à d'autres entités par des relations géométriques. Nous distinguons les interactions géométriques par les relations suivantes.

- l'entité E_i présente des données géométriques (perpendicularité, parallélisme, position...) requises à la réalisation de l'entité E_j ;
- l'entité E_i et l'entité E_j ont une ou des faces communes [Liu et Wang, 2006] ;
- l'entité E_i et l'entité E_j ont des intersections volumiques [Liu et Wang, 2006] ;
- l'entité E_i et l'entité E_j imposent des précisions différentes.

Les règles ci-après imposent obligatoirement des usinages alternatifs, tandis que la 4^{ème} règle impose la réalisation séquentielle des opérations d'usinage effectuées par et sur une broche. Le Tableau IV.2 présente des règles métiers correspondants aux interactions géométriques.

Type des entités	Interaction géométrique	Contraintes	Règles métier
surfaçage E_i et alésage E_j	relations d'orientation	Si E_j est perpendiculaire avec E_i	Réaliser finition de E_i avant finition de E_j
alésage E_i et alésage E_j	données de précision	Si E_i est un alésage et E_j est également alésage et E_i est plus précis que E_j	Réaliser finition de E_j avant finition de E_i
		Si E_i et E_j ont la même précision et E_i est plus long que E_j	Réaliser finition de E_i avant finition de E_j
poche E_i et poche E_j	face commune	Si les entités E_i et E_j ont une face commune et E_i a une taille et/ou profondeur maximal	Réaliser ébauche de E_i avant ébauche de E_j
rainure E_i et rainure E_j	intersection	Si E_i et E_j ont une intersection volumétrique et E_i a une coupe est plus grande profondeur que du E_j	Réaliser ébauche de E_j avant ébauche de E_i

Tableau IV.2. Exemple des règles en fonction des interactions géométriques.

IV.2.1.3 Interactions logiques (fabrication)

Nous retrouvons cinq types des contraintes correspondent aux interactions de fabrication comme suit :

- les opérations d'usinage peuvent être effectuées sur la même broche sous condition d'entités indépendantes E_i et E_j ayant des processus dépendants (orientation par exemple) ;
- la réalisation de l'entité E_j modifie (partiellement ou complètement) les caractéristiques exigées pour usiner une autre entité E_i , réaliser E_i avant E_j ;
- les entités E_i et E_j peuvent être réalisées par le même processus à condition que les opérations et les types d'outils soient identiques ;
- optimisation des transferts des outils ;
- les opérations d'usinage peuvent être effectuées sur des broches différentes sous condition d'entités indépendantes E_i et E_j ayant des processus interdépendants.

La première règle est une contrainte de la séquentialité d'usinage dans le cas nous utilisons une et unique broche où l'entité ayant le volume d'usinage plus grand impose l'antériorité, et est également une contrainte de la simultanéité dans le cas d'utiliser une broche multiple (E_i et E_j réalisées par des opérations axiales, disparition de collisions). La 2^{ème} règle impose

obligatoirement la séquentialité. Tandis que, 3^{ème} et 4^{ème} règles proposent des alternatives afin de réduire des temps d’usinage (éviter de changement des outils, optimisation des transferts). La 5^{ème} règle conduit à la possibilité d’utilisation (fonction) des broches en façon simultanée (Tableau IV.3).

Type des entités	Interaction logique	Contraintes	Règles métier
Entité E _i et E _j	Volume d’usinage	Si les entités E _i et E _j sont indépendantes avec des processus d’usinage dépendant (orientation par exemple), alors E _i et E _j peuvent être réalisées sur la même broche et le volume d’usinage E _i est plus important que E _j	Réaliser ébauche de E _i avant ébauche de E _j
		Si l’entité E _j détruit des données exigées pour usiner une autre entité E _i	Réaliser ébauche et finition de E _i avant ébauche et finition de E _j
	Changement des outils	Si E _i et E _j sont réalisées sur la même broche, et en fonction de mêmes types des outils	Ebauches et finitions des E _i et E _j sont réalisées successivement
		Si les entités E _i et E _j sont indépendantes réalisées sur des broches différentes	Possibilité de simultanéité des broches

Tableau IV.3. Exemple des règles en fonction des interactions de fabrication.

IV.2.1.4 Simultanéité et séquentialité des opérations

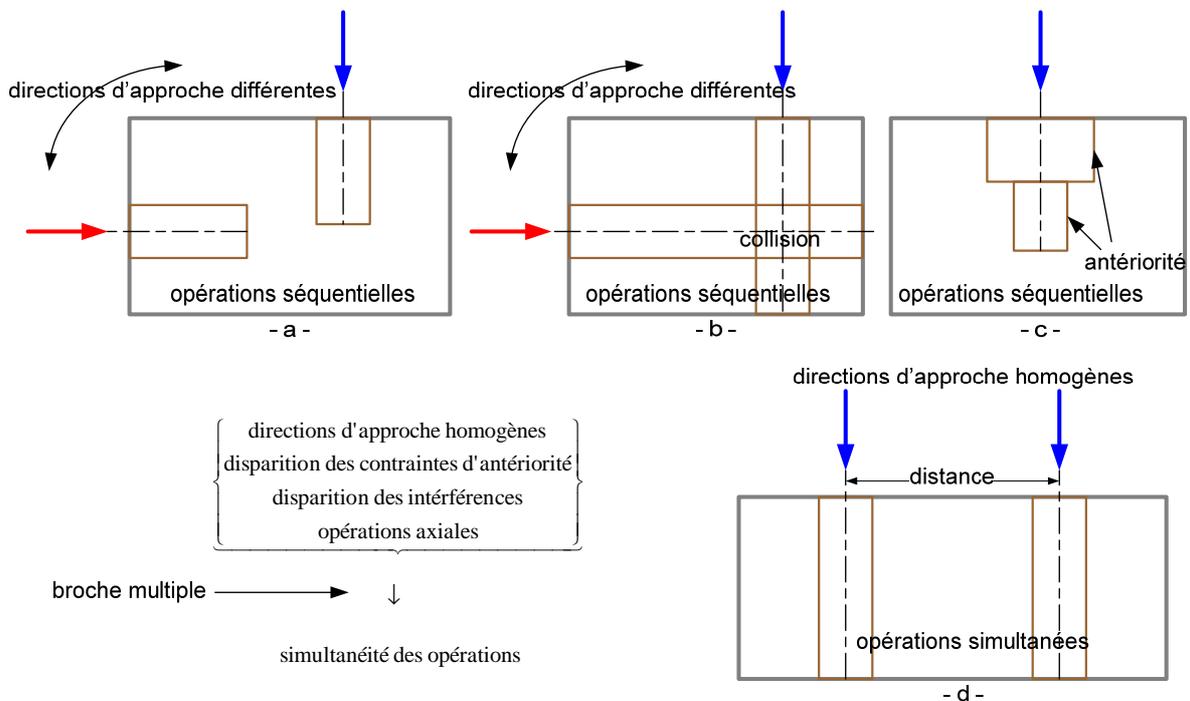


Figure IV.1. Simultanéité et séquentialité des opérations sur une broche.

La contrainte de simultanéité d'opérations traduit la possibilité (ou nécessité) d'exécuter deux opérations ou plus en même temps par une broche (broche multiple). Par contre, la séquentialité émane de l'impossibilité d'usinage simultané.

La première source des contraintes correspond aux directions d'approche des opérations. Par exemple, les opérations qui concernent des faces différentes (directions d'approche différentes) de la pièce (Figure IV.1.a et b) ne peuvent être exécutées simultanément par une seule broche. La simultanéité d'opérations est seulement possible si les directions d'approche sont homogènes et si les distances entre les centres des trous correspondantes sont supérieures à la valeur minimum possible permettant d'assurer la fixation des porte-outils et des outils et d'éviter des interférences ou collisions lors de l'usinage (Figure IV.1.d).

Les contraintes d'antériorité caractérisant l'ordre d'exécution des opérations constituent la deuxième source importante traitement des opérations d'usinage (simultanée ou séquentielle). Par exemple, chaque opération concernant une entité à usiner est associée à des contraintes topologiques et/ou géométriques : les opérations appartenant à des contraintes dépendantes (interactions topologiques et géométriques) ne peuvent pas être effectuées simultanément par une seule broche (Cf. Figure IV.1.c).

La contrainte de la simultanéité des opérations est définie par la possibilité de positionner et fixer plusieurs outils dans la même broche (existence de broches multiples fixes ou réglables). Les interférences des outils (si elles existent) lors d'usinage conduisent obligatoirement à la prise en compte des aspects de temporalité excluant la simultanéité des opérations d'usinage.

Ces types de contraintes peuvent être modélisés par la logique appelée temporelle [Garro, 1992] [Garro et Martin, 1993]. Par exemple, alors les opérations U_i et U_j peuvent être affectées à une broche (séquentiellement par une broche simple avec changement des outils ou une broche revolver ou bien simultanément par une broche multiple) ou par deux ou plusieurs broches.

A partir de la logique temporelle, nous pouvons construire les ensembles suivants que nous utiliserons dans la suite du manuscrit.

$U_i \wedge M(U_j)$ Les opérations repérées (U_i et U_j) sont alors ordonnées. Le symbole (M) traduit la temporalité et exclut la simultanéité des opérations. Cette relation indique que l'opération U_i doit être réalisée avant U_j .

$S(U_i \wedge U_j)$ Les opérations repérées (U_i et U_j) sont alors non ordonnées. Le symbole (S) traduit la simultanéité et n'exclut pas la possibilité de la temporalité des opérations. Cette relation indique que l'opération U_i et U_j peuvent être réalisées simultanément.

IV.2.2 Contraintes au niveau des broches

Après la spécification des contraintes d'antériorité, des contraintes de simultanéité et de séquentialité au niveau des opérations d'usinage des entités, nous devons établir des contraintes d'exclusion et d'inclusion au niveau des broches.

Les types des broches principalement utilisés dans l'industrie sont présentés dans la Figure IV.2 [Licon, Somex, Unito et SKF, web]. Quelle est la différence entre ces trois types des broches et dans quelles conditions convient-t-il d'employer l'un ou l'autre ?

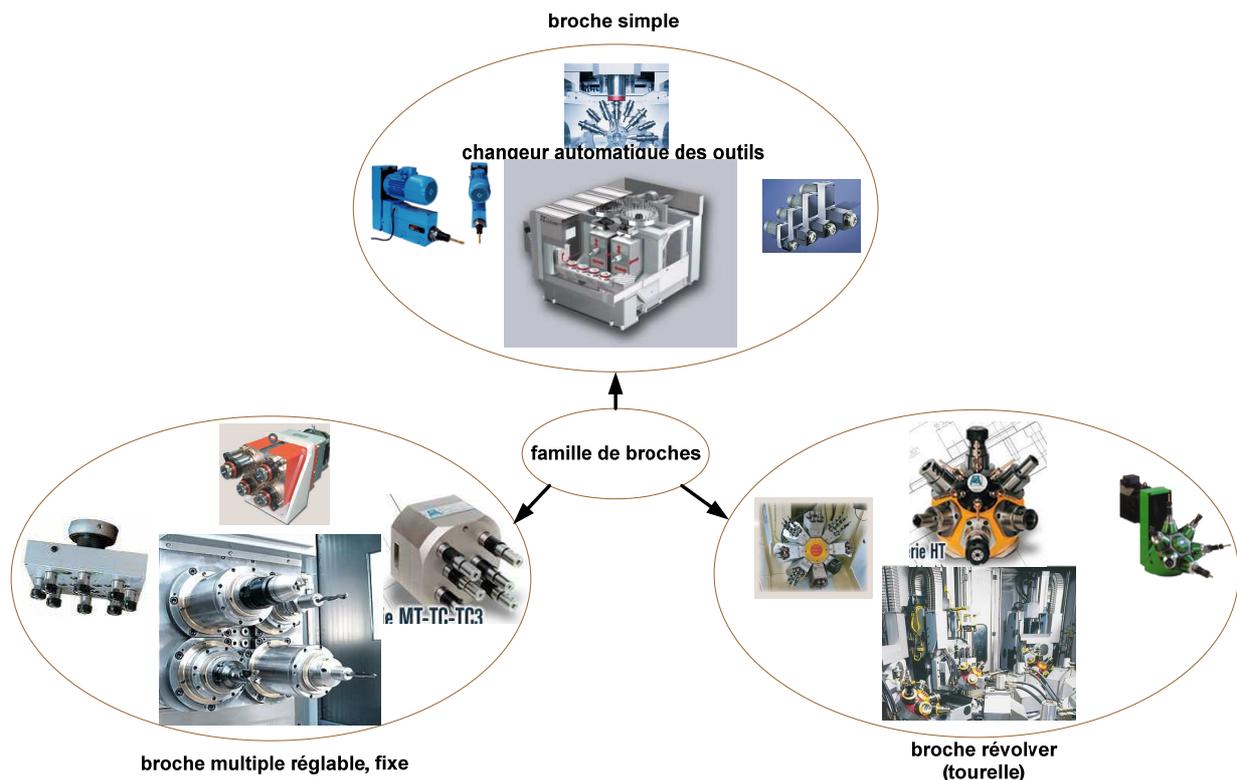


Figure IV.2. Types des broches dans l'environnement industriel.

Le premier type, présenté dans la Figure IV.2, a une broche simple (broche unique ou mono-broche) avec système de changement d'outils. Une telle broche ne peut effectuer qu'une seule opération d'usinage à la fois. En fonction de l'opération à effectuer, l'outil peut être remplacé par un autre. Ils sont stockés dans un magasin d'outils de type à disque ou de type à chaîne. Pour effectuer un changement d'outil au cours de l'usinage d'une pièce, il faut arrêter la broche, la remettre en position d'échange, décharger l'outil désormais inutile puis le positionner dans le magasin d'outils. L'outil nécessaire pour l'opération suivante est chargé, dans la broche, puis la broche est remise en position d'usinage. Pour les machines à commande numérique, les changements d'outils soient effectués de manière automatique, en suivant un ordre programmé, une telle séquence d'actions non productives augmente le temps nécessaire pour l'usinage d'une pièce. La durée totale de tous les changements peut atteindre jusqu'à (40-60)% du temps total d'usinage lorsque les changements d'outils sont fréquents. L'emploi de ce type de la broche permet aux machines d'avoir une certaine flexibilité. Ceci représente un atout pour la fabrication de pièces ayant des cycles de vie courts.

Le deuxième type est la broche multiple (Figure IV.2). Une telle broche multiple peut porter plusieurs outils (de 2 à 8 outils selon Su-Matic). Ceci permet d'effectuer simultanément un ensemble d'opérations. Par conséquent, le temps total d'usinage d'une pièce est diminué, d'une part, par l'exécution simultanée de plusieurs opérations, mais aussi par la réduction ou la disparition des changements d'outils. Il est à noter que seules les opérations à effectuer, sur la même face de la pièce ayant des directions d'approche homogènes peuvent être regroupées dans une broche multiple. D'autres contraintes doivent être également prises en compte lorsque des boîtiers broches multiples sont utilisés (types des opérations, modes d'usinage, contraintes de vitesses d'avance acceptables par les outils, qualité,...).

Néanmoins, le gain en productivité est au détriment de la flexibilité : une fois les outils fixés ou réglable dans une broche multiple, il est difficile, voire impossible, de la reconfigurer afin

de passer à l'usinage d'une autre famille de pièces. Par conséquent, seules des entités identiques ayant les directions d'approche homogènes peuvent être usinées par la broche multiple.

Enfin, le troisième type (Figure IV.2) combine les avantages et les inconvénients des deux types précédents. Comme dans le premier cas, les outils de coupe sont activés séquentiellement. Par contre, leur fixation dans une broche révolvrer permet de diminuer le temps de changements. Ce type de broche convient à l'usinage des pièces nécessitant des opérations d'usinage assez similaires, car le nombre d'outils qui peuvent être fixés sur la broche est sensiblement inférieur à la capacité d'un magasin d'outils utilisé avec des broches du premier type (à 6 outils selon Somex). Par contre, cette solution est limitée par l'encombrement des outils et les risques d'interférence ou de collision.

Du point de vue conception, les centres d'usinage comportant des broches du premier et du troisième type nécessitent des regroupements d'entités d'usinage puisqu'il s'agit, dans les deux cas de choisir l'ordre de l'activation des outils (usinage séquentiel). Par contre, l'utilisation du deuxième type des broches multiple dégage des problématiques très différentes: il s'agit de regrouper les opérations afin de les exécuter par des broches multiples (usinage simultané). Le choix de type de broche dans l'environnement de la conception reconfigurable dépend de la nature des opérations à effectuer [Guschinskaya, 2007].

IV.2.2.1 Inclusion des opérations au niveau des broches

L'inclusion des opérations au niveau des broches traduit la nécessité (possibilité) d'exécuter certaines opérations par la même broche.

Ce type de contraintes peut être représenté par une collection Q^m d'ensembles U_s d'opérations (U_s représente toutes les opérations qui doivent être effectuées par MOR), tels que toutes les opérations appartenant à l'ensemble Q^m peuvent être affectées par une broche.

L'accessibilité dite « homogène » (directions d'approche homogènes) entre deux opérations U_i et U_j permet l'affectation des opérations U_i et U_j à la même broche.

Par exemple pour le type de produit P_A , l'ensemble des contraintes d'inclusion est donné par Q_n^m comme suit :

$$Q_1^m = \{U_{1e1}^A, U_{2e1}^A, U_{1e2}^A, U_{2e2}^A, U_{1e3}^A, U_{2e3}^A, U_{1e4}^A, U_{1e5}^A, U_{1e6}^A, U_{2e6}^A, U_{1e7}^A, U_{1e9}^A\}, Q_2^m = \{U_{1e2}^A, U_{2e2}^A, U_{1e3}^A, U_{2e3}^A, U_{1e7}^A, U_{1e9}^A\} \text{ et } Q_3^m = \{U_{1e8}^A\}$$

Où chaque ensemble de Q^m ont des opérations analogues (même de direction d'approche, même famille de processus).

IV.2.2.2 Exclusion des opérations au niveau des broches

Les contraintes d'exclusion au niveau des broches viennent de l'impossibilité d'exécuter certaines opérations par la même broche. Par exemple, les opérations correspondantes à deux directions d'approche différentes ne peuvent pas être réalisées par la même broche (à

condition que, la broche garde toujours la même orientation). Des contraintes de ce type sont aussi engendrées par l'inaccessibilité de certaines zones de travail par les outils.

Ce type de contraintes peut être représenté par une collection Q^{ex} d'ensembles U_s d'opérations, tel qu'au moins une opération d'ensemble U_s ne soit pas affectée à la même broche que les autres.

Notons qu'il est nécessaire d'imposer une contrainte d'accessibilité « différente » entre deux opérations U_i et U_j pour interdire l'affectation des opérations U_i et U_j à la même broche.

IV.2.2.3 Contraintes de séquentialité et de simultanéité des broches

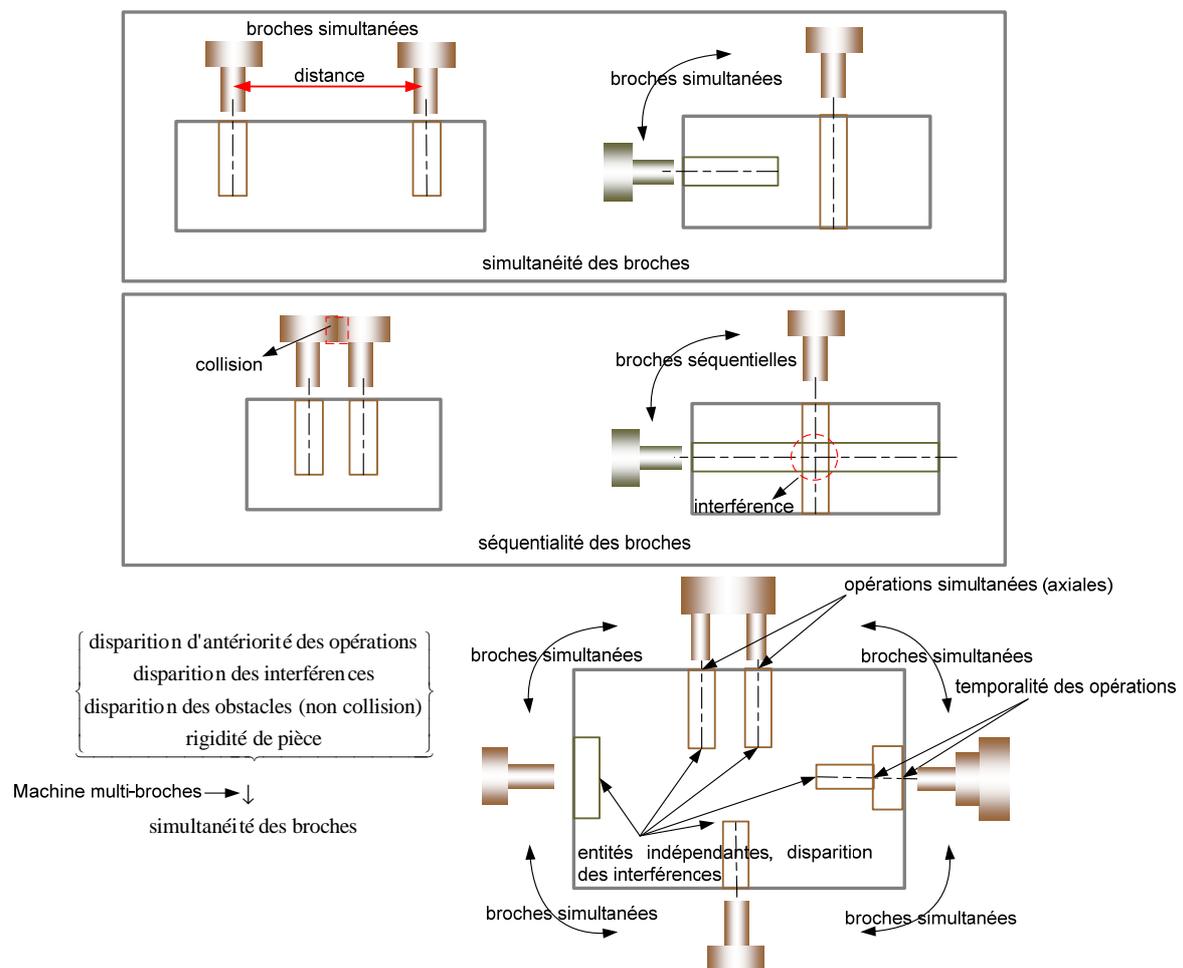


Figure IV.3. Simultanéité et séquentialité des broches.

Les broches F_n de MOR de type multibroches peuvent être actionnées de façon séquentielle et/ou simultanée. Les contraintes d'antériorité (géométriques, topologiques et logiques) des opérations font référence à la séquentialité de l'utilisation des broches. Par contre, la disparition des contraintes préalables et également des interférences des outils lors d'usinage et conduit à la possibilité de simultanéité de l'utilisation des broches (broches actionnées simultanément).

La simultanéité de l'utilisation des broches de MOR est applicable à condition que :

- les entités à usiner soient indépendantes tel que E_2^A et E_3^A du couvercle P_A qui n'ont aucune contrainte d'antériorité ;
- la disparition des interférences de collisions des outils lors d'usinage.

La première condition exclut les interactions entre les opérations d'usinage des entités, tandis que la deuxième condition garde la réalisation d'usinage sans risque de collisions (voir Figure IV.3).

Nous introduisons les règles permettant de définir les fonctions (séquentielles ou simultanées) des broches F_n .

Règle 1 : la séquentialité des opérations d'usinage sur chaque broche F_i est fonction des contraintes d'antériorité entre les opérations d'usinage des entités réalisables sur celle-ci.

Règle 2 : la séquentialité entre les broches F_i et F_j est fonction des contraintes d'antériorité entre les opérations d'usinage réalisables sur celles-ci. Si une entité E_i est exécutée par U_i effectuée sur F_i et a l'antériorité d'usinage d'une autre entité E_j est exécutée par U_j effectuée sur F_j , alors la réalisation de U_i avec F_i doit être ordonnanc  e avant la réalisation de U_j avec F_j .

Règle 3 : S'il y a une ou des interférences des volumes balayés (collisions) des outils de F_i et F_j , et F_i a des opérations avec un temps d'usinage long que F_j . Alors F_i doit être ordonnancé avant F_j .

Règle 4 : S'il n'y a aucune contrainte d'antériorité d'usinage ni d'interférences explicites entre les opérations effectuées sur F_i et F_j . Alors F_i et F_j ont la possibilité d'être actionnées en façon simultanée.

Nous notons que, la règle 1 permet de définir l'antériorité d'usinage sur chaque broche de MOR, tandis que les règles 2 et 3 imposent de séquentialité de l'utilisation des broches. Par contre la règle 4 propose la condition critique de la possibilité de simultanéité de l'utilisation des broches.

IV.3 Ordonnancement

L'ordonnancement des opérations d'usinage requis pour la réalisation des pièces, pour une MOR multibroches et une prise de pièce donnée, apparait comme un point clé de la démarche de génération de la machine. La détermination de l'ordonnancement consiste alors à définir un enchaînement de l'usinage de chacune des entités, dans chaque mise en position (pour nous une seule mise en position) en respectant des contraintes d'antériorité topologiques et géométriques préalables (   ce niveau la possibilité de simultanéité est inconnue).

L'usinage par multibroches définit trois niveaux d'ordonnancement :

- Ordonnancement au niveau du processus d'usinage :

L'ordonnancement au niveau de processus d'usinage vient des contraintes à suivre lors du déroulement spécifié d'opérations afin d'exécuter une entité E_i . Par exemple, il n'est pas possible de tarauder un trou sans l'avoir percé préalablement (enchaînement logique de mode d'usinage ébauche, demi-finition et finition).

- Ordonnancement au niveau de broche :

L'ordonnancement au niveau de broche traduit la nécessité d'exécuter certaines opérations de l'entité E_i assurées sur une broche F_i avant des opérations d'une autre entité E_j sur la même broche F_i . Par exemple, il est illogique d'aléser un trou perpendiculaire avec une surface sans réaliser le surfaçage auparavant.

- Ordonnancement des broches :

Afin d'éviter les collisions (s'il existe) ou de respecter des contraintes (géométriques, topologiques), l'ordonnancement des broches traduit la nécessité d'exécuter (dans certains cas) certaines opérations effectuées sur une broche F_i avant d'autres opérations effectuées sur une autre broche F_j .

Nous illustrons ces ordonnancements d'usinage en les appliquant sur la famille des pièces représentant le carter et le couvercle de pompe à huile en prenant en compte une mise en position unique.

La méthode permettant d'établir l'ordre de réalisation des opérations des entités de la pièce repose sur l'utilisation d'une matrice des antériorités. Cette matrice est de n colonnes et n lignes, où n représente le nombre total des opérations à réaliser. La matrice se remplit comme suit :

Si l'opération U_{kej} (k dénote le nombre d'opération dans le processus d'usinage de la réalisation de l'entité e_j) doit être usinée avant l'opération U_{kei} alors $A[i,j]=1$. Par exemple dans le Tableau IV.4, $A[2,1]=1$, c'est-à-dire, l'opération U_{1e1} (ébauche de surfaçage de l'entité E_1 de la P_A) doit être réalisée avant l'opération U_{2e1} (finition de surfaçage de l'entité E_1 de la P_A). On notera qu'il existe des opérations qui ne présentent aucune contrainte d'antériorité, ces opérations peuvent être usinées en premier. Le Tableau IV.4 présente la matrice d'antériorité affectée à notre exemple d'application du couvercle de pompe en fonction des interactions topologiques et géométriques.

Matrice A de P_A														Matrice N							
Opérations à effectuer concernant les entités de P_A																					
Entités		E ₁		E ₂		E ₃		E ₄	E ₅	E ₆		E ₇	E ₈	E ₉	N1	N2	N3	N4			
	opérations	U _{1e1}	U _{1e2}	U _{1e2}	U _{2e2}	U _{1e3}	U _{2e3}	U _{1e4}	U _{1e5}	U _{1e6}	U _{2e6}	U _{1e7}	U _{1e8}	U _{1e9}							
E ₁	U _{1e1}														0						
	U _{2e1}	1													1	0					
E ₂	U _{1e2}														0						
	U _{2e2}			1											1	0					
E ₃	U _{1e3}														0						
	U _{2e3}					1									1	0					
E ₄	U _{1e4}	1	1												2	1	0				
E ₅	U _{1e5}	1	1												2	1	0				
E ₆	U _{1e6}	1	1										1		3	1	0				
	U _{2e6}	1	1							1			1		4	2	1	0			
E ₇	U _{1e7}														0						
E ₈	U _{1e8}														0						
E ₉	U _{1e9}											1			1	0					
Niveau d'obtention															U _{1e1} , U _{1e2} U _{1e3} , U _{1e7} et U _{1e8}		U _{2e1} , U _{2e2} , U _{2e3} et U _{1e9}		U _{1e4} , U _{1e5} et U _{1e6}		U _{2e6}

Tableau IV.4. Matrice d'antériorité affectée au couvercle de pompe P_A .

Une fois la matrice construite, les résultats générés permettent de déterminer les « niveaux d'usinage » (ordre de passage) hiérarchisant les différentes opérations selon leur ordre de réalisation. La méthode ci après nous permet de construire la matrice des niveaux d'usinage reposant sur 4 étapes:

- pour tout i , nous définissons C_i , tel que $C_i = \sum_{j=1}^n A[i, j]$, nous reportons la valeur C_i dans la matrice N tel que $C_i = N[i][k]$, avec $k=1$;
- la démarche consiste à repérer l'opération n'ayant aucune antériorité, c'est à dire C_i est nul, puis à supprimer la colonne $j = i$ de la matrice des antériorités A ;
- nous effectuons à nouveau la somme $C_i = \sum_{j=1}^n A[i, j]$, puis nous complétons la matrice N tel que $C_i = N[i][k]$ avec $K=k+1$;
- nous recommençons l'étape 2, et ainsi de suite jusqu'à suppression totale des colonnes de la matrice des antériorités.

Ainsi, nous obtenons la matrice $N[i][k]$. L'étape suivante consiste à classer les opérations par niveau d'obtention : pour cela, nous utilisons la matrice $N[i][k]$.

< Si

$$N[i][k] = 0$$

Alors

opération U_i positionné au niveau k

Fin

>

Alors à partir des données Tableau IV.4, la Figure IV.4 montre l'ordre de réalisation selon les « niveaux d'usinage » du couvercle P_A .

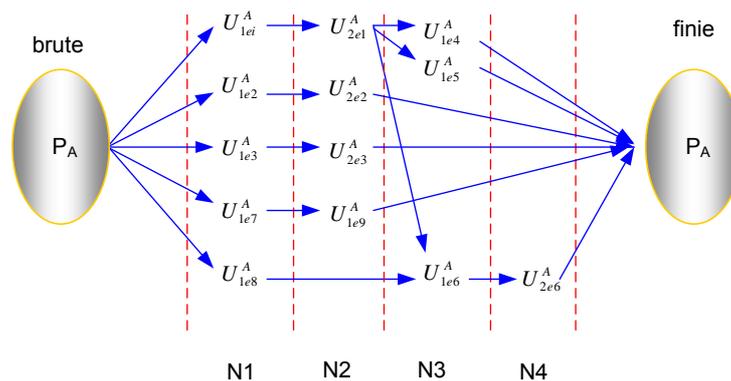


Figure IV.4. Rapport de séquentialité des opérations du couvercle P_A par niveaux.

De Figure IV.4, chaque niveau (N) possède des opérations ayant l'égalité de la séquence d'usinage (elles n'ont aucune des contraintes d'antériorité géométrique et/ou topologiques). Alors en ce cas, le choix de l'ordre dans chaque niveau dépend de l'expérience de concepteur respectant les contraintes logiques de fabrication telle que la séquentialité des opérations

ayant le même type d'outils de coupe (permet d'éviter le changement d'outil) et l'optimisation des transferts des outils.

De la même manière, nous pouvons définir la matrice d'antériorité du carter P_B . Figure IV.5 illustre le rapport de séquentialité des opérations du carter P_B par niveaux.

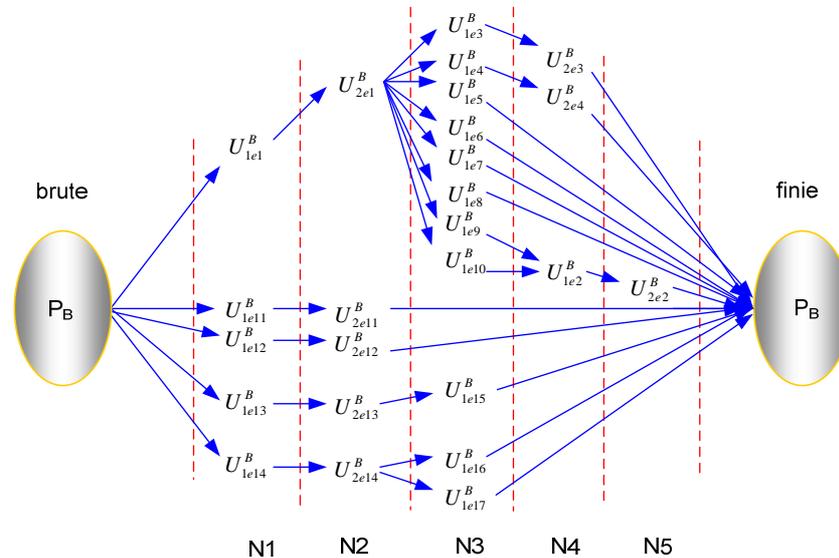


Figure IV.5. Liaisons de séquentialité des entités du carter par niveau.

IV.4 Interférences des outils

La détection et la résolution d'interférence des outils en usinage multi-axes sont des problèmes critiques et classiques à la fabrication assistée par ordinateur (FAO). Généralement, les interférences d'usinage sont classifiées dans deux catégories :

- Contact local : Le contact local se rapporte à l'interférence entre la tête d'outil et les entités à usiner de la pièce (hors contexte de notre travail) ;
- Collision : La collision est une interférence globale entre l'outil ou/et le support de outil (porte-outil) et l'environnement d'usinage ou avec un autre outil en cas d'usinage multibroches. La conséquence des collisions sont la destruction de l'outil, du montage et de la structure de machine.

Dans notre travail, nous avons besoin de caractériser au plus tôt la possibilité de simultanéité des opérations d'usinage des entités à usiner sans prendre en compte la/les positions d'interférence ni l'estimation de collision. Pour cela, nous utilisons l'approche du volume balayé qui est souvent employée pour la vérification des trajectoires et la détection d'interférence pièce/outil.

Notre approche de détection des interférences d'usinage multibroches s'articule en quatre étapes principales :

- Modélisation de la forme de l'outil de coupe ;
- Spécification de la trajectoire des outils ;
- Génération du volume balayé des outils ;

- Détection des interférences.

IV.4.1 Détection d'interférences

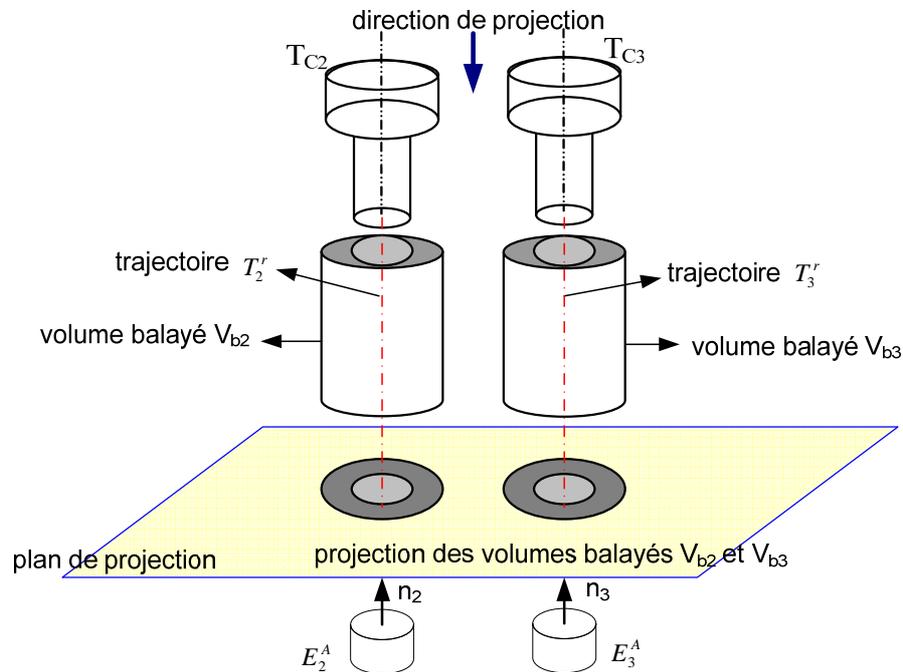


Figure IV.6. Espaces 3D des volumes balayés lors de réalisation des entités E_2^A et E_3^A .

La spécification des volumes d'encombrement des outils de coupe et des porte-outils (première étape), des trajectoires des outils (deuxième étape) et des volumes balayés (troisième étape) forment les espaces 3D des interférences. Par exemple, la réalisation des entités E_2^A et E_3^A (Figure IV.6) est caractérisée par les volumes d'encombrement des outils T_{C2} et T_{C3} conduits par les trajectoires T_2' et T_3' créant des volumes balayés V_{b2} et V_{b3} successivement.

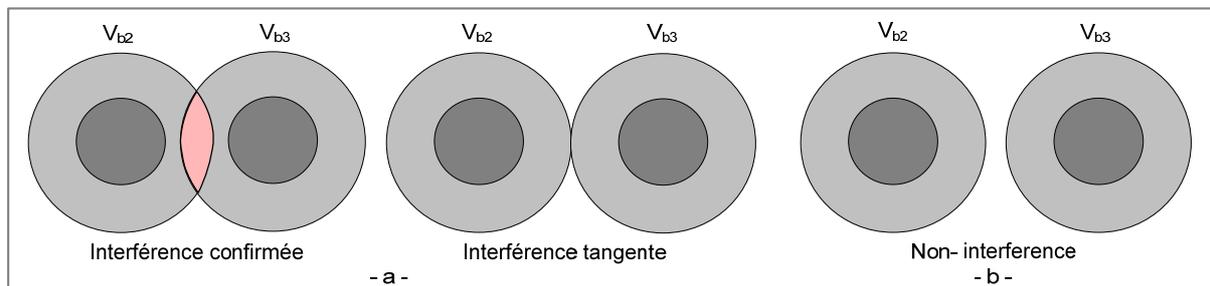


Figure IV.7. Détection des interférences (a) interférences confirmée (b) non interférence.

On peut projeter les volumes balayés sur un plan de projection afin de détecter les interférences. Deux cas possibles se présentent :

- interférence dite confirmée ou tangente (Figure IV.7.a) : l'interférence est signalée si n'importe quels éléments du volume balayé V_{b2} et du volume d'encombrement T_{C2} sont à l'intérieur ou sur le secteur circulaire du volume balayé V_{b3} résultant du volume d'encombrement d'outil T_{C3} ;
- non- collision : Figure IV.7.b, tous les points du V_{b2} sont en dehors du volume de V_{b3} .

Le 1^{er} cas conduit à des risques de collisions entre les outils de coupe en fonction des interférences au cours des mouvements lors de la réalisation des entités E_2^A et E_3^A . Ainsi, l'usinage doit être séquencé (la simultanéité est irréalisable).

Dans le 3^{ième} cas, les volumes balayés V_{b2} et V_{b3} sont indépendants. Ainsi, les mouvements de T_{C2} et T_{C3} lors d'exécution des entités ne spécifient aucune interférence, si bien que la simultanéité d'usinage entre les entités est réalisable.

Lors de détection des interférences des outils, nous devons prendre en compte :

- les opérations ayant la même direction d'approche : soit deux entités E_i et E_j . D_{EiEj} est la distance entre $\mathfrak{R}(E_i)$ et $\mathfrak{R}(E_j)$, D_{Pi} et D_{Pj} sont les diamètres des portes des outils associées aux E_i et E_j successivement. En cas de

$\frac{D_{Pi}}{2} + \frac{D_{Pj}}{2} \geq D_{EiEj} \rightarrow \text{interférence (confirmée ou tangente)} \rightarrow \text{usinage successif de } E_i \text{ et } E_j$
$\frac{D_{Pi}}{2} + \frac{D_{Pj}}{2} < D_{EiEj} \rightarrow \text{non interférence} \rightarrow \text{possibilité d'usinage simultané de } E_i \text{ et } E_j$

- les opérations ayant des directions d'approche différentes : dans ce cas, il est impossible d'avoir des interférences entre les outils, sauf dans le cas unique d'entités E_i et E_j ayant des surfaces communes et/ou intersections volumiques tel que E_6^A et E_8^A .

Alors, à partir des conditions de simultanéité d'usinage (indépendante des entités et non interférences des outils défini en IV.2.2) et en tenant compte des règles précédentes (connaissances extrinsèques des entités et les précisions dimensionnelles des outil et porte-outil), le Tableau IV.5 montre la possibilité de simultanéité des opérations d'usinage des entités concernant le couvercle P_A et le carter P_B (sans prise en compte de la structure, des axes et des mouvement de machine) :

Si l'opération U_j est réalisable simultanément avec l'opération U_i alors $A[i,j]=S$.

Opérations d'usinage des entités à usiner concernant PA																				
		U _{1e1}	U _{2e1}	U _{1e2}		U _{2e2}		U _{1e3}		U _{2e3}		U _{1e4}	U _{1e5}	U _{1e6}	U _{2e6}	U _{1e7}		U _{1e8}	U _{1e9}	
	Da	Z-	Z-	Z-	Z+	Z-	Z+	Z-	Z+	Z-	Z+	Z-	Z-	Z-	Z-	Z-	Z+	Y+	Z-	Z+
U _{1e1}	Z-				S		S			S							S	S		S
U _{2e1}	Z-				S		S			S							S	S		S
U _{1e2}	Z-							S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	Z+	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{2e2}	Z-							S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	Z+	S						S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e3}	Z-			S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S
	Z+	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{2e3}	Z-			S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S
	Z+	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S

U _{1e4}	Z-			S	S	S	S	S	S	S	S	S		S	S	S	S	S	S	S	S	
U _{1e5}	Z-			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S		S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e6}	Z-			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S			S	S	S
U _{2e6}	Z-			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S			S	S	S
U _{1e7}	Z-			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S			
	Z+	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S			
U _{1e8}	Y+	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S	S	S	S	S	S
U _{1e9}	Z-			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S			
	Z+	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S			

Opérations d'usinage des entités à usiner concernant PB

		U _{1e1}	U _{2e1}	U _{1e2}	U _{2e2}	U _{1e3}	U _{2e3}	U _{1e4}	U _{2e4}	U _{1e5}	U _{1e6}	U _{1e7}	U _{1e8}	U _{1e9}	U _{1e10}	U _{1e11}	U _{2e11}	U _{1e12}	U _{2e12}	U _{1e13}	U _{2e13}	U _{1e14}	U _{2e14}	U _{1e15}	U _{2e16}	U _{1e17}					
	Da	Z-	Z-	Z+	Z-	Z+	Z-	Z+	Z-	Z+	Y+	Y+	Y+	Y+	Y+	Y+	Y+	Y+													
U _{1e1}	Z-															S		S		S		S		S	S	S	S	S	S	S	S
U _{2e1}	Z-															S		S		S		S		S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e2}	Z-																						S	S	S	S	S	S			
U _{2e2}	Z-																						S	S	S	S	S	S			
U _{1e3}	Z-							S								S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{2e3}	Z-						S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e4}	Z					S										S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{2e4}	Z-					S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e5}	Z-					S		S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e6}	Z-					S		S	S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e7}	Z-					S		S	S	S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e8}	Z-					S		S	S	S	S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e9}	Z-					S		S	S	S	S	S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e10}	Z-					S		S	S	S	S	S		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e11}	Z-					S	S	S	S	S	S	S	S	S	S						S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	Z+	S	S			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{2e11}	Z-					S	S	S	S	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
	Z+	S	S			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e12}	Z-					S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S
	Z+	S	S			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{2e12}	Z-					S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S
	Z+	S	S			S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S					S	S	S	S	S	S	S	S	S
U _{1e13}	Y+	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S	S			S		
U _{2e13}	Y+	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S	S			S		
U _{1e14}	Y+	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S				S		
U _{2e14}	Y+	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S			S				S		

IV.5 Représentation des processus de fabrication

Avant le traitement du problème d'architecture de MOR, l'analyse logique nous amène à constater qu'il est indispensable de répondre aux deux questions :

- Quelle tâche doit être effectuée par la MOR ?
- Quels sont les processus de fabrication possibles ?

Les réponses à ces questions nous imposent de définir les opérations d'usinage qui doivent être réalisées par la MOR ainsi que les solutions de processus possibles. Nous avons décrit les entités constituant la famille de pièce (P_A et P_B) à partir des formalismes (II.5), (II.6) et (II.7) selon [Garro, 1992, 1993]:

La MOR doit donc réaliser l'ensemble des entités identifiées par la famille de pièces. Elle doit vérifier la relation suivante ;

$$E_1 \wedge E_2 \wedge \dots \wedge E_i \quad (IV.1)$$

Où « $E_i \wedge E_j$ » exprime la relation entre les entités E_i et E_j qui doivent être usinées pour assurer la fabrication de la pièce (proposition de conjonction). Par contre « $E_i \vee E_j$ » présente la proposition de disjonction.

Pour notre exemple de famille de pièces à usiner sur une MOR, l'équation (IV.1) s'écrit alors pour les entités identifiées suite à l'analyse des pièces :

$$P_A = E_1^A \wedge E_2^A \wedge E_3^A \wedge E_4^A \wedge E_5^A \wedge E_6^A \wedge E_7^A \wedge E_8^A \wedge E_9^A \quad (IV.2)$$

$$P_B = E_1^B \wedge E_2^B \wedge E_3^B \wedge E_4^B \wedge E_5^B \wedge E_6^B \wedge E_7^B \wedge E_8^B \wedge E_9^B \wedge E_{10}^B \wedge E_{11}^B \wedge E_{12}^B \wedge E_{13}^B \wedge E_{14}^B \wedge E_{15}^B \wedge E_{16}^B \wedge E_{17}^B \quad (IV.3)$$

Pour réaliser une pièce par une MOR, l'ensemble des entités à usiner de la pièce doit être effectué totalement sur la MOR. Ainsi, l'ensemble des entités à usiner exprime la tâche (exprimée par Q) à réaliser.

Alors,

$$Q_A = P_A = E_1^A \wedge E_2^A \wedge E_3^A \wedge E_4^A \wedge E_5^A \wedge E_6^A \wedge E_7^A \wedge E_8^A \wedge E_9^A \quad (IV.4)$$

$$Q_B = P_B = E_1^B \wedge E_2^B \wedge E_3^B \wedge E_4^B \wedge E_5^B \wedge E_6^B \wedge E_7^B \wedge E_8^B \wedge E_9^B \wedge E_{10}^B \wedge E_{11}^B \wedge E_{12}^B \wedge E_{13}^B \wedge E_{14}^B \wedge E_{15}^B \wedge E_{16}^B \wedge E_{17}^B \quad (IV.5)$$

Or, la tâche globale de MOR au vue de la réalisation du carter et du couvercle est :

$$Q_{MOR} = Q_A \wedge Q_B \quad (IV.6)$$

Il est indispensable de définir le processus générique en vue de fournir un ordonnancement explicitement contraint par la technologie d'usinage (e.g. bavures induisant des antériorités entre entités). Par ailleurs, le fait que la mise et le maintien en position soit unique (un seul posage pour l'ensemble de la réalisation des entités), nous conduit à écrire une seule relation traduisant les contraintes d'antériorité. Selon le formalisme [Garro, 1992, 1993], nous définissons la séquentialité des opérations par :

$$U_i \wedge M(U_j) \quad (IV.7)$$

Les opérations repérées (U_i et U_j) sont alors ordonnées. Le symbole (M) traduit la temporalité et exclut la simultanéité des opérations. Cette relation indique que l'opération U_i doit être réalisée avant U_j .

De plus, nous avons exprimé dans le chapitre III que l'entité d'usinage est décrite en fonction du processus (une ou des opérations d'usinage) d'usinage.

$$E_i = f(Pu_i) = \sum_{k=1}^{k=n} U_{lei} \wedge M(U_{2ei}) \wedge M^2(U_{3ei}), \dots, \wedge M^x(U_{kei}) \quad (IV.8)$$

En appliquant ce formalisme (équation (IV.8)) aux équations (IV.4) et (IV.5) et en respectant les données d'antériorité (Figure IV.4 pour P_A et Figure IV.5 pour P_B), nous pouvons écrire les relations suivantes :

Soit pour P_A :

$$Q_A = [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e8}^A] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \quad (IV.9)$$

Les opérations de surfacage (ébauche et finition) de $U_{1e1}^A \wedge M(U_{1e2}^A)$ doivent être réalisées avant les opérations de lamage des trous $M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)$ (réduction de la bavure et respect de la perpendicularité entre autres). En tenant compte de l'opération U_{1e8}^A , le perçage doit être effectué également avant le lamage soit, $U_{1e6}^A \wedge M(U_{2e6}^A)$ (avec E_6^A plus précis et E_8^A ayant une plus grande profondeur et U_{1e7}^A avant U_{1e9}^A dû au lamage). Or, les opérations U_{1e2}^A, U_{1e3}^A (alésage ébauche) sont antérieures aux opérations U_{2e2}^A, U_{2e3}^A (alésage finition).

Soit pour P_B :

$$Q_B = [(U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)] \wedge [U_{1e13}^B \wedge M(U_{2e13}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e17}^B)] \wedge [U_{1e14}^B \wedge M(U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e16}^B)] \wedge [(U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)) \wedge (U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B))] \quad (IV.10)$$

Les opérations de surfacage de $(U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B))$ concernant E_1^B doivent être réalisées avant des opérations $[M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge U_{1e2}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)]$ concernant les entités $E_2^B, E_3^B, E_4^B, E_5^B, E_6^B, E_7^B, E_8^B, E_9^B$ et E_{10}^B . De plus, l'exécution des opérations de surfacages de $(U_{1e13}^B \wedge M(U_{2e13}^B))$ et $(U_{1e14}^B \wedge M(U_{2e14}^B))$ ont pour antériorités par rapport aux opérations de lamage $(U_{1e15}^B \wedge U_{1e17}^B)$ et U_{1e16}^B . Par contre, les opérations U_{1e9}^B et U_{1e10}^B doivent également

effectuées avant $U_{1e2}^B \wedge M(U_{2e2}^B)$, tandis que, les opérations $(U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B))$ et $(U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B))$ concernant E_{11}^B et E_{12}^A sont indépendantes.

Alors, les équations (IV.9) et (IV.10) représentent les processus de fabrication en respectant les ordonnancements technologiques (contraintes d'antériorité topologiques et géométriques) des opérations des entités.

Par ailleurs, ces formules (IV.9) et (IV.10) se traduisent par l'introduction de symboles (W) et (S) dont la signification correspond respectivement au « ou exclusif », et à la « simultanété » [Garro, 1992, 1993].

Soit deux opérations U_i et U_j , l'équation (IV.11) décrit alors la relation « usiner U_i avant U_j , ou U_j avant U_i ou encore simultanément U_i et U_j ». Cette algèbre permet donc d'introduire des alternatives d'ordonnement dans le processus.

$$U_i \wedge U_j \Rightarrow U_i \wedge M(U_j) \ W \ U_j \wedge M(U_i) \ W \ S(U_i \wedge U_j) \quad (IV.11)$$

Par application aux opérations $(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A))$ et $(U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A))$ concernant E_2^A et E_3^A , l'équation (IV.11) s'écrit alors :

$$(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)) \wedge (U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)) = [(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)) \wedge M(U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A))] \ W \ [(U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)) \wedge M(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A))] \ W \ S[(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)) \wedge (U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A))] \quad (IV.12)$$

L'équation (IV.12) indique que $(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A))$ est réalisée avant $(U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A))$ ou bien $(U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A))$ avant $(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A))$ ou encore que $(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A))$ et $(U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A))$ sont réalisés simultanément.

Pour simplifier la représentation des équations, nous introduisons encore de symbole (δ)

$$\delta(U_i \wedge U_j) = (U_i \wedge M(U_j)) \ W \ (U_j \wedge M(U_i)) \quad (IV.13)$$

L'équation (IV.13) signale que l'opération U_i est effectuée avant U_j , ou bien U_j avant U_i . Ainsi, elle exclut la simultanété et impose l'égalité de choix entre les opérations.

Alors, en utilisant les symboles W, S et δ et les données de simultanété (Tableau IV.5), les formalismes (IV.9) et (IV.10) s'écrivent :

- Pour P_A

– $U_{1e2}^A, U_{2e2}^A, U_{1e3}^A, U_{2e3}^A, U_{1e7}^A$ et U_{1e9}^A sont usinées suivi $Z+$ (sens positif) :

$$Q_A = S \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e8}^A] \wedge \\ \delta[U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \end{array} \right\} \quad (IV.14)$$

Dans le cas où les entités E_2^A, E_3^A, E_7^A et E_9^A sont réalisées suivi $Z+$, il n'existe pas d'interférences entre les opérations U_{1e1}^A, U_{1e2}^A et les opérations $U_{1e2}^A, U_{2e2}^A, U_{1e3}^A, U_{2e3}^A, U_{1e7}^A$ et U_{1e9}^A .

– Nous pouvons dire alors que $U_{1e2}^A, U_{2e2}^A, U_{1e3}^A, U_{2e3}^A, U_{1e7}^A$ et U_{1e9}^A sont réalisés suivi $Z-$ (sens négatif) :

$$Q_A = S \left\{ \delta \left[\left([U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \right) \wedge \left([U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \right) \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\} \quad (IV.15)$$

Ce formalisme exprime en fonction des interférences entre les opérations de surfaçage de $U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A)$ et les opérations d'alésage $(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)) \wedge (U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)) \wedge (U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A))$, où alors $U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A)$ doivent être réalisés avant $(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)) \wedge (U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)) \wedge (U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A))$, ou encore $(U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)) \wedge (U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)) \wedge (U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A))$ sont réalisées avant $U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A)$. L'opération du perçage U_{1e8}^A est effectuée simultanément avec $[U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A)]$ et en tenant compte des opérations de lamage $U_{1e6}^A \wedge M(U_{2e6}^A)$.

- Soit pour P_B :

– $U_{1e11}^B, U_{2e11}^B, U_{1e12}^B$ et U_{2e12}^B suivi Z+ (sens positif) :

$$Q_B = S \left\{ \left[\left([U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge U_{1e2}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)] \wedge [U_{1e13}^B \wedge M(U_{2e13}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e17}^B)] \right) \wedge \left([U_{1e14}^B \wedge M(U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e16}^B)] \wedge [U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)] \wedge (U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B)) \right) \right] \right\} \quad (IV.16)$$

Il n'existe pas alors d'interférences entre opérations de (U_{1e1}^B, U_{2e1}^B) et $(U_{1e11}^B, U_{2e11}^B, U_{1e12}^B, U_{2e12}^B)$.

– $U_{1e11}^B, U_{2e11}^B, U_{1e12}^B$ et U_{2e12}^B suivi Z- (sens négatif) :

$$Q_B = S \left\{ \delta \left[\left([U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge U_{1e2}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)] \wedge [U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)] \wedge (U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B)) \right) \wedge \left([U_{1e13}^B \wedge M(U_{2e13}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e17}^B)] \wedge [U_{1e14}^B \wedge M(U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e16}^B)] \right) \right] \right\} \quad (IV.17)$$

L'équation (IV.17) présente la prise en compte des interférences entre les opérations $[U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge U_{1e2}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)]$ et les opérations d'alésage U_{1e11}^B, U_{2e11}^B et U_{1e12}^B, U_{2e12}^B . Les opérations doivent être réalisées avant ou bien après U_{1e11}^B, U_{2e11}^B et U_{1e12}^B, U_{2e12}^B .

Or, les équations (IV.14), (IV.15), (IV.16) et (IV.17) permettent d'explicitier les variétés d'ordonnancement (en fonction des contraintes d'antériorité technologique et des interférences des outils) des processus de fabrication répondant à la réalisation de la famille des pièces P_A et P_B .

IV.6 Architecture de MOR

Par l'analyse logique du problème d'architecture de MOR à type multibroches, nous avons pu constater qu'à cette étape, il est impératif de répondre aux questions suivantes :

- Combien de broches convient-il d'installer ?
- Quelles opérations exécuter par chaque broche ?
- Dans quel ordre les opérations d'usinage sont réalisées sur chaque broche ?

- Dans quel ordre sont activées les broches installées sur MOR (si le mode d'activation est séquentiel ou simultané ou mixte) ?
- Combien d'axes associés à chaque broche (mouvements requis) ?

Les réponses à ces questions déterminent non seulement l'architecture de MOR, mais aussi la productivité, la flexibilité et le coût.

IV.6.1 Informations préalables

Nous nous sommes appuyés déjà sur l'exemple du couvercle P_A et du carter P_B appartenant au dispositif de pompe à huile de camion SCANIA. Suite aux fluctuations de la demande du marché, la famille est produite à présent :

- à raison de 30 pièces/h concernant le couvercle P_A ;
- à raison de 25 pièces/h environ concernant le carter P_B .

Par ailleurs, les variations du marché ont indiquées que la demande évolue telle que la production sera de :

- 60 pièces/h concernant le couvercle P_A ;
- 50 pièces/h concernant le carter P_B .

A l'heure actuelle, cette famille est usinée sur des centres d'usinage 4 axes d'ancienne génération dont la productivité est de 20 pièces/h environ pour P_A et 15 pièces/h pour P_B .

L'objectif est de créer une machine outil reconfigurable répondant à la variation de la demande définie précédemment.

Les systèmes manufacturiers actuels (SMF, SMD) répondent aux tâches d'usinage par deux types de structures architecturales. Le SMF (CNC) est une structure flexible (une broche portée par 2, 2.5, 3, 4 axes) répond à la réalisation des opérations d'usinage actuel, tandis que le SMD (LTD) correspond à une structure fixe (plusieurs broches, chaque broche est globalement portée par un axe) où chaque opération est effectuée par une broche (possibilité d'assembler les opérations identiques par utiliser des broches à type multiples).

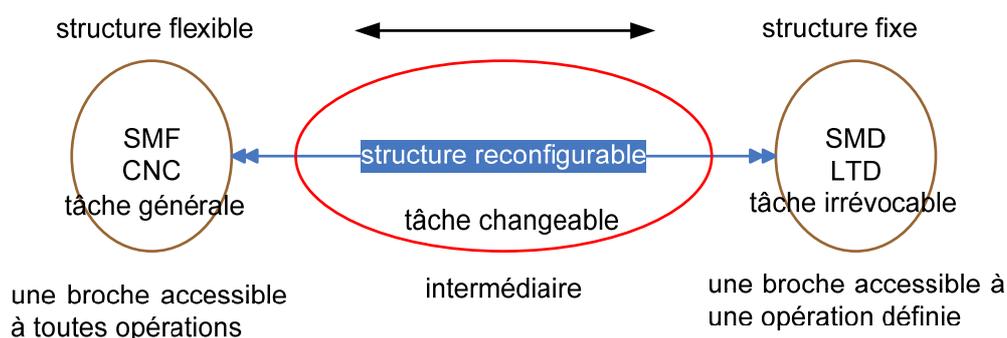


Figure IV.9. Architecture des systèmes manufacturiers.

IV.6.2 Architecture géométrique

Dans cette partie, nous définissons le nombre des broches requises pour la réalisation des tâches d'usinage de MOR ainsi que l'orientation des broches.

Par hypothèse, une machine-outil reconfigurable (MOR) est constituée de plusieurs broches indépendantes et pour lesquelles sont associées des axes asservis en position et en vitesse (axes complets). La famille de pièces à usiner est localisée et orientée dans l'espace de tâches de la MOR.

Chaque type de pièce P à usiner sur une MOR est décrit comme ensemble des entités (E_i) [équations (IV.2) et (IV.3)] associé à un ordonnancement [cf. équation (IV.14), (IV.15), (IV.16) et (IV.17)]. La machine (MOR) est composée d'un ensemble de broches (F) dont le nombre (n) est à définir. Nous pouvons écrire l'expression suivante :

$$MOR = \bigcup_{i=1}^{i=n} (F_i) \quad (IV.18)$$

$$\forall E_i \in P, E_i = f(Pu_i) \rightarrow U_i \text{ exécutable par } (F_1 \vee F_2 \vee \dots \vee F_n) \quad n \text{ broche indépendante} \quad (IV.19)$$

Où « \vee » représente la proposition de disjonction.

En prenant en compte la condition suivante :

$$\forall E_i \in P, \exists \text{ condition tel que } U_i \cap (F_1 \vee F_2 \vee \dots \vee F_n) \neq \emptyset \quad (IV.20)$$

Cette condition nous permet d'assurer que pour chaque opération U_i de l'entité E_i de la famille de pièces, il existe au moins une broche F_n capable d'assurer la réalisation de celle-ci. La condition est vérifiée par le produit cartésien entre l'ensemble définissant les opérations des entités de la famille de pièce (l'ensemble des accessibilités d'usinage) et l'existence de broche permettant de réaliser chacune des entités.

Alors, l'ensemble des broches F_n constituant la MOR doivent répondre à la famille de pièces. Ainsi de l'équation (IV.18), nous pouvons écrire que :

$$F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n \text{ doivent réaliser } P_1 \wedge P_2 \dots \wedge P_k \quad (IV.21)$$

Afin de bien représenter la définition de l'architecture géométrique nous montons l'exemple suivant.

Soient les informations contenues dans la Figure IV.10 présentant une entité E_i (trou débouchant) qui est alésé suivant une de deux directions d'approche (accessible), la première est correspond avec Z^- (sens négatif de Z) et la deuxième avec Z^+ (sens positif de Z).

Comme nous l'avons spécifié dans les chapitres II et III (en prenant en compte la qualité requise) que :

Une direction d'approche d'entité E_i = une solution d'usinage de E_i

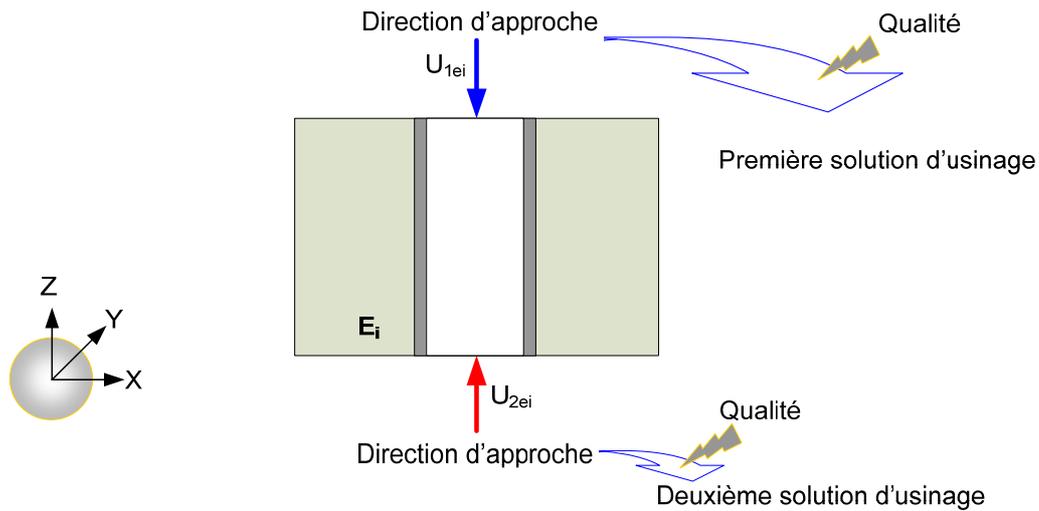


Figure IV.10. Solution d’usinage.

L’entité E_i a deux solutions d’usinage. La première solution d’usinage s’appuie sur une opération d’alésage U_{1ei} accessible avec la direction d’approche D_a portée par l’axe Z_- , tandis que la deuxième correspond à l’opération U_{2ei} abordable avec la direction d’approche D_a portée par l’axe Z_+ .

L’issue critique à l’exécution de E_i est de créer une structure architecturale de MOR qui doit répondre, au niveau d’accessibilité, à au moins une des deux solutions d’usinage précédentes (U_{1ei} ou U_{2ei}).

La génération de l’architecture géométrique de MOR (dans ce travail) s’appuie sur les règles suivantes :

Règle (1) : une solution d’usinage (opération) = une solution d’architecture

Alors

$$\forall E_i \in P \Rightarrow E_i = f(Pu_i) \text{ usinable par } \left\{ \begin{array}{l} Z_+ \rightarrow \text{premier solution} \rightarrow \text{premier architecture} \\ Z_- \rightarrow \text{deuxième solution} \rightarrow \text{deuxième architecture} \\ \vdots \\ N \rightarrow \quad \quad \quad n \text{ solution} \rightarrow \quad n \text{ architecture} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{solutions d'architecture}$$

Règle (2) : une direction d’approche = une broche

La règle (2) spécifie une broche pour chaque direction d’accès de MOR si bien qu’elle évite les mouvements rotatifs de la broche.

Alors selon les règles (1 et 2), la MOR répond à l’exécution de l’entité E_i pour deux solutions architecturales. La première s’appuie sur une broche F_1 correspondant à la première solution d’usinage pour la direction d’approche Z_- et la deuxième s’appuie également sur une broche F_2 correspondant à la deuxième solution d’usinage pour la direction d’approche Z_+ (Figure IV.11).

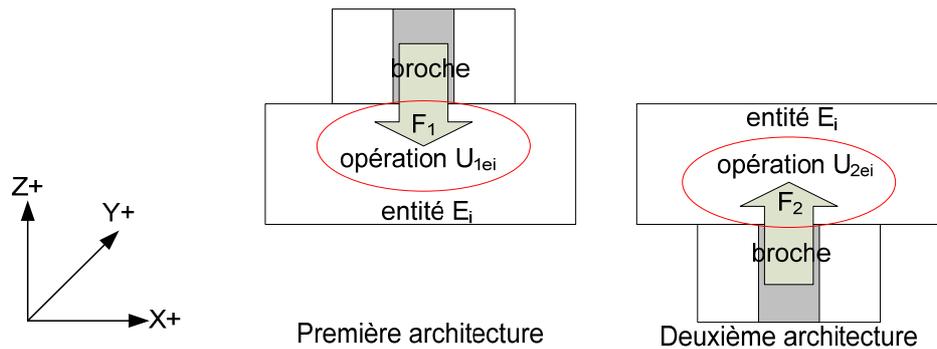


Figure IV.11. Solutions d'architecture d'exécution d'entité E_i (Figure IV.10).

En effet, les règles 1 et 2 nous permettent d'identifier les solutions d'architecture répondant à la réalisation d'une entité unique.

Règle (3) : les solutions ayant les mêmes directions d'approche = une broche

La règle (3) nous permet de manière systématique de regrouper des solutions d'usinage (opérations) ayant les mêmes directions d'approche par une broche unique.

Ainsi, cela nous impose que chaque broche peut avoir un des trois types d'opérations suivantes :

- opérations axiales (perçage et/ou alésage), dans ce cas nous pouvons utiliser une broche simple (avec changement des outils, usinage séquentiel) ou une broche révoluer ou bien une broche multiple (sans changement des outils, usinage simultané) ;
- opérations de fraisage, on spécifie deux cas :
 - entités identiques indépendantes (broche simple ou broche multiple) ;
 - entités différentes (broche simple).
- opérations mixtes (alésage et/ou perçage et fraisage en bout et/ou en roulant). Ce cas impose obligatoirement d'utiliser une broche simple avec changement des outils.

IV.6.2.1 Solution d'architecture

Les solutions d'architecture de MOR répondant à la réalisation de la famille de pièces de façon à définir toutes les possibilités d'usinage des entités selon les directions du repère de polyèdre (spécifié dans le chapitre III, voir Tableau III.1).

Pour notre exemple d'application, le Tableau IV.6 représente les entités d'usinage du couvercle P_A et du carter P_B , ses solutions d'usinage (opérations+ directions d'approche) et la possibilité de regroupement au travers des directions des repères des polyèdres caractéristiques concernant les pièces P_A et P_B (voir Figure II.20, Figure II.21 présentant les géométries caractéristiques intermédiaires de P_A et P_B). Chaque entité est réalisée par au moins un processus d'usinage qui compte une ou des opérations dont l'accessibilité est associée au moins pour une direction définie par le repère du polyèdre (avec la valeur 1 pour la solution d'usinage choisie selon la direction correspondante).

Couvercle P _A									
Entité		Opérations	Processus	Repère du polyèdre de P _A					
Nom	Type			X ₊	X ₋	Y ₊	Y ₋	Z ₊	Z ₋
E ₁ ^A	Surface	Fraisage en bout	ébauche U _{1e1} ^A + finition U _{2e1} ^A	0	0	0	0	0	1
E ₂ ^A	trou alésé	alésage	ébauche U _{1e2} ^A + finition U _{2e2} ^A	0	0	0	0	1	1
E ₃ ^A	trou alésé	alésage	ébauche U _{1e3} ^A + finition U _{2e3} ^A	0	0	0	0	1	1
E ₄ ^A	trou lamé	lamage	finition U _{1e4} ^A	0	0	0	0	0	1
E ₅ ^A	trou lamé	lamage	finition U _{1e5} ^A	0	0	0	0	0	1
E ₆ ^A	trou lamé	lamage	ébauche U _{1e6} ^A + finition U _{2e6} ^A	0	0	0	0	0	1
E ₇ ^A	trou alésé	alésage	finition U _{1e7} ^A	0	0	0	0	1	1
E ₈ ^A	trou percé	perçage	finition U _{1e8} ^A	0	0	1	0	0	0
E ₉ ^A	trou lamé	lamage	finition U _{1e9} ^A	0	0	0	0	1	1
Carter P _B									
Entité		Opérations	Processus	Repère du polyèdre de P _B					
Nom	Type			X ₊	X ₋	Y ₊	Y ₋	Z ₊	Z ₋
E ₁ ^B	Surface	fraisage en bout	ébauche U _{1e1} ^B + finition U _{2e1} ^B	0	0	0	0	0	1
E ₂ ^B	Surface	fraisage en bout	ébauche U _{1e2} ^B + finition U _{2e2} ^B	0	0	0	0	0	1
E ₃ ^B	trou lamé	lamage	finition U _{1e3} ^B	0	0	0	0	0	1
		taroudage	U _{2e3} ^B						
E ₄ ^B	trou lamé	lamage	finition U _{1e4} ^B	0	0	0	0	0	1
		taroudage	U _{2e4} ^B						
E ₅ ^B	trou lamé	taroudage	U _{1e5} ^B	0	0	0	0	0	1
E ₆ ^B	trou lamé	taroudage	U _{1e6} ^B	0	0	0	0	0	1
E ₇ ^B	trou lamé	taroudage	U _{1e7} ^B	0	0	0	0	0	1
E ₈ ^B	trou lamé	taroudage	U _{1e8} ^B	0	0	0	0	0	1
E ₉ ^B	demi-cylindre	alésage	finition U _{1e9} ^B	0	0	0	0	0	1
E ₁₀ ^B	demi-cylindre	alésage	finition U _{1e10} ^B	0	0	0	0	0	1
E ₁₁ ^B	trou débouchant alésé	alésage	ébauche U _{1e11} ^B + finition U _{2e11} ^B	0	0	0	0	1	1
E ₁₂ ^B	trou débouchant alésé	alésage	ébauche U _{1e12} ^B + finition U _{2e12} ^B	0	0	0	0	1	1
E ₁₃ ^B	surface	fraisage en bout	ébauche U _{1e13} ^B + finition U _{2e13} ^B	0	0	1	0	0	0
E ₁₄ ^B	surface	fraisage en bout	ébauche U _{1e14} ^B + finition U _{2e14} ^B	0	0	1	0	0	0
E ₁₅ ^B	trou lamé	lamage	finition U _{1e15} ^B	0	0	1	0	0	0
E ₁₆ ^B	trou lamé	lamage	finition U _{1e16} ^B	0	0	1	0	0	0
E ₁₇ ^B	trou lamé	lamage	finition U _{1e17} ^B	0	0	1	0	0	0

Tableau IV.6. Représentation des accessibilités d'usinage des entités P_A et P_B correspond au repère des polyèdres.

A l'aide des données du Tableau IV.6 concernant P_A, les équations (IV.14) et (IV.15) (représentant les ordonnancements et les possibilités de simultanéité) et selon les règles (1,2 et

3), nous pouvons écrire que (où la parenthèse $[U_i \wedge U_j \wedge \dots]$ représente un ensemble des opérations réalisables sur la même broche) :

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge \\ [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\} \quad (IV.22)$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge \\ [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \wedge \\ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e8}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \wedge \\ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \wedge [U_{1e8}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \wedge \\ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \wedge [U_{1e8}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \wedge \\ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \wedge [U_{1e8}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \wedge \\ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \wedge [U_{1e8}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge \\ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \wedge [U_{1e8}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge \\ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \wedge [U_{1e8}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge \\ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \end{array} \right\} \right] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge \\ M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge \delta \left\{ [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \wedge [U_{1e8}^A] \right\} \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge \\ M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \end{array} \right\} \right] \wedge \delta \left\{ [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \wedge [U_{1e8}^A] \right\} \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \right\} \right] \wedge \left[\delta \left\{ [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \right\} \right] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \right\} \right] \wedge [U_{1e7}^A] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \right\} \right] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

W

$$P_A = S \left\{ \left[\delta \left\{ [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A \wedge U_{1e6}^A) \wedge M^3(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \right\} \right] \wedge [U_{1e9}^A] \wedge [U_{1e8}^A] \right\}$$

L'équation (IV.22) présente les 16 solutions d'architecture répondant à la réalisation du couvercle P_A .

De plus, selon l'équation (IV.21), en tenant compte des contraintes d'antériorité (interactions logiques) et l'équation (IV.22), nous pouvons écrire que :

$$\left(\begin{array}{l} \text{solutions} \\ \text{d'architecture} \\ \text{répondent} \\ \text{à } P_A \end{array} \right) = \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} S \left[\begin{array}{l} F_1(\text{suivi Z-}) = \delta \left\{ [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A] \wedge M(U_{2e3}^A \wedge U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \right\} \\ F_2(\text{suivi Y+}) = \{U_{1e8}^A\} \end{array} \right] \rightarrow \text{solution (1)} \\ W \end{array} \right. \\ \left[\begin{array}{l} S \left[\begin{array}{l} F_1(\text{suivi Z-}) = \delta \left\{ [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \right\} \\ F_2(\text{suivi Y+}) = \{U_{1e8}^A\} \\ F_3(\text{suivi Z+}) = \{U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)\} \end{array} \right] \rightarrow \text{solution (2)} \\ W \end{array} \right. \\ \left[\begin{array}{l} S \left[\begin{array}{l} F_1(\text{suivi Z-}) = \delta \left\{ [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \right\} \\ F_2(\text{suivi Y+}) = \{U_{1e8}^A\} \\ F_3(\text{suivi Z+}) = \{U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A\} \wedge M(U_{2e3}^A \wedge U_{2e2}^A) \end{array} \right] \rightarrow \text{solution (3)} \\ W \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (\text{IV.23})$$

$$\left. \begin{array}{l}
\left. \begin{array}{l}
S \left[\begin{array}{l}
F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \\ \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \end{array} \right\} \\
F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \}
\end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (4)} \\
W \\
S \left[\begin{array}{l}
F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \\ \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \end{array} \right\} \\
F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \}
\end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (5)} \\
W \\
S \left[\begin{array}{l}
F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \\ \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \end{array} \right\} \\
F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e3}^A \wedge U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \}
\end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (6)} \\
W \\
S \left[\begin{array}{l}
F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \\ \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \end{array} \right\} \\
F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e3}^A \wedge U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \}
\end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (7)} \\
W \\
S \left[\begin{array}{l}
F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \\ \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \end{array} \right\} \\
F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \}
\end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (8)} \\
W \\
S \left[\begin{array}{l}
F_1(\text{suivi } Z-) = \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \\ (U_{1e6}^A) \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \end{array} \right\} \\
F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e2}^A \wedge U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \}
\end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (9)} \\
W
\end{array} \right. = \left. \begin{array}{l}
\text{solutions} \\
\text{d'architecture} \\
\text{répondent} \\
\text{à } P_A
\end{array} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l}
 [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge \\
 M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)]
 \end{array} \right\} \\
 F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
 F_3(\text{suivi } Z+) = \{U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)\}
 \end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (10)} \\
 W \\
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l}
 [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A)] \\
 \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e9}^A]
 \end{array} \right\} \\
 F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
 F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A] \}
 \end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (11)} \\
 W \\
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l}
 [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A)] \\
 \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A]
 \end{array} \right\} \\
 F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
 F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e9}^A] \}
 \end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (12)} \\
 W \\
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l}
 [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A)] \\
 \wedge M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [U_{1e2}^A \wedge M(U_{2e2}^A)]
 \end{array} \right\} \\
 F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
 F_3(\text{suivi } Z+) = \delta \{ [U_{1e3}^A \wedge M(U_{2e3}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \}
 \end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (13)} \\
 W \\
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l}
 [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge M^4 \\
 (U_{2e6}^A)] \wedge [(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e2}^A \wedge (U_{2e3}^A))] \wedge [U_{1e9}^A]
 \end{array} \right\} \\
 F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
 F_3(\text{suivi } Z+) = \{U_{1e7}^A\}
 \end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (14)} \\
 W \\
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1(\text{suivi } Z-) = \delta \left\{ \begin{array}{l}
 [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge \\
 M^4(U_{2e6}^A)] \wedge [(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e2}^A \wedge (U_{2e3}^A))]
 \end{array} \right\} \\
 F_2(\text{suivi } Y+) = \{U_{1e8}^A\} \\
 F_3(\text{suivi } Z+) = \{U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)\}
 \end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (15)} \\
 W
 \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l}
 \text{(solutions} \\
 \text{d'architecture} \\
 \text{répondent} \\
 \text{à } P_A
 \end{array} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{(solutions} \\ \text{d'architecture} \\ \text{répondent} \\ \text{à } P_A \end{array} \right) = S \left\{ \begin{array}{l} F_1 \text{ (suivi Z-)} = \delta \left\{ \begin{array}{l} [U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge M^4] \\ [(U_{2e6}^A)] \wedge [(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e2}^A \wedge (U_{2e3}^A))] \wedge [U_{1e7}^A] \end{array} \right\} \\ F_2 \text{ (suivi Y+)} = \{U_{1e8}^A\} \\ F_3 \text{ (suivi Z+)} = \{U_{1e9}^A\} \end{array} \right\} \rightarrow \text{solution (16)}$$

L'équation (IV.23) représente les 16 solutions d'architecture répondant à la réalisation de P_A pour le nombre de broches requises dans chaque solution ainsi que les orientations de celles-ci. Il est évident que la broche F_2 ne réalise que U_{1e8}^A à condition que l'exécution de U_{1e8}^A sur F_2 soit réalisée avant l'exécution de U_{1e6}^A et U_{2e6}^B sur F_1 .

Par exemple, la première solution s'appuie sur deux broches F_1 et F_2 actionnées simultanément suivant les directions portées par Z- et Y+ respectivement. La broche F_1 effectue les opérations $[U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge M^4(U_{2e6}^A)]$ avant les autres opérations $[(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e3}^A \wedge U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)]$ ou encore que le processus d'usinage $[(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e3}^A \wedge U_{2e2}^A)] \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)]$ sont assuré préalablement. Par contre, la broche F_2 n'effectue qu'une opération U_{1e8}^A . Nous notons que les autres solutions (2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15 et 16) s'appuient sur l'emploi de trois broches F_1 , F_2 et F_3 qui ont pour directions Z-, Y+ et Z+ successivement.

Par contre pour le carter P_B , à l'aide des données de Tableau IV.6 concernant P_B , ainsi les équations (IV.16) et (IV.17) et selon les règles (1, 2 et 3), nous pouvons écrire les relations suivantes :

$$P_B = S \left\{ \begin{array}{l} \left[\delta[U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge \right. \\ \left. \wedge U_{1e2}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)] \wedge [U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)] \wedge [U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B)] \right] \\ \left[[U_{1e13}^B \wedge M(U_{2e13}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e17}^B)] \wedge [U_{1e14}^B \wedge M^2(U_{2e14}^B) \wedge M^3(u_{1e16}^B)] \right] \end{array} \right\} \quad \text{(IV.24)}$$

W

$$P_B = S \left\{ \begin{array}{l} \left[\delta[U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge \right. \\ \left. \wedge U_{1e2}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)] \wedge [U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)] \right] \\ \left[[U_{1e13}^B \wedge M(U_{2e13}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e17}^B)] \wedge [U_{1e14}^B \wedge M^2(U_{2e14}^B) \wedge M^3(U_{1e16}^B)] \right] \wedge [U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B)] \end{array} \right\}$$

W

$$P_B = S \left\{ \begin{array}{l} \left[\delta[U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge \right. \\ \left. \wedge U_{1e2}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)] \wedge [U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B)] \right] \\ \left[[U_{1e13}^B \wedge M(U_{2e13}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e17}^B)] \wedge [U_{1e14}^B \wedge M^2(U_{2e14}^B) \wedge M^3(u_{1e16}^B)] \right] \wedge [U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)] \end{array} \right\}$$

W

$$P_B = S \left\{ \begin{array}{l} \left[\delta[U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge \right. \\ \left. \wedge U_{1e2}^B) \wedge M^4(U_{2e2}^B)] \right] \\ \left[[U_{1e13}^B \wedge M(U_{2e13}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e17}^B)] \wedge [U_{1e14}^B \wedge M^2(U_{2e14}^B) \wedge M^3(u_{1e16}^B)] \right] \wedge \\ \left[[U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B)] \wedge [U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)] \right] \end{array} \right\}$$

L'équation (IV.24) présente quatre solutions répondant à l'usinage du carter P_B . Selon l'équation (IV.21) et en tenant compte des contraintes d'interactions logiques, nous pouvons écrire pour la pièce P_B que :

$$\left. \begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1 \text{ (suivi Z-)} = \delta \left[\begin{array}{l}
 U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge \\
 U_{2e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B) \wedge M^4(U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \\
 \wedge M^5(U_{1e2}^B) \wedge M^6(U_{2e2}^B)
 \end{array} \right] \\
 \wedge [(U_{1e11}^B \wedge U_{1e12}^B) \wedge M(U_{2e11}^B \wedge U_{2e12}^B)]
 \end{array} \right] \rightarrow \text{solution (1)} \\
 F_2 \text{ (suivi Y+)} = \left[\begin{array}{l}
 (U_{1e13}^B \wedge U_{1e14}^B) \wedge M(U_{2e13}^B \wedge U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e16}^B) \\
 \wedge M^3(U_{1e17}^B)
 \end{array} \right]
 \end{array} \right. \\
 W \\
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1 \text{ (suivi Z-)} = \delta \left[\begin{array}{l}
 U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge \\
 U_{2e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B) \wedge M^4(U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \\
 \wedge M^5(U_{1e2}^B) \wedge M^6(U_{2e2}^B)
 \end{array} \right] \\
 \wedge [U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B)]
 \end{array} \right] \rightarrow \text{solution (2)} \\
 F_2 \text{ (suivi Y+)} = \left[\begin{array}{l}
 (U_{1e13}^B \wedge U_{1e14}^B) \wedge M(U_{2e13}^B \wedge U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e16}^B) \\
 \wedge M^3(U_{1e17}^B)
 \end{array} \right] \\
 F_3 \text{ (suivi Z+)} = [U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)]
 \end{array} \right. \\
 W \\
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1 \text{ (suivi Z-)} = \delta \left[\begin{array}{l}
 U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge \\
 U_{2e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B) \wedge M^4(U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \\
 \wedge M^5(U_{1e2}^B) \wedge M^6(U_{2e2}^B)
 \end{array} \right] \\
 \wedge [U_{1e11}^B \wedge M(U_{2e11}^B)]
 \end{array} \right] \rightarrow \text{solution (3)} \\
 F_2 \text{ (suivi Y+)} = \left[\begin{array}{l}
 (U_{1e13}^B \wedge U_{1e14}^B) \wedge M(U_{2e13}^B \wedge U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e16}^B) \\
 \wedge M^3(U_{1e17}^B)
 \end{array} \right] \\
 F_3 \text{ (suivi Z+)} = [U_{1e12}^B \wedge M(U_{2e12}^B)]
 \end{array} \right. \\
 W \\
 S \left[\begin{array}{l}
 F_1 \text{ (suivi Z-)} = \delta \left[\begin{array}{l}
 U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge \\
 U_{2e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B) \wedge M^4(U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \\
 \wedge M^5(U_{1e2}^B) \wedge M^6(U_{2e2}^B)
 \end{array} \right] \\
 F_2 \text{ (suivi Y+)} = \left[\begin{array}{l}
 (U_{1e13}^B \wedge U_{1e14}^B) \wedge M(U_{2e13}^B \wedge U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e16}^B) \\
 \wedge M^3(U_{1e17}^B)
 \end{array} \right] \rightarrow \text{solution (4)} \\
 F_3 \text{ (suivi Z+)} = [(U_{1e11}^B \wedge U_{1e12}^B) \wedge M(U_{2e11}^B \wedge U_{2e12}^B)]
 \end{array} \right]
 \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l}
 \text{solutions} \\
 \text{d'architecture} \\
 \text{répondent} \\
 \text{à } P_B
 \end{array} \right\} \quad (IV.25)$$

L'équation (IV.25) représente les solutions d'architecture répondant à l'usinage de la pièce P_B et aux nombres des broches requises dans chaque solution.

En conséquence, selon les règles (1, 2 et 3), nous avons identifié 16 solutions d'architecture géométrique représentées par l'équation (IV.23), elles sont une réponse à la réalisation du

couvrete P_A. Par contre, quatre solutions d'architecture géométrique identifiées dans l'équation (IV.25) répondent à l'exécution du carter P_B.

IV.6.3 Architecture cinématique

Dans l'étape précédente, nous avons défini des solutions d'architecture géométriques, le nombre et les orientations de broches sans préjuger des mouvements qu'elles doivent assurer pour réaliser les différentes opérations. Par ailleurs, dans le chapitre III, nous avons introduit les mouvements admissibles par broches (mouvements rapides Mr - position et décalage) et mouvement de travail - Mt) assurant la réalisation des processus requis à l'exécution des entités.

En effet, chaque broche est supportée par des modules de support (axes) permettant d'assurer des mouvements globaux nécessaires à la réalisation des tâches d'usinage de celle-ci. Ainsi, la spécification des modules est fonction de la définition des mouvements nécessaires. Nous utilisons la représentation par Matrice de Transformation en coordonnées Homogènes (MTH) comme un outil de modélisation en vue spécifier les mouvements requis à chaque broche.

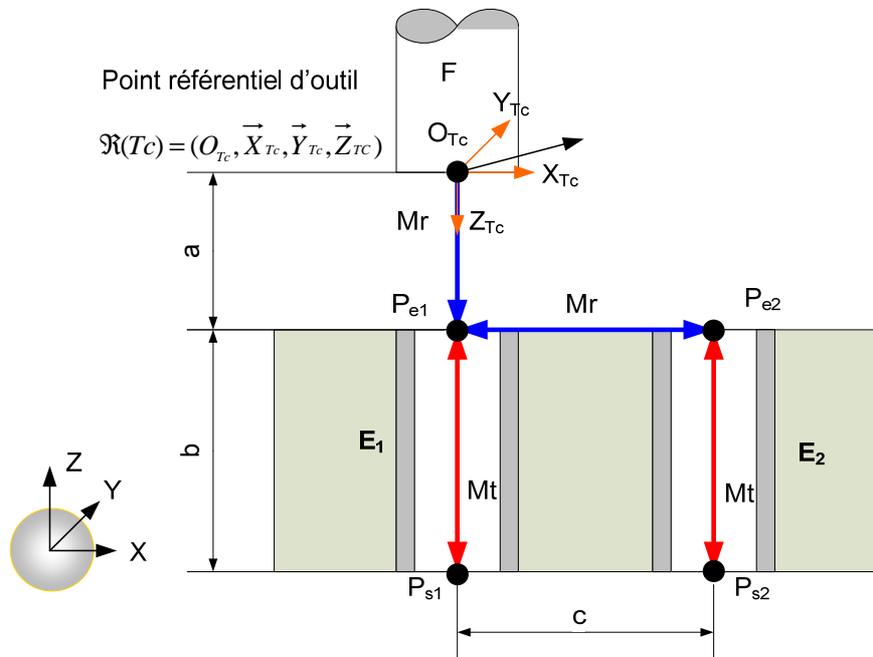


Figure IV.12. Mouvements des broches.

Par exemple, soit (Figure IV.12) E₁ et E₂ deux entités à usiner par des opérations d'alésage U₁ et U₂ en utilisant un outil d'alésage porté par la broche F suivant la direction Z-, il faut définir les mouvements admissibles de F à la réalisation de deux opérations U₁ et U₂ des entités. Afin d'usiner les deux entités, le Tableau IV.7 spécifie les mouvements requis de la broche F.

Pour E ₁			Pour E ₂		
Mouvements	Type	MTH	Mouvements	Type	MTH
de O _{Tc} à P _{e1}	Mr	${}_{O_{Tc}}T^{P_{e1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	de P _{e1} à P _{e2}	Mr	${}_{P_{e1}}T^{P_{e2}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & c \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

de P_{e1} à P_{s1}	Mt	${}_{Pe1}T^{Ps1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	de P_{e2} à P_{s2}	Mt	${}_{Pe2}T^{Ps2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
de P_{s1} à P_{e1}	Mr	${}_{Ps1}T^{Pe1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	de P_{s2} à P_{e2}	Mr	${}_{Ps2}T^{Pe2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Tableau IV.7. Mouvements globaux de la broche F.

Nous notons qu'un ensemble de mouvements (${}_{OTc}T^{Pe1}$, ${}_{Pe1}T^{Ps1}$, ${}_{Ps1}T^{Pe1}$, ${}_{Pe2}T^{Ps2}$ et ${}_{Ps2}T^{Pe2}$) est porté par l'axe Z et représente deux types de mouvements (rapide Mr et travail Mt), tandis que ${}_{Pe1}T^{Pe2}$ porté par l'axe X ne présente qu'un seul type de mouvement (rapide).

Pour définir les axes puis fusionner les mouvements associés à chaque axe, nous simulons tous les mouvements globaux (Figure IV.12) dans un système des coordonnées (Figure IV.13) dont l'origine du système correspond à l'origine de l'outil de coupe O_{Tc} . Dans la Figure IV.13, nous rapportons tous les mouvements de broche F qui sont portés par les axes Z et X ainsi que les amplitudes de ceux-ci, lesquels sont spécifiées par des valeurs minimales et maximales (courses des axes).

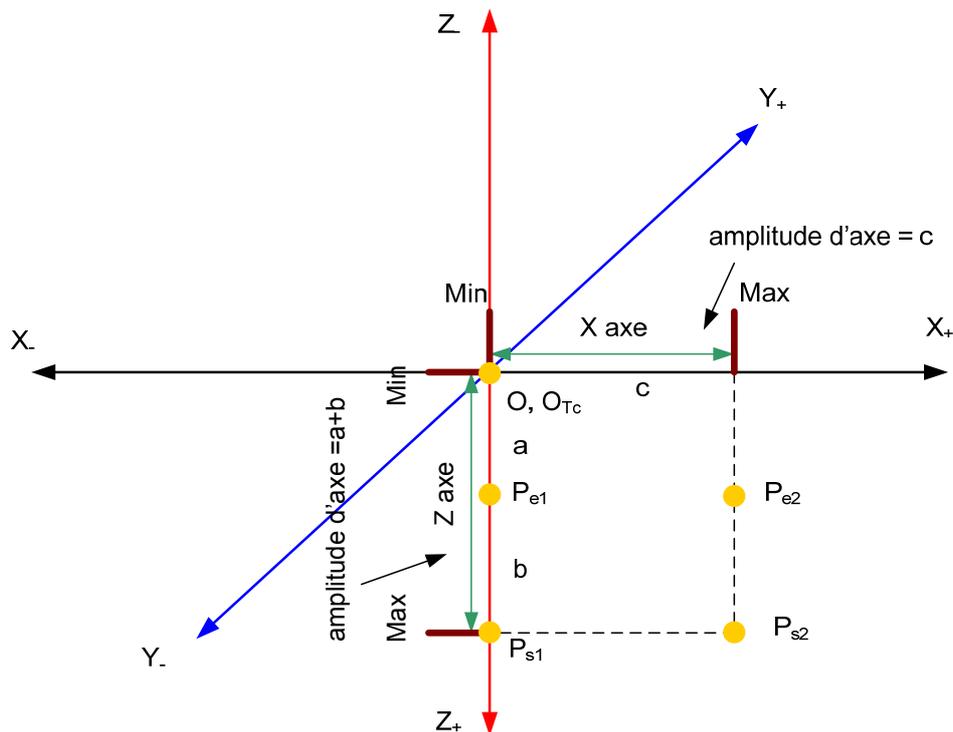


Figure IV.13. Représentations des mouvements de broche sur le système de coordonnées.

La broche F (Figure IV.12) pour réaliser les tâches d'usinage (opérations U_1 et U_2), doit être portée par deux axes. Le premier correspondant à la direction Z du système de coordonnées avec l'amplitude (a+b) qui réalise des mouvements du type rapide et travail. Le deuxième axe

correspond à la direction X avec l'amplitude (c) qui ne réalise que des mouvements de type rapide. Dans la Figure IV.14, le diagramme fonctionnel de la broche F représente la réponse à l'exécution des entités E₁ et E₂.

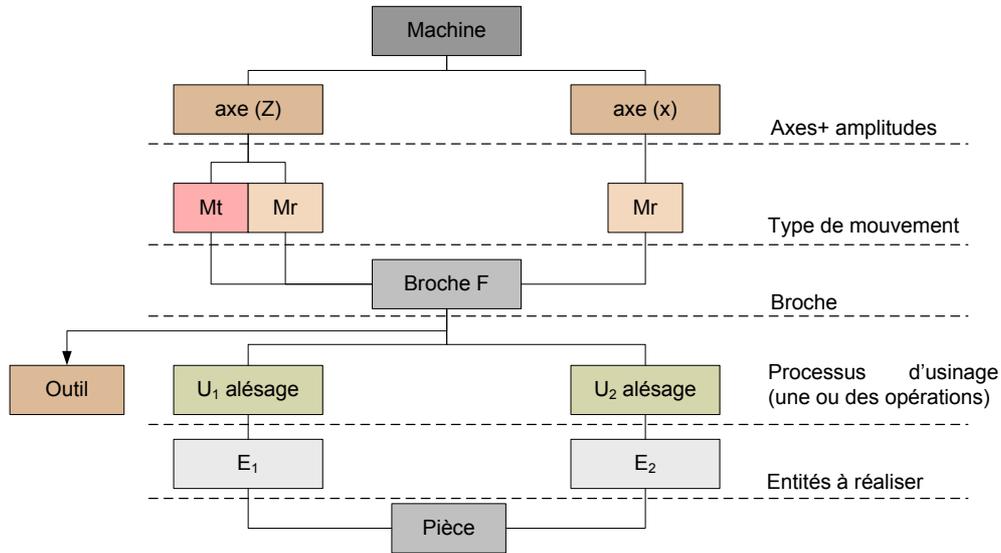


Figure IV.14. Diagramme fonctionnel.

De la même façon, nous pouvons spécifier tous les mouvements affectés aux broches de la MOR. Ainsi, l'architecture cinématique est complètement définie.

Pour ce faire, nous avons utilisé le vecteur dual pour représenter les mouvements et les limites de courses de chaque axe. Selon les travaux de Moon et Kota [Moon et Kota, 1998, 2002], la transformation de mouvement (S_M) est définie par une position et une orientation différente entre deux objets rigides ou entre deux positions d'un objet rigide. Le vecteur dual comprend trois composants du mouvement : le domaine (M) de l'axe correspondant (amplitude de translation ou de rotation), le type, la position et l'orientation du mouvement. Ces quantités sont représentées comme vecteur dual (S_M) par l'équation.

$$S_M = [M](PA + \varepsilon PL)\{I + \varepsilon I_0\} \tag{IV.26}$$

(M) exprime l'amplitude (limite de course). Deux situations se présentent à nous :

un mouvement continu, l'expression de l'amplitude s'écrit : $[M] = \{[M_{\max}, M_{\min}; M_{actuel}]\}$

un mouvement discontinu, l'expression de l'amplitude s'écrit : $[M] = \{[M_1, M_0, \dots; M_{actuel}]\}$

(PA) et (PL) traduisent le pas angulaire et linéaire du déplacement avec comme paramètres (θ) représentant l'angle de rotation autour l'axe de rotation et (d) la translation sur le même axe. A ces informations, la discrimination des mouvements peut s'écrire :

mouvement en rotation $PA = \begin{cases} 1..si\theta \neq 0 \\ 0..si\theta = 0 \end{cases}$	mouvement en translation $PL = \begin{cases} d \\ \theta \\ 1..si\theta = 0 \end{cases}$
--	--

Soit, $I = (x, y, z)$ représente la direction du mouvement et $I_0 = (x_0, y_0, z_0)$ présente l'origine de l'axe de mouvement.

La représentation d'architecture de la MOR par broche est définie par le vecteur dual (Cf. Figure IV.12) et en tenant compte des amplitudes (Cf. Figure IV.13). L'expression devient :

Broche (position initiale)	Type	Mouvement requis, limite de course
$F = (0 + \varepsilon 0) \{ [0,0,1]^T + \varepsilon \{0,0,0\}^T \}$	Mr	$X_f = [c,0;0](0 + \varepsilon 1) \{ [1,0,0]^T + \varepsilon \{0,0,0\}^T \}$
	Mt + Mr	$Z_f = [a + b,0;0](0 + \varepsilon 1) \{ [0,0,1]^T + \varepsilon \{0,0,0\}^T \}$

IV.6.4 Critères de choix des solutions

Les différentes solutions d'architecture peuvent être spécifiées par deux critères. Le premier s'appuie sur la productivité et le deuxième sur les aspects financiers (coût intégrant le nombre de broches associé au nombre d'entrées et de sorties à gérer ainsi que la synchronisation d'axes). Toutes les solutions peuvent être formalisées par l'assemblage des modules (composants) fonctionnels pour être validées. Pour chacune de ces solutions, il est nécessaire de comparer leurs productivités et surtout leurs efficacités. En première approximation, il suffit pour cela d'évaluer les temps d'activité (temps d'usinage), temps de positionnement, temps de changement des outils et les temps techno-manuels (montage, démontage) aux solutions d'architecture. Par ailleurs, une rapide estimation des charges financières pourra être effectuée à partir du nombre de broches et du nombre d'axes mis en jeu ainsi que de la synchronisation de ceux-ci.

Concernant la MOR de couvercle P_A , nous évaluons les temps d'activité (temps d'usinage), les temps de changement d'outil et les temps de déplacement rapide (positionnement, décalage) entre l'usinage des entités associées à une même broche. Nous nous sommes imposé (hypothèses simplistes) que le changement d'outil s'effectue pendant 5 secondes tandis que le déplacement rapide s'effectue pendant 2 secondes. De même, nous avons imposé également les temps techno-manuels (15 secondes pour le montage et 15 secondes pour le démontage).

Les solutions d'architecture peuvent être :

- L'une (unique) d'elles satisfait la demande de productivité ;
- Plusieurs solutions répondent à la demande, choix à développer en fonction des charges financières ;
- Aucune d'elles répond à la demande (productivité faible), dans ce cas, nous augmentons le nombre de broches (pour la solution préférable au niveau de productivité) ;
- Aucune d'elles répond à la demande (productivité augmentée), dans ce cas, nous appliquons la méthode de fusion des broches (ajout des mouvements polaires par exemple) ;
- Toutes les solutions répondent à la demande ; il convient de rechercher la productivité la plus importante.

En vue d'évaluer les différents critères de choix comme la productivité et les charges financières, nous vous proposons l'étude des pièces P_A et P_B .

Evaluation des solutions de la MOR pour le couvercle P_A .

La Figure IV.15 représente les caractéristiques des solutions d'architecture possibles pour la réalisation du couvercle P_A en termes de la productivité.

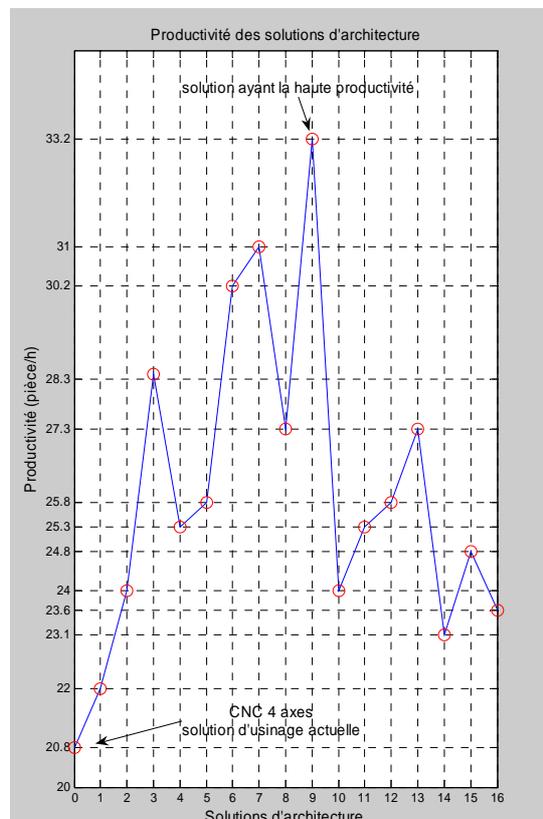


Figure IV.15. Caractères des solutions d'architecture de P_A en termes de productivité

Les solutions identifiées (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15 et 16) représentent respectivement les ordonnancements résultants de l'équations (IV.23). Dans la Figure IV.15, il apparaît que la 9^{ème} solution présente l'avantage en terme de productivité avec une capacité d'usinage 33 pièces/h. Par contre, la 1^{ère} solution est la plus faible avec une capacité d'usinage 22 pièces/h. Les autres solutions ont des capacités d'usinage entre 23-31 pièces/h. A l'heure actuelle, rappelons que cette pièce est usinée sur des centres d'usinage CNC 4 axes d'ancienne génération avec une capacité est environ 20 pièce/h. Nous pouvons dire que l'utilisation de MOR est plus productive que la solution de référence.

D'autre part, la Figure IV.16 montre en termes de charges financières (nombre des broches, nombre des axes) les caractéristiques des solutions d'architecture de P_A . Selon la Figure IV.16.a, la 1^{ère} solution a un avantage financier en termes du nombre de broches (plus économique, utilisation que de 2 broches). Par contre, nous notons que les autres solutions sont équivalentes en termes de nombre de broches utilisées (3 broches). Au bilan et selon la Figure IV.16.b, la 1^{ère} solution est moins onéreuse (nombre des axes limités à 4) tandis que les autres solutions (de 2^{ème} à 16^{ème}) sont plus couteuses.

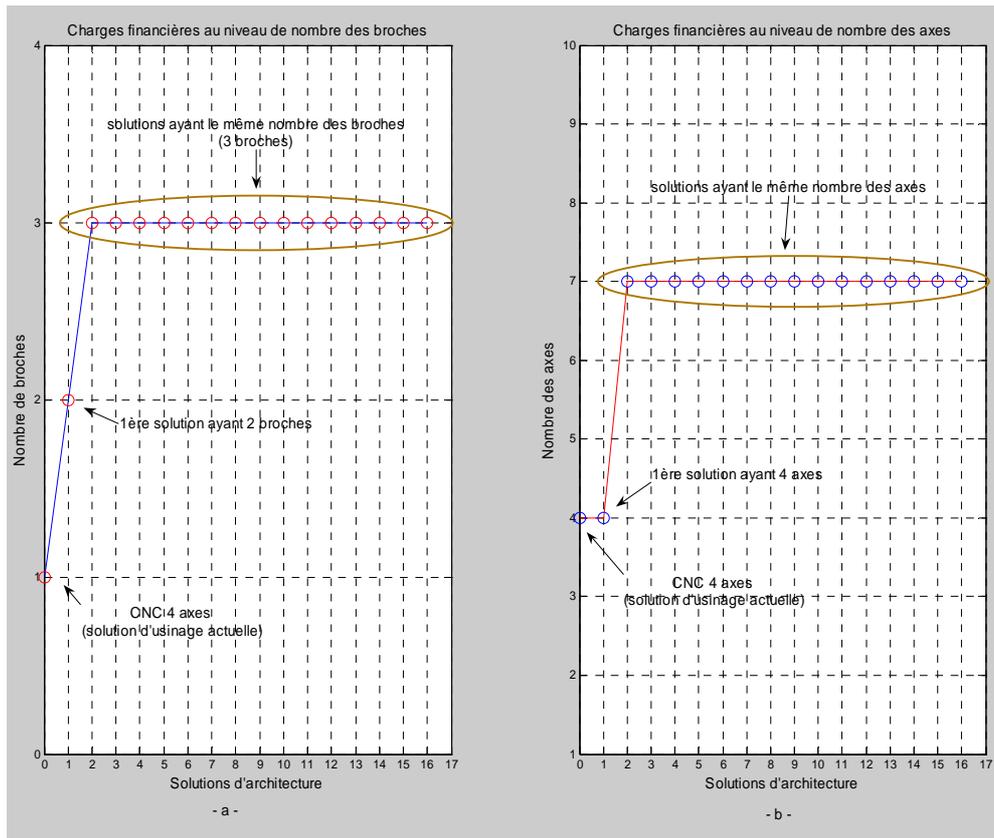


Figure IV.16. Caractères des solutions (concernant P_A) en termes d'économie.

En première approximation, nous déduisons que les charges financières des solutions (2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13, 14,15 et 16) sont identiques (au niveau du nombre des broches et des axes). A ce stade de l'étude, nous ne pouvons pas effectuer une discrimination par les charges financières.

Au bilan, la 9^{ème} solution (réalisation avec 3 broches) à un niveau de productivité supérieur.

Par ailleurs, nous notons que la 1^{ère} solution est plus économique de la 9^{ème} solution, mais elle est également plus faible en termes d'efficacité.

Pour réaliser la pièce P_A , le choix porte sur deux solutions (1^{ère} ou 9^{ème} solutions). Notre travail a imposé une demande actuelle du client de plus de 30 pièces/h, ainsi le choix d'architecture porte sur une MOR à trois broches respectant l'ordonnancement relatif à la 9^{ème} solution et assurant une meilleure productivité du couvercle P_A .

Evaluation des solutions de la MOR pour le couvercle P_B .

S'agissant du carter P_B , la Figure IV.17 représente les caractéristiques des solutions d'architecture (ayant une réponse active à la réalisation de P_B) en termes de la productivité. Les solutions identifiées (1, 2, 3, et 4) s'appuient respectivement sur les ordonnancements résultants de l'équation (IV.25). Rappelons que le carter P_B est actuellement usiné sur des centres d'usinage CNC 4 axes d'ancienne génération avec une capacité est environ 15 pièce/h.

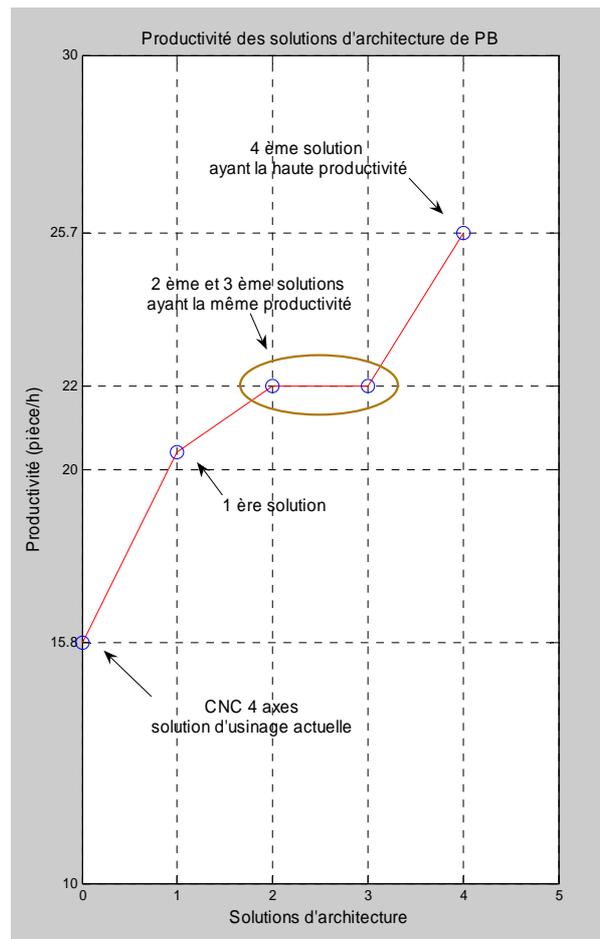


Figure IV.17. Caractères des solutions d'architecture de P_B en termes de productivité

D'après la Figure IV.17, il apparaît que la 4^{ème} solution est en terme de productivité avec une capacité d'usinage 25 pièces/h la plus performante tandis que la 1^{ère} solution est la plus faible avec une capacité d'usinage 20 pièces/h. Par contre, les 2^{ème} et 3^{ème} solutions sont identiques en termes de capacité d'usinage (22 pièces/h).

Selon la Figure IV.18.a, le nombre de broches le plus faible est attribué à la 1^{ère} solution et est plus économique (2 broches). En revanche, les autres solutions (2, 3 et 4) ne peuvent être discriminées. Dans la Figure IV.18.b, le nombre d'axes permet de déterminer que la 1^{ère} solution est également moins onéreuse tandis que les autres solutions (2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème}) sont plus chères.

Pour conclure, les charges financières des solutions (2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème}) sont équivalentes en fonction du nombre des broches et du nombre d'axes. Mais, la 4^{ème} solution est plus intéressante en termes de la productivité. Ainsi, les 2^{ème} et 3^{ème} solutions sont à exclure. Or, le choix est limité entre 1^{ère} et 4^{ème} solutions, la 1^{ère} solution est plus économique mais moins productive. Alors, notre décision se fait en fonction de deux critères productivité et coût. La demande de client imposée par le client est au moins 25 pièces/h, ainsi le choix d'architecture porte sur une MOR à trois broches de la 4^{ème} solution assurant une meilleure productivité du couvercle P_B .

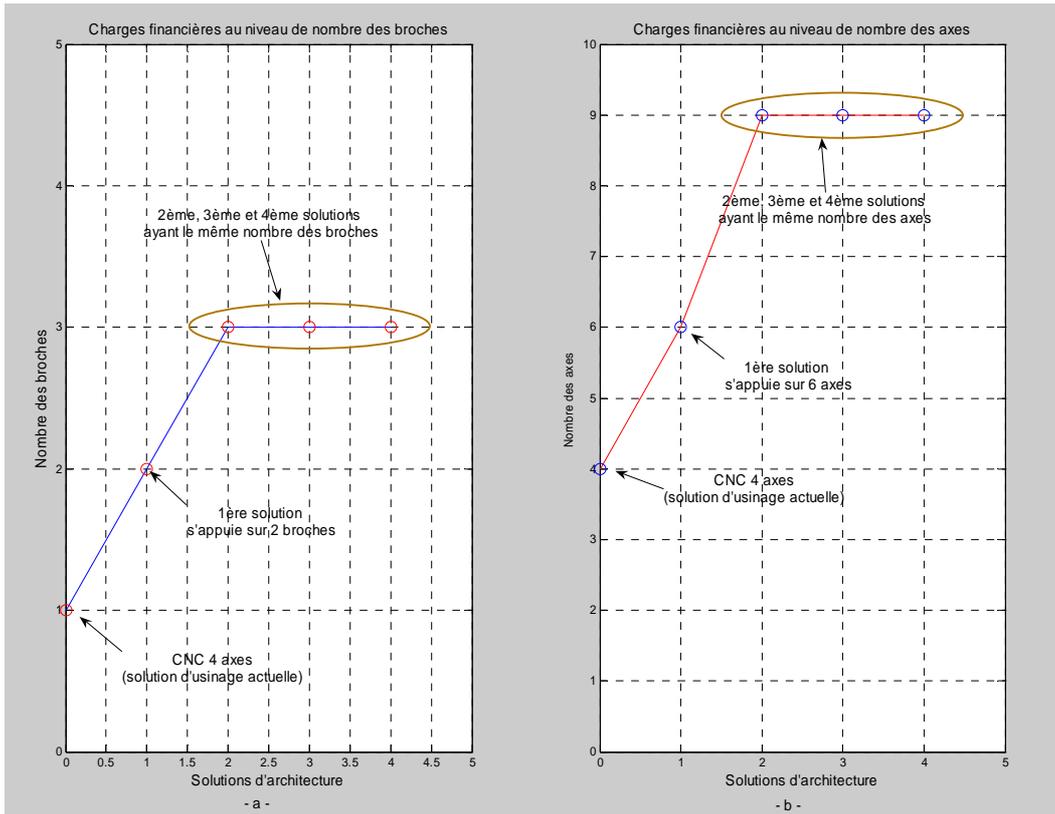


Figure IV.18. Caractères des solutions (concernant P_B) en termes d'économie

La MOR pour les pièces P_A et P_B.

En conséquence, la MOR s'appuyant sur trois broches F₁, F₂ et F₃ correspondant avec les orientations Z-, Y+, Z+ successivement est une proposition de solution à la réalisation de la famille de pièces P_A et P_B et aux demandes de client actuelles.

D'après la Figure IV.19, nous proposons un diagramme fonctionnel exprimant l'architecture (géométrique et cinématique) de la MOR multibroches répondant à la réalisation de familles de pièces P_A et P_B. La MOR s'articule autour de l'utilisation de trois broches F₁, F₂ et F₃ orientées suivants Z-, Y+ et Z+. Chaque broche est portée par trois axes X, Y et Z, actionnées par une moteur et contrôlées par un système d'asservissement en position et en vitesse. A partir de la solution 9 pour P_A et respectivement la solution 4 pour P_B, chaque broche doit exécuter les opérations suivantes pour chacune des entités selon les équations ci-après.

$$S \begin{bmatrix} \text{broche } F_1 \text{ (suivi Z-)} = \{U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge M^4(U_{2e6}^A)\} \\ \text{broche } F_2 \text{ (suivi Y+)} = \{U_{1e8}^A\} \\ \text{broche } F_3 \text{ (suivi Z+)} = \delta\{(U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e2}^A \wedge U_{2e3}^A)\} \wedge [U_{1e7}^A \wedge M(U_{1e9}^A)] \} \end{bmatrix} \rightarrow P_A$$

$$S \begin{cases} \text{broche } F_1 \text{ (suivi } Z^-) = \delta \left[\begin{array}{l} U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B \wedge) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge) \\ U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B \wedge M^4(U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^5(U_{1e2}^B) \wedge M^6(U_{2e2}^B) \end{array} \right] \\ \text{broche } F_2 \text{ (suivi } Y^+) = \left[(U_{1e13}^B \wedge U_{1e14}^B) \wedge M(U_{2e13}^B \wedge U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e16}^B) \wedge M^3(U_{1e17}^B) \right] \\ \text{broche } F_3 \text{ (suivi } Z^+) = \left[(U_{1e11}^B \wedge U_{1e12}^B) \wedge M(U_{2e11}^B \wedge U_{2e12}^B) \right] \end{cases} \rightarrow P_B$$

La Figure IV.19 décrit l'architecture

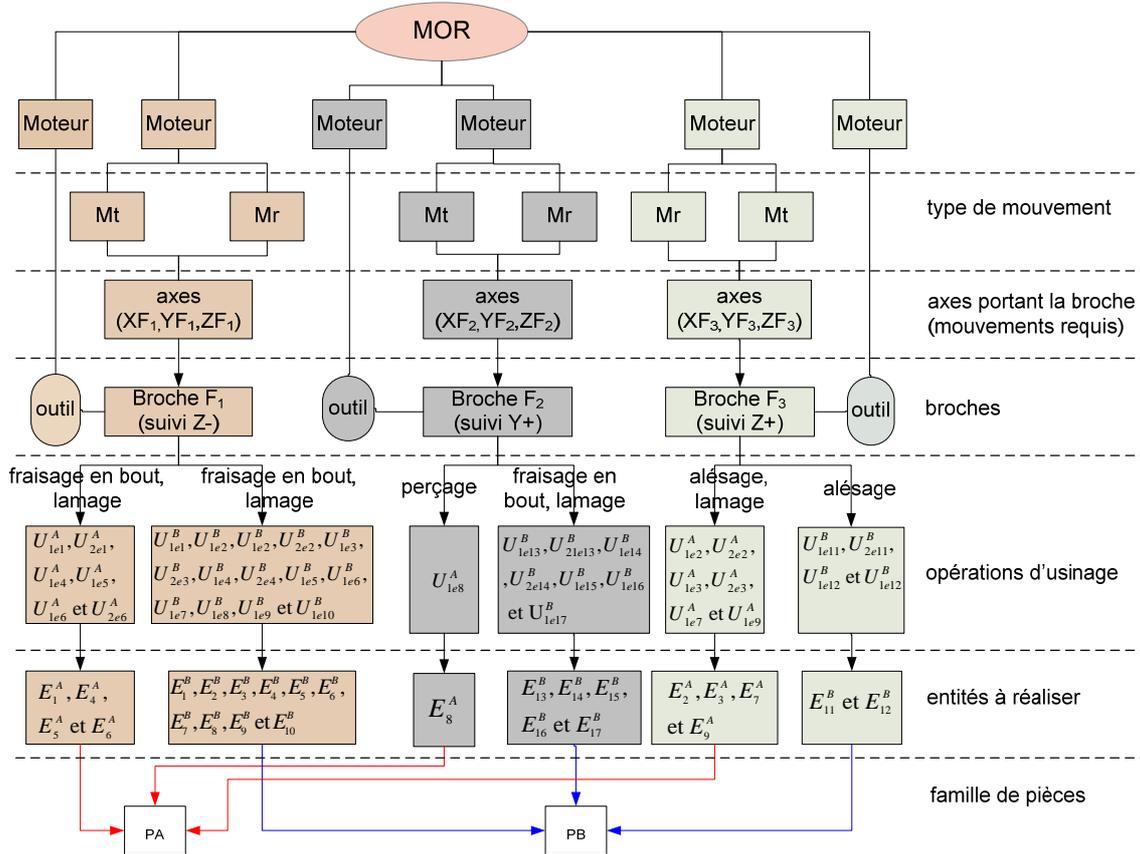


Figure IV.19. Diagramme fonctionnel de la MOR répondant à la réalisation des pièces P_A et P_B .

Associé au diagramme fonctionnel de MOR répondant la réalisation de la famille de pièces P_A et P_B , nous devons exprimer pour chaque axe et dans un repère $\mathcal{R}(P)$ de pièce (position initiale d'outil), la représentation des mouvements et des courses de l'architecture de la MOR par l'emploi des vecteurs duaux :

Broche (position initiale)	Mouvements requis, limite de course
$F_1 = (0 + \varepsilon 0) \left[\{0,0,1\}^T + \varepsilon \{0,0,0\}^T \right]$	$XF_1 = [71.76, -71.72; 0](0 + \varepsilon 1) \left[\{1,0,0\}^T + \varepsilon \{0,0,0\}^T \right]$
	$YF_1 = [75.15, -36.08; 0](0 + \varepsilon 1) \left[\{0,1,0\}^T + \varepsilon \{0,0,0\}^T \right]$
	$ZF_1 = [1, -50; 0](0 + \varepsilon 1) \left[\{0,0,1\}^T + \varepsilon \{0,0,0\}^T \right]$

$F_2 = (0 + \varepsilon 0)\{0,1,0\}^T + \varepsilon\{0,0,0\}^T$	$XF_2 = [94.78, -189.72; 0](0 + \varepsilon 1)\{1,0,0\}^T + \varepsilon\{0,0,0\}^T$
	$YF_2 = [2, -28; 0](0 + \varepsilon 1)\{0,1,0\}^T + \varepsilon\{0,0,0\}^T$
	$ZF_2 = [31.35, -37.7; 0](0 + \varepsilon 1)\{0,0,1\}^T + \varepsilon\{0,0,0\}^T$
$F_3 = (0 + \varepsilon 0)\{0,0,1\}^T + \varepsilon\{0,0,0\}^T$	$XF_3 = [30.7, -30.7; 0](0 + \varepsilon 1)\{1,0,0\}^T + \varepsilon\{0,0,0\}^T$
	$YF_3 = [44.46, 0; 0](0 + \varepsilon 1)\{0,1,0\}^T + \varepsilon\{0,0,0\}^T$
	$ZF_3 = [0, -58.5; 0](0 + \varepsilon 1)\{0,0,1\}^T + \varepsilon\{0,0,0\}^T$

IV.7 Configuration et reconfiguration de MOR

Le concept de MOR s'appuie sur la notion de reconfiguration soit un changement de productivité et de flexibilité, en s'appuyant sur la technologie (mécanique, électrique commande...) parallèlement avec les changements de demande (productivité, taille, forme...).

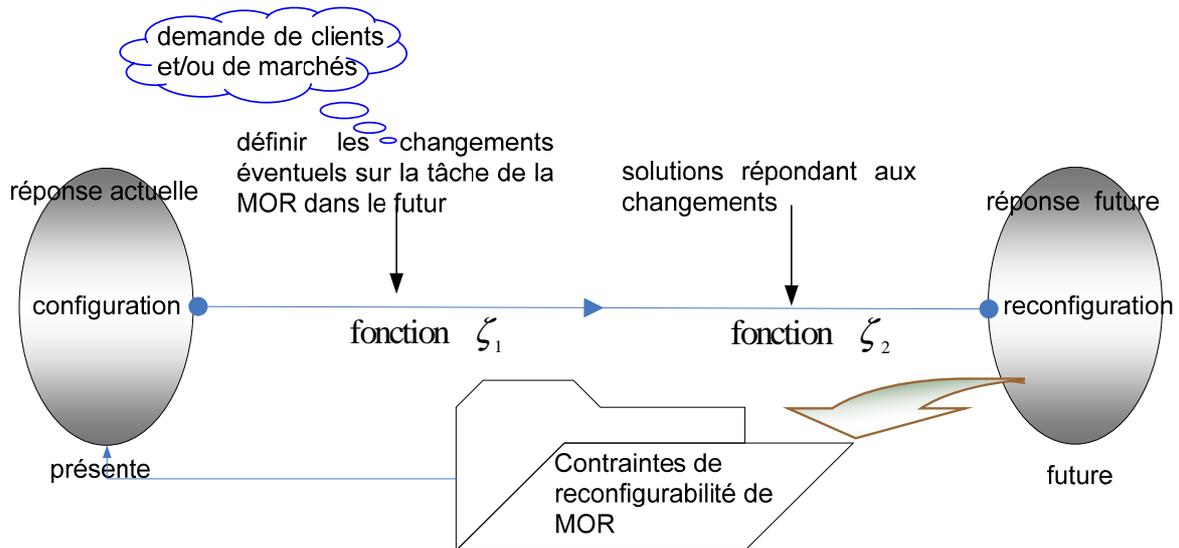


Figure IV.20. Configuration et reconfiguration de MOR.

Or, la MOR doit avoir des réponses aux demandes actuelles et également futures. Ainsi, on a caractérisé la MOR par une configuration répondant aux demandes présentes et une reconfiguration répondant au futur. En effet, nous introduisons la configuration comme une solution par ajout ou retrait de composants (broches, axes, modification des coudes et amplitudes) de la MOR permettant la réalisation de la tâche d'usinage (famille de pièces) en tenant compte des demandes de client et/ou de marché. Le passage d'une configuration à une autre configuration est fonction des contraintes qui doivent être prises en compte lors de la

conception de la machine s'ajoutant aux contraintes présentes, nous appelons ces contraintes « contraintes de reconfigurabilité » permettant d'effectuer l'évolution future (Figure IV.20).

Notre approche pour configurer la MOR s'appuie selon les points de vues suivantes :

- définir ou prévoir les demandes de clients et/ou du marché du présent et du futur ;
- spécifier les solutions d'architecture possibles ;
- choisir la solution pertinente de la demande (configuration) ;
- définir les contraintes de reconfigurabilité permettant le passage d'une configuration à une reconfiguration et répondant aux demandes futures ;
- prendre en compte les contraintes de reconfigurabilité lors de la génération de MOR.

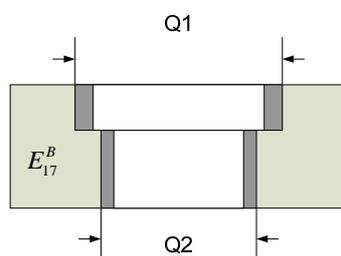
Nous ne présentons que les deux derniers points en vue de traiter la configuration de MOR. Nous décrivons le passage d'une configuration à une autre en fonction de l'évolution de productivité et/ou de flexibilité. Nous proposons deux modes de reconfiguration, le premier sans changements de structure de MOR, quant au deuxième avec changement de structure.

IV.7.1 Reconfiguration sans changement de structure

La reconfiguration sans changement de structure doit être envisageable. Les éléments qui permettent le changement correspondent aux types d'outils utilisés comme les outils combinés et les porte-outils à broches multiples. De même, la reconfiguration peut aussi être liée à la flexibilité de la commande numérique.

IV.7.1.1 Changement de configuration utilisant les outils de coupe combinés (flexibilité)

Les outils de coupe appelés outils de coupe combinés (Figure IV.21) permettent de réaliser plusieurs surfaces d'une entité (exemple : percer, chanfreiner et lamer) en une unique et même action.



Première solution conventionnel

- alésage Q2 puis Q1

Deuxième solution

- alésage Q1 et Q2 ensemble par utiliser des outils avancés (Sandvik Coromant U)

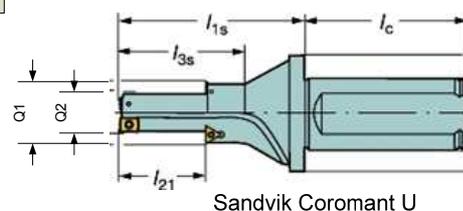


Figure IV.21. Configuration par des outils de coupe avancés.

Prenons par exemple la réalisation de l'entité E_{17}^B (Figure IV.21). Nous comparons les deux situations permettant de réaliser cette entité. Dans le premier cas, utilisation d'outils de coupe et les processus associés pour chaque surface, le programme d'usinage de E_{17}^B est :

```
<<
chargement d'outil : (5 sec) ;
positionnement (2 sec) ;
alésage Q1 : (0.7 sec) ;
changement d'outil : (5 sec) ;
positionnement : (2 sec) ;
alésage : Q2 (4.7 sec)
>>
temps d'usinage total =19.4 sec
```

En utilisant un outil combiné, le programme d'usinage est :

```
<<
Chargement d'outil : 5sec
Positionnement : 2 sec
alésage séquentiel Q1 et Q2 : (6.9 sec) ;
>>
temps d'usinage total =13.9 sec
```

Le gain est, à conditions de coupe équivalentes, de passer de 19.4 à 13.9 secondes (réduction de 5,5 secondes) avec la gestion d'un seul porte-outil et son outil mais à plusieurs arêtes (plusieurs plaquettes) de coupe.

Dans notre exemple d'application pour assurer une reconfiguration, nous remarquons l'impossibilité d'emploi de ce type d'outil combiné concernant la réalisation de P_A (il n'existe pas d'entité réalisable par ce type des outils) en fonction des différences de morphologie des entités. Par contre, nous pouvons appliquer ce concept d'outils combinés sur l'entité E_{17}^B de P_B (permettant de réduire le temps d'usinage sur F_2 suivant $Y+$ avec un gain de l'ordre de 51.3 à 45.8 secondes). Mais ce gain temporel est sans intérêt sur le temps global d'usinage de la pièce P_B . Le temps d'usinage de la broche F_1 est 109.72 secondes représentant le temps d'usinage de la pièce hors de temps technico-manuels. Ainsi, ce type de reconfiguration par l'utilisation d'outils combinés n'apporte pas de gain en temps significatif sur notre exemple d'application.

Or de tels outils de coupe comportent des limites et des performances d'emploi dans le cadre de ces systèmes reconfigurables. Les avantages sont indéniablement la réduction des temps d'usinage par concaténation des opérations portées par un outil unique (optimisation locale). Son corollaire est la réduction des changements d'outils. Néanmoins, les inconvénients concernent la conception de ces outils combinés (géométries complexes, les opérations d'ébauche et de finition, conditions opératoires variables selon la position des points ou arêtes génératrices, efforts et puissances de coupe souvent plus importantes, évacuation des copeaux, vibrations...). En conséquence, les coûts de ce type d'outil augmentent et la flexibilité en est diminuée.

Les contraintes requises à l'application des outils combinés employées sur la MOR est fonction essentiellement de la morphologie des entités (trou chanfreiné, trou lamé, trou lamé chanfreiné...) pour l'étude des temps et son impact dans le temps global de production (productivité, cadence) ainsi que de la taille de la série pour évaluer le coût.

IV.7.1.2 Changement de configuration utilisant des broches multiples

La reconfiguration par l'emploi de broches multiples (remplacement la broche simple par une broche multiples) est conditionnée par :

- des opérations homogènes effectuées par la broche (par exemple les opérations axiales) ;
- des entités homogènes (identiques) à usiner ;
- l'absence de relations d'antériorité entre les opérations entre les entités ;
- des conditions de coupe (vitesse d'avance) compatibles.

Prenons par exemple, les entités E_{11}^B et E_{12}^B (Figure IV.22) qui sont homogènes (identiques) ayant les mêmes processus d'usinage $(U_{1e11}^B \wedge U_{1e12}^B) \wedge M(U_{2e11}^B \wedge U_{2e12}^B)$.

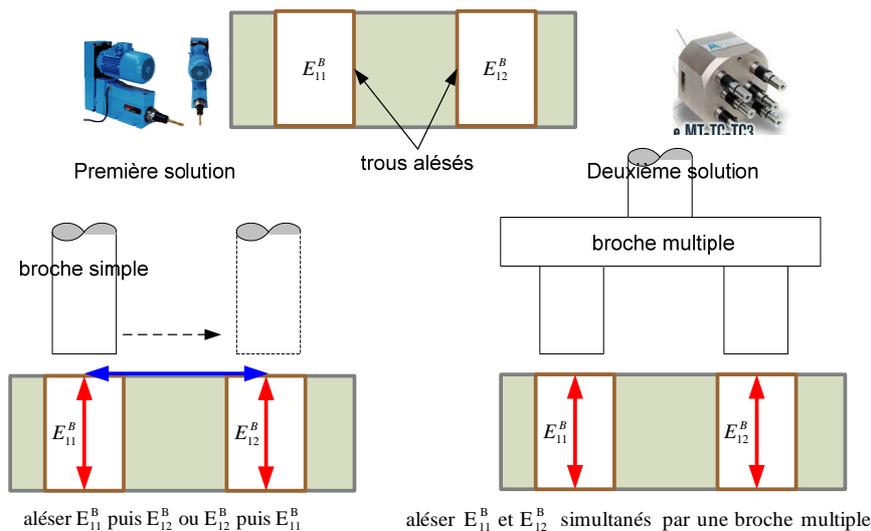


Figure IV.22. Configuration par des broches multiples.

L'évaluation du temps de réalisation de ces entités par l'usinage successif est définie par le programme d'usinage suivant :

```
<<
// [ $U_{1e11}^B \wedge M(U_{1e12}^B)$ ] ou [ $U_{1e12}^B \wedge M(U_{1e11}^B)$ ]//
Chargement d'outil : 5
Positionnement : 2
Opération d'alésage ébauche  $U_{1e11}^B$  : 2.6
```

Positionnement : 2
 Opération d'alésage ébauche U_{1e12}^B : 2.6
 // $[U_{2e11}^B \wedge M(U_{2e12}^B)]$ ou $[U_{2e12}^B \wedge M(U_{2e11}^B)]$ //
 changement d'outil : 5
 positionnement : 2
 opération d'alésage finition U_{2e11}^B : 6.6
 positionnement : 2
 opération d'alésage finition U_{2e12}^B : 6.6
 >>
 temps d'usinage = 36.4 sec

Par contre, l'emploi de broches multiples pour la réalisation de ces entités, l'évaluation des temps de fabrication est le suivant :

<<
 // $S[U_{1e11}^B \wedge U_{1e12}^B]$ //
 Chargement d'outil : 5
 Positionnement : 2
 Opérations d'alésage ébauche U_{1e11}^B et U_{1e12}^B simultanément : 2.6
 // $S[U_{2e11}^B \wedge U_{2e12}^B]$ //
 changement d'outil : 5
 positionnement : 2
 opération d'alésage finition U_{2e11}^B et U_{2e12}^B simultanément : 6.6
 >>
 temps d'usinage = 23.2 sec

Pour notre exemple, il est clair que l'usinage à l'aide de broches multiples est avantageux en termes de productivité.

Dans notre exemple d'application pour assurer une reconfiguration, nous remarquons qu'il est impossible d'utiliser des broches multiples pour réaliser la pièce P_A (antériorité d'usinage entre les entités E_7^A et E_9^A). Les broches F_1 (suivi Z-) et F_2 (suivi Y+) effectuent des opérations différentes (fraisage en bout, alésage et lamage) qui ont des séquentialités impératives à respecter lors de l'usinage de ces entités. Par contre, une broche multiple est applicable sur F_3 (suivi Z+) ne réalisant que des opérations axiales lors d'usinage E_{11}^B et E_{12}^B de la pièce P_B .

L'application des broches multiples en vue d'assurer le changement de configuration est envisageable dès lors qu'il est possible de réduire les temps d'usinage par regroupement d'opérations d'usinage (changement d'outils moindre). Cependant, ce type de système comportent des désavantages du même ordre que les outils combinés (géométries compliquées et encombrement, conditions opératoires variables selon la position des points ou arêtes génératrices, efforts et puissances de coupe souvent plus importantes, évacuation des

copeaux, vibrations, réduction de la flexibilité... et en corollaire un coût plus important). En conséquence, ce type de système facilitant la reconfiguration ne peut être prise en compte que de manière globale sinon cela est inutile.

IV.7.1.3 Changement de configuration utilisant les paramètres machines

Ce type de reconfiguration s'appuie sur l'utilisation des paramètres machines. Les mouvements et amplitudes des axes linéaires ou rotatifs (positionnement et décalages) sont modifiables logiquement par l'intermédiaire de la commande numérique.

La reconfiguration par les amplitudes des axes est une façon pratique d'évolutions dimensionnelles éventuelles des produits futurs. Le concepteur de MOR doit prendre en compte les changements dimensionnels supportables sur les produits futurs.

IV.7.2 Reconfiguration avec changement de montage de MOR

La reconfiguration, à ce niveau, porte sur la modification de structure. Le passage de la configuration principale à une autre reconfiguration nécessite de modifier, de développer une architecture évolutive.

IV.7.2.1 Reconfiguration par ajout ou suppression de broches

La reconfiguration est assurée par ajout ou retrait de broches avec structure dépendante ou indépendante.

IV.7.2.1.1 Broches dépendantes

Le support de broche mobile ou non peut accueillir une ou plusieurs broches (Figure IV.23). Cette association de broche est dépendante donc du support. Pour assurer cette dépendance, il convient d'identifier la broche principale et celle secondaire. Cette configuration de broches sur le même support correspond à un niveau de flexibilité réduite.

Nous appelons ce système de reconfiguration comme Reconfiguration par une/des Broches Dépendantes (RBD). Ce système se caractérise par l'augmentation de la productivité selon le nombre des broches insérées à condition que les pièces ainsi que les entités soient homogènes. Les contraintes sont alors de deux ordres :

- Les contraintes sont dimensionnelles et géométriques et elles doivent :
 - spécifier les orientations et les positions d'une/des broches secondaires à insérer par rapport à la broche principale ;
 - spécifier les orientations et les positions d'une/des pièces à insérer dans l'espace de tâches ;

- prendre en compte des contraintes dimensionnelles (courses) requises suivant la reconfiguration (dimensions de support de MOR, l'axe portant les broches, encombrement de ou des nouvelles broches).
- Les contraintes technologiques :
 - choisir les composants de MOR (disposant d'une puissance nécessaire à l'emploi d'une et plusieurs broches, des amplitudes des axes) en tenant compte de la possibilité de modifications ou d'évolutions des pièces futures ;
 - définir les modes d'interfaces (mécanique, fluide et électrique) permettant de réaliser la liaison complète démontable de la broche du support (raideurs des interfaces).

Or, la reconfiguration par des broches dépendantes nous permet d'apporter une réponse en termes d'évolution de la productivité des MOR afin de réduire le temps et le coût de développement.

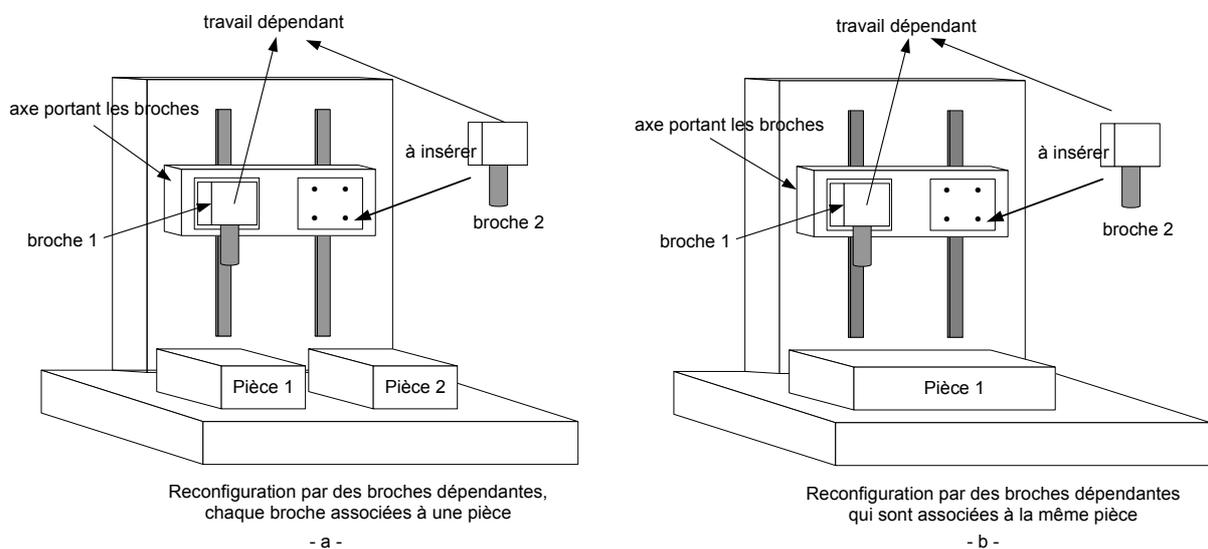


Figure IV.23. Reconfiguration par des broches dépendantes.

D'après la Figure IV.23, il est possible d'insérer une broche en tenant compte de la taille de la pièce.

L'application de la Reconfiguration par une/des Broches Dépendantes (RBD) est évaluée pour la pièce P_A . La productivité moyenne a été définie par 33 pièces/h. Dans la Figure IV.24 concernant P_A , il apparaît que la productivité lors de reconfiguration par les broches F'_1, F'_2 et F'_3 travaillant dépendamment avec F_1, F_2 et F_3 évoluera comme productivité :

- de la broche F'_1 qui réalise jusqu'à 50 pièces/h ;
- de la broche F'_2 qui réalise jusqu'à 38 pièces/h ;
- de la broche F'_3 qui réalise jusqu'à 38 pièces/h ;
- de la broche F'_1 et F'_2 qui réalisent jusqu'à 50 pièces/h ;
- des broches F'_1 et F'_3 qui réalisent jusqu'à 66 pièces/h ;
- des broches F'_2 et F'_3 qui réalisent jusqu'à 38 pièce/h ;

- des broches F_1' , F_2' et F_3' qui réalisent jusqu'à 66 pièces/h.

Au bilan, l'ajout d'une broche supplémentaire F_1' à F_1 (travaillant simultanément suivi Z-) dans une MOR, la productivité passe de 33 à 50 pièces/h. L'évolution de la productivité de 33 à 66 pièces/h est réalisé par l'ajout de deux broches F_1' et F_3' (travaillant simultanément avec F_1 suivi Z- et avec F_3 suivi Z+). La productivité peut évoluer de 33 à 50 pièces/h pour la broche F_1' allant de 50 à 66 pour la broche F_3' .

De la même façon, la Figure IV.24 concernant P_B . Nous remarquons que la reconfiguration par l'ajout d'une broche F_1' travaillant simultanément avec F_1 (travaillant suivi Z-) permet d'assurer un développement de la productivité de 25 à 51 pièces/h. La reconfiguration par l'ajout de F_2' ou F_3' ou F_2' et F_3' a une faible influence sur la productivité. La reconfiguration par F_1' et F_2' ou F_1' et F_3' ou F_1' , F_2' et F_3' réalisent la même productivité que F_1' (51 pièces/h).

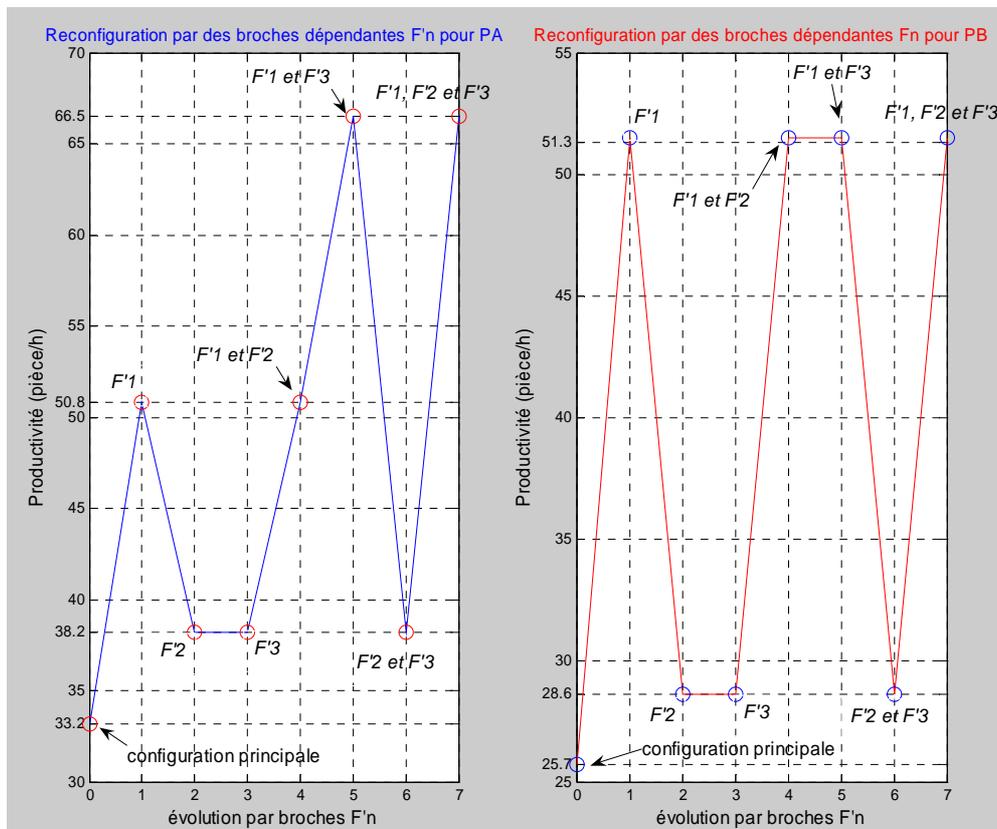


Figure IV.24. Évolution des productivités de MOR lors de reconfiguration par broches dépendants.

L'ajout de broches dépendantes à un même support a été évalué par le critère de productivité. Cependant, le critère financier est à ce stade plus complexe à déterminer. En effet, cela dépend des solutions constructives et des technologies d'interfaces.

Or, les contraintes dimensionnelles et géométriques ont un impact sur :

- la productivité en fonction du nombre des broches à insérer ;
- le temps de reconfiguration (temps d'installation de nouvelle broche) ;
- les modifications de programme d'usinage ;

- et le coût de reconfiguration.

IV.7.2.1.2 Broches indépendantes

Concernant cette reconfiguration, l'évolution de MOR est assurée par une/des broches à insérer de manière indépendante portées sur des axes indépendants (Figure IV.25). Dans ce cas, les broches (principale et secondaire) se déplacent successivement ou simultanément.

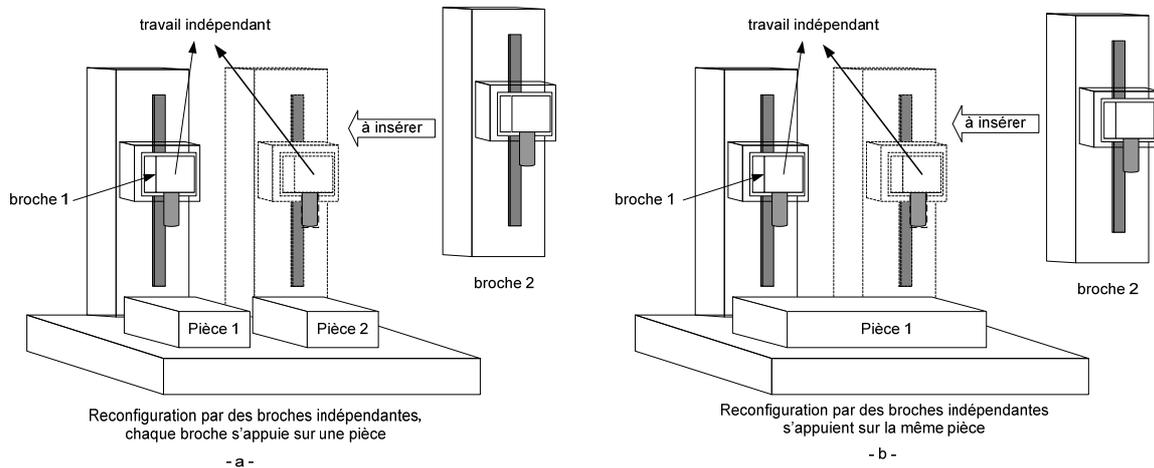


Figure IV.25. Reconfiguration par des broches indépendantes.

Nous dénommons ce mode de reconfiguration comme Reconfiguration par des Broches Indépendantes (RBI) qui se caractérise par une augmentation de la productivité en fonction des ajouts de broches pouvant réaliser des travaux indépendants. Il est possible de réaliser des tâches différentes pouvant usiner des entités non homogènes (broche de fraisage, broche de perçage...).

Les contraintes sont alors de deux ordres :

- Les contraintes sont dimensionnelles et géométriques et elles doivent :
 - spécifier les orientations et les positions d'une/des broches secondaires à insérer par rapport à la broche principale ;
 - spécifier les orientations et les positions d'une/des pièces à insérer dans l'espace de tâches ;
 - prendre en compte des contraintes d'encombrement (volume d'interférence).
- les contraintes technologiques :
 - choisir les composants de MOR disposant d'une puissance nécessaire à l'emploi d'une et plusieurs broches ; ainsi que des amplitudes de mouvements suffisantes) en tenant compte de la possibilité de modifications ou d'évolutions des pièces futures ;
 - définir les modes d'interfaces (mécanique, fluide et électrique) permettant de réaliser la liaison complète démontable de la broche du support (raideurs des interfaces).

L'application à la reconfiguration par des broches indépendantes (RBI) concernant les pièces P_A et P_B fournit les mêmes résultats en termes de productivité que le système de RBD (Figure IV.24). Or en termes de charges financières, l'ajout de broche par reconfiguration de broches

indépendantes conduit à l'ajout d'axes ce qui augmente les coûts. La mise en place de telle broche doit être sans doute plus longue.

IV.7.2.1.3 Comparaison

La comparaison entre la RBD et la RBI est définie par les points suivants :

- Le système de RBD est a priori plus économique que le système de RBI (la broche principale et la broche secondaire sont portées sur le même axe) ;
- Le temps de reconfiguration de RBD est plus court que RBI ;
- L'application de RBD est plus simple que RBI (programme d'usinage et le système de contrôle) ;
- Le système de RBD impose l'usinage simultané obligatoirement entre la broche principale et la broche à insérer.

Les avantages du système de reconfiguration par l'emploi de broches indépendantes sont évidents en matière de flexibilité et de productivité. Néanmoins, les charges financières sont plus importantes. Seules les études de coût pourront assurer la discrimination des solutions de reconfiguration par broches indépendantes ou dépendantes.

Or dans notre contexte, le passage de configuration (Figure IV.19) en une autre configuration est fonction des contraintes à spécifier lors de conception de la MOR telle que les orientations et positions des broches F_1' et F_3' , les orientations et positions des pièces, les encombrements nécessaires (dimensions de plateau, amplitudes des axes) et les paramètres technologiques lors de choix de composants (efforts et puissances) répondant à la reconfiguration.

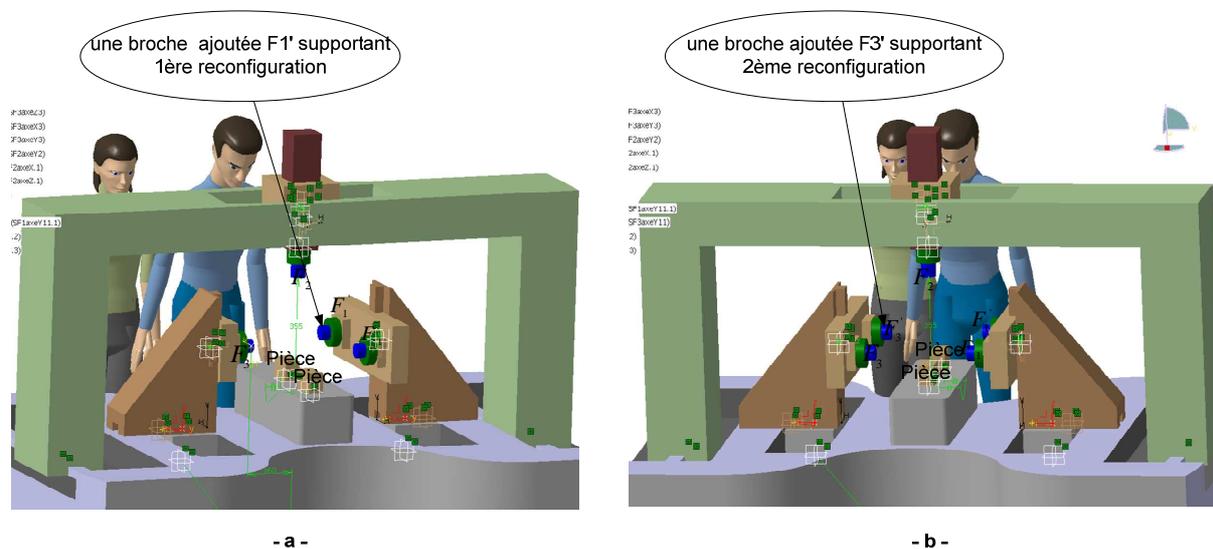


Figure IV.26. Reconfigurations de MOR par les broches $F1'$ et $F3'$.

Dans la Figure IV.26, nous présentons la MOR pour deux reconfigurations :

- la première (Figure IV.26.a) est en fonction d'ajout de la broche F_1' actionnée de manière dépendante de la broche F_1 permettant d'assurer l'évolution de la productivité de 33 à 50 pièces/h ;

- ensuite la deuxième reconfiguration correspond à un ajout de la broche F_3' (Figure IV.26.b) actionnée de manière dépendante à la broche F_3 qui permet de développer la productivité de 50 à 66 pièces/h.

IV.7.2.2 Reconfiguration par des axes supplémentaires

Cette méthode de reconfiguration consiste à ajouter des axes supplémentaires nous permettant de développer plus de flexibilité en répondant aux évolutions éventuelles de produits. Par exemple, Landers and Min [Landers et Min, 2002] ont présenté leurs travaux permettant d'augmenter la flexibilité de MOR en passant de structure de n axes à $n+1$ axes (Figure IV.27).

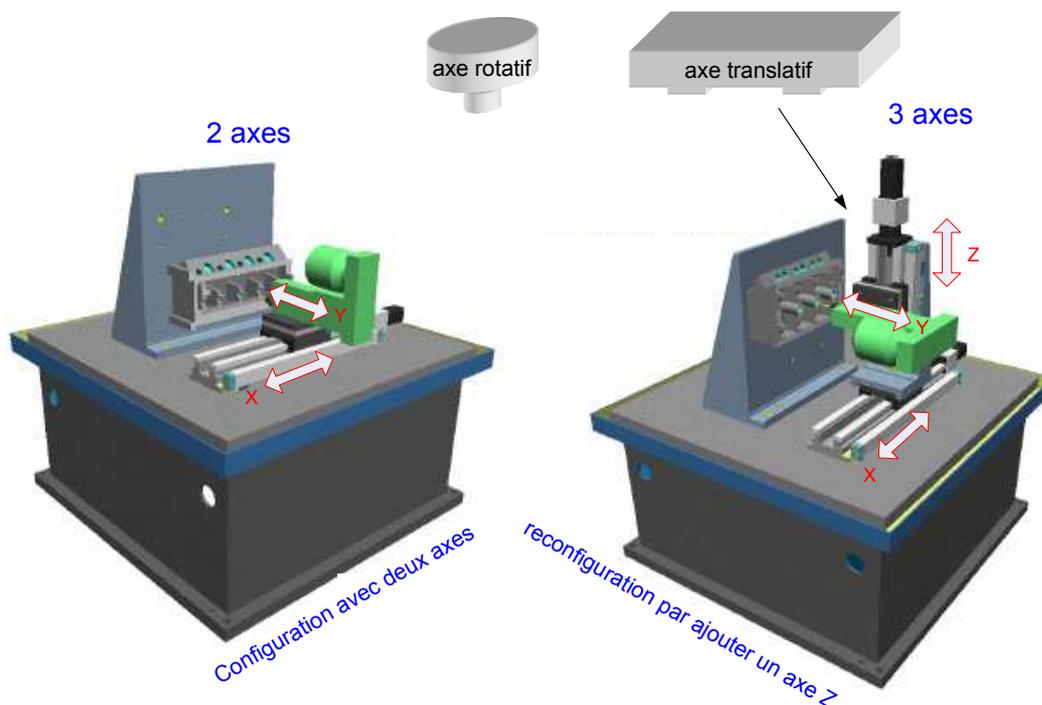


Figure IV.27. Reconfiguration par des axes des mouvements [Landers et Min, 2002].

Les inconvénients de cette solution de reconfiguration portent sur la prise en compte de l'ajout d'axes par le système de contrôle commande et en particulier les problématiques d'interférence et de collisions. Il est à noter que les solutions proposées par Landers introduisent des axes souvent en série modifiant la qualité des mouvements (exactitude, vibration...).

IV.8 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons traité deux problèmes liés à la génération de MOR à type multibroches. Le premier est architectural. Il s'appuie sur la définition d'une architecture géométrique et cinématique de la MOR à partir de la spécification des processus de fabrication. Nous avons identifié de manière systématique par l'algèbre proposée par [Garro, 1992] et écrit les équations des solutions ayant des réponses pour la réalisation de famille de pièces. Par ailleurs, nous avons spécifié les différentes solutions d'architecture par des critères s'appuyant sur la productivité et sur l'économie (coût). A partir de ces critères, nous avons spécifié la solution pertinente pour réaliser la famille de pièces (P_A et P_B) en tenant compte des réponses aux demandes de clients et/ou du marché. Pour la solution, nous avons finalisé l'architecture par une modélisation géométrique (matrices à coordonnées homogènes) et cinématique (vecteurs duaux) [Moon et Kota, 1998, 2002].

Le deuxième problème est lié à la reconfiguration de la MOR. Nous avons introduit un ensemble de solutions technologiques concernant les outils combinés et les systèmes multibroches permettant la reconfigurabilité sans changement de structure de MOR. Ces solutions sont généralement de faibles impacts (entités homogènes) mais concourent à une meilleure productivité et flexibilité.

Par ailleurs, nous avons introduit également un ensemble de solutions techniques permettant d'ajouter (ou supprimer) des composants comme les broches modifiant ainsi la structure localement. L'impact de la reconfigurabilité est plus important que précédemment, mais la gestion des interfaces (mécanique, fluide et électrique) reste un élément crucial dépendant fortement de la technologie des systèmes de connexion. Quelques fournisseurs de connecteurs ont intégré cette problématique comme Staübli dans leur étude d'industrialisation en robotique (www.staubli.fr/). Notons que la reconfiguration par l'ajout des broches (dépendantes et indépendantes) permet de répondre aux fluctuations de marché en termes de productivité. Néanmoins, la reconfiguration par des broches dépendantes est plus avantageuse en termes financiers.

V. Chapitre V : Structure, Modélisation, Création virtuelle, Validation

V.1 Introduction

Ce chapitre présente la mise en œuvre et la définition de la MOR faisant intervenir le modèle structural, le montage (porte-pièce), l'outil et la pièce. La structure de la MOR désigne non seulement un ensemble des modules mécaniques mais également les liaisons géométriques, cinématiques ainsi que les liaisons de connexions entre ces modules.

Les hypothèses de notre travail reposent :

- sur les principes en mécanique d'indéformabilité des solides ;
- sur la représentation géométrique de la MOR dit parfaite, nominale et sans perturbations (défauts, erreurs, jeux...).

La problématique de la définition structurale (composants, liaisons, représentation) conduit à la création physique de la MOR en deux temps. La première étape s'appuie sur l'identification des constituants (modules) de la MOR et sur la représentation de la nature géométrique et cinématique de ces modules. Ensuite, la représentation du modèle structural articulaire de la MOR au travers du graphe de connectivité, des liaisons, des modèles géométriques directs et inverses.

La seconde étape s'appuie sur le modèle global (fonctionnel) permettant de représenter les relations associées entre tous les modules (entités, pièce, porte-pièce, modèle géométrique de machine, outil). La finalité de cette partie constitue la mise en œuvre de la conception de la MOR.

Ce chapitre se conclut par la création du modèle virtuel de la MOR et la validation s'appuie sur la visualisation de la simulation permettant d'examiner la mise en position de pièces sur la palette de machine, de confirmer les programmes d'usinage, de vérifier l'accessibilité auquel s'ajoute une phase de correction des erreurs de conception pouvant existées (analyse des limites de courses des axes et également la détection des collisions).

V.2 Constituants structurels de la MOR

La structure mécanique d'une machine-outil (MOR) peut toujours être décrite par :

- un ensemble des composants appelés modules que nous désignons par (i) représentant les mouvements (polaire et/ou cartésien) ;
- les interfaces déterminant la nature des connexions entre les modules ;
- les liaisons qui peuvent être complètes démontables (pièce sur porte-pièce, outil dans la broche) et les liaisons réglables correspondant aux axes ;
- les systèmes actionneurs associées à chaque module.

La Figure V.1 représente, d'une façon simplifiée, les modules principaux de la machine-outil classique. On y reconnaît les sous-ensembles classiques : broches, axes, colonne, base, palette, outil, magasin de pièces et d'outils.

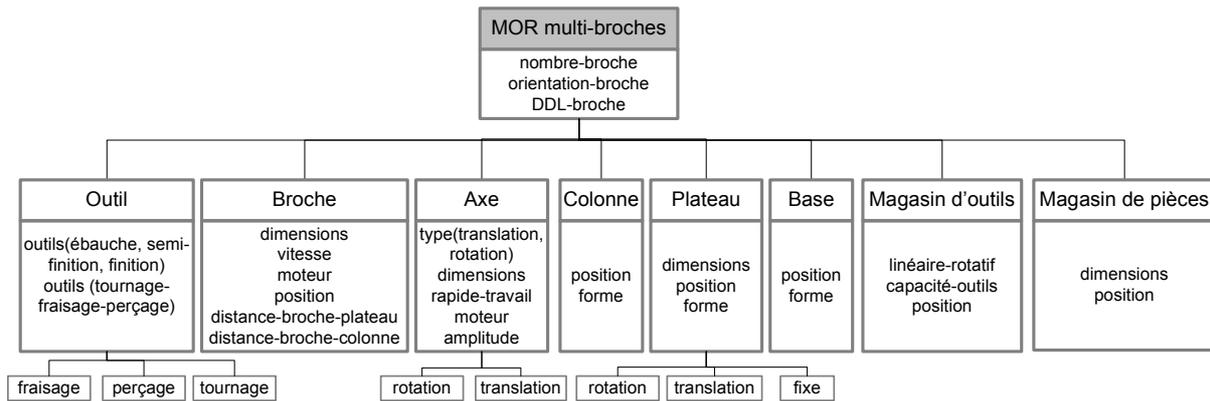


Figure V.1. Constituants structuraux de MOR.

V.3 Représentation de modules de la MOR

L'objectif est donc d'introduire une vue de nature mathématique de chaque module de la structure de la machine. Nous associons deux représentations :

- La première est géométrique décrivant la forme et les interfaces (aval, amont) de module ;
- et la deuxième représentation est cinématique identifiant les spécifications de mouvement de module (type, amplitude, axe).

V.3.1 Représentation géométrique

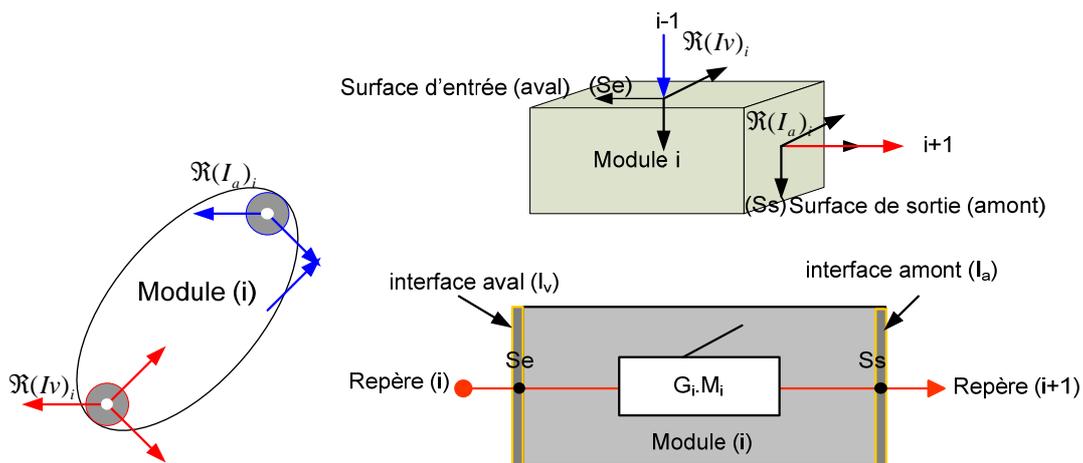


Figure V.2. Représentation de module de MOR

La représentation géométrique (Figure V.2) consiste à :

- identifier les surfaces d'entrée (Se), surface aval définissant l'interface aval (Iv) qui détermine la nature de la connexion entre le module i et le module i-1 (module précédent), les surfaces de sortie (Ss), surface amont définissant l'interface amont (Ia) qui détermine la relation entre i et i+1 (module suivant) ;
- associer (obligation) un repère à chaque surface d'entrée et de sortie de module, un repère aval $\mathfrak{R}(I_v)$ pour la mise en position le module (i) avec le module (i-1) et un repère amont $\mathfrak{R}(I_a)$ pour la mise en position le module (i) avec le module (i+1).

Alors, nous pouvons modéliser la structure géométrique d'un module (i) en fonction du déplacement du repère aval $\mathfrak{R}(I_v)$ au repère amont $\mathfrak{R}(I_a)$ comme :

$$[\mathfrak{R}(I_v)_i \rightarrow \mathfrak{R}(I_a)_i] = \left|_{\mathfrak{R}(I_v)_i} T^{\mathfrak{R}(I_a)_i} \right| = G_i \text{ (configuration de module i)} \quad (\text{V.1})$$

Ce formalisme introduit une description mathématique de la structure géométrique du module (i). Nous définissons les repères aval et amont de la manière suivant :

Pour le repère de module exprimant le repère aval $\mathfrak{R}(I_v) = \{O_{I_v}, \bar{X}_{I_v}, \bar{Y}_{I_v}, \bar{Z}_{I_v}\}$

- O_{I_v} , comme origine référentiel est l'origine de la surface d'entrée de module ;
- Z_{I_v} comme la direction de connexion de module. Or, Z_{I_e} est opposé au vecteur de la normale de la surface d'entrée ;
- Y_{I_v} comme une direction commune à tous les modules définis, avec Y_{I_v} support de l'axe de rotation de passage du repère aval au repère amont (ou repère amont au repère aval lors de connexion) ;
- X_{I_v} est placé et orienté de manière à former un repère orthonormé direct.

Afin de simplifier la représentation de la structure du module, nous exploitons le repère aval du module (i) comme étant également le repère du module.

Le repère amont $\mathfrak{R}(I_a) = \{O_{I_a}, \bar{X}_{I_a}, \bar{Y}_{I_a}, \bar{Z}_{I_a}\}$ est défini de la même façon que le repère aval en tenant compte de l'origine O_{I_a} correspondant à l'origine de la surface de sortie du module tandis que Z_{I_a} coïncide avec le vecteur de la normale à la surface de sortie.

V.3.2 Représentation cinématique

La représentation cinématique décrit les mouvements d'un module. Le module peut être défini par des mouvements cartésiens ou polaires. Nous appliquons la représentation par matrice de transformation à coordonnées homogènes (MTH) décrivant les mouvements attachés au module. Ainsi, le modèle cinématique de module (i) s'écrit :

$$M_i = T(a_i, b_i, c_i) R(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \quad (\text{V.2})$$

Avec $T(a_i, b_i, c_i) R(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ traduisant les mouvements cartésiens et polaires du module (i) sur et/ou autour des axes X, Y et Z.

La représentation globale (réelle) d'un module de composants de la MOR d'après des travaux de Martin, Garro, [Garro, 1992, 1993] et Martin, D'Acunto [Martin et al, 2002] est définie par le formalisme suivant :

$$A_i = G_i \cdot M_i \cdot C_i \quad (\text{V.3})$$

Ce formalisme définit le modèle global parfait (structural, cinématique et connexion) du module (i) dont les paramètres sont :

- A_i définissant le modèle global de module (i) des composants de la MOR ;
- G_i représentant le modèle structural (géométrique) de module (i) ;
- M_i détaillant le modèle cinématique de module (i) ;
- C_i caractérisant la connexion de module (i) avec le module suivant (i+1).

V.3.3 Choix du module

Afin de traiter le choix des modules, nous nous sommes appuyés sur des indicateurs associés à chaque module lesquels doivent être affectés à la structure de la MOR. Ces indicateurs s'articulent autour :

- du type de module requis (broche, axe...) ;
- du mode de mouvement requis (mouvement cartésien, mouvement polaire, fixe...) ;
- du type de mouvement requis (rapide, travail, rapide et travail) ;
- des caractéristiques articulaires (amplitudes des mouvements) ;
- des vitesses admises.

La bibliothèque de composants permet de définir les modules structuraux comme les bases, les axes, les colonnes, les palettes, *etc.* Ces modules sont représentés par deux types de paramètres :

- les paramètres morphologiques (formulaires) définissant la forme, les dimensions et les surfaces de connexion (surfaces d'entrée et surfaces de sortie) ;
- et les paramètres fonctionnels tels que le type de module (broche, axe,...), les modes de mouvements (fixe, cartésien, polaire), le type de mouvements (rapide, travail, rapide et travail), ainsi que les amplitudes et la vitesse.

Nous avons effectué le choix des modules au regard des indicateurs (Figure V.3).

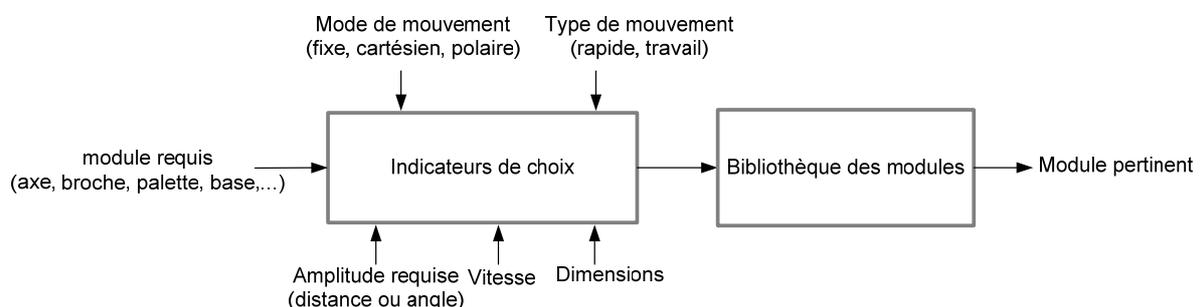


Figure V.3. Modèle de choix des modules de MOR.

V.4 Modèle structural articulé de la MOR

Les machines-outils classiques (3 axes, 4 axes et 5 axes) se définissent par une structure mécanique composée de chaînes (cinématiques) ouvertes simples (simple open-tree structure). Cette structure s'appuie sur un ensemble de modules qui font l'objet, deux à deux, d'une liaison à un Degré De Liberté (DDL). Aucun module ne fait l'objet de plus de deux liaisons avec les autres modules de la structure [Méry, 1997].

Par contre, nous définissons le modèle structural articulé de la MOR de type multibroche comme également un ensemble de modules. Mais, il existe un module (la base) qui fait l'objet de plus de deux liaisons (selon le nombre de broche). En effet, les modules de la MOR ont pour propriétés :

- les modules portant la broche font l'objet, deux à deux, d'une liaison à un Degré De Liberté (DDL) ;
- la base de la MOR fait l'objet d'au moins deux liaisons ; chaque broche indépendante fait appel à une liaison avec la base et également, la palette a une liaison avec la base ;
- les modules extrêmes (outils, palette) font l'objet d'une seule liaison complète avec les autres modules de la structure.

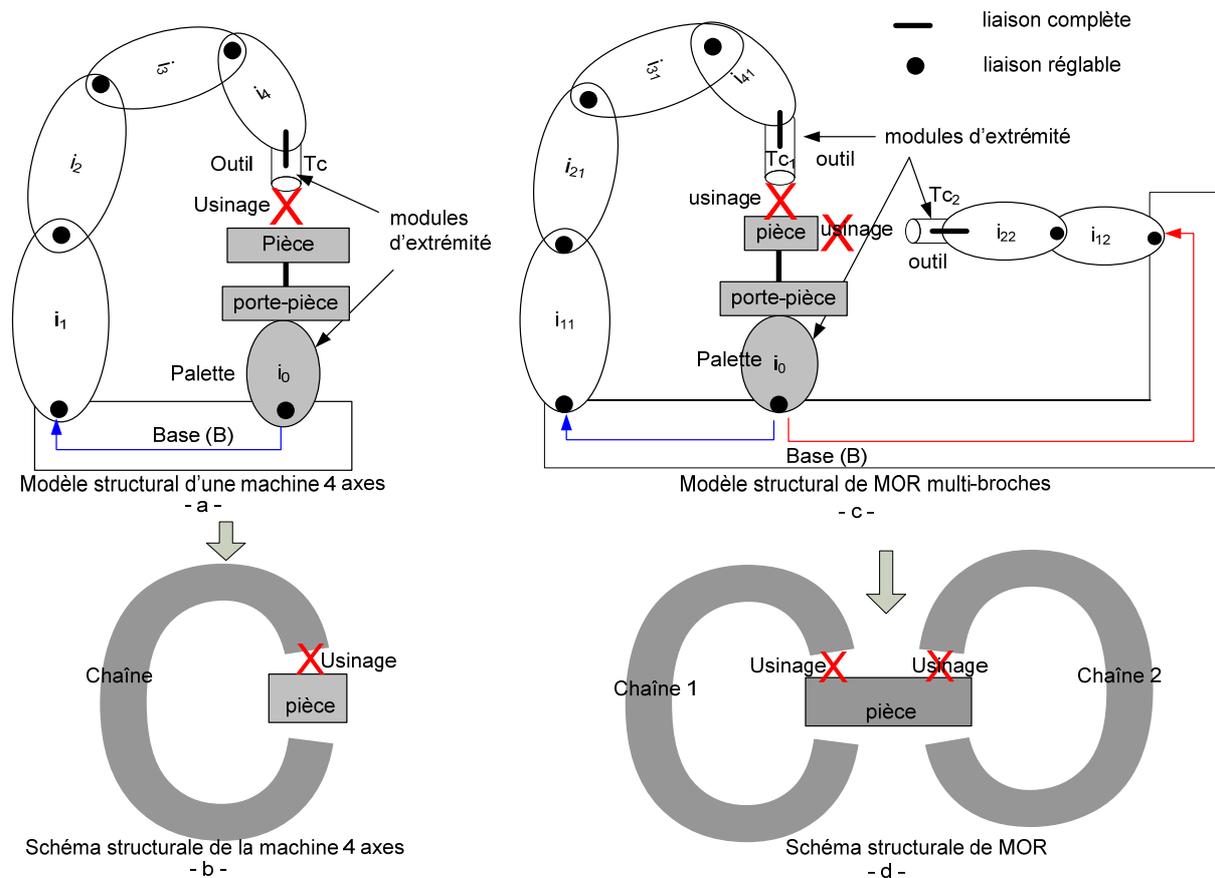


Figure V.4. Modèle structural de machine classique et de la MOR, schéma structural.

La Figure V.4.a symbolise le modèle structural en chaîne ouverte simple d'un exemple de machine classique. Concernant ce modèle, nous pouvons observer d'un côté la partie broche et de l'autre la partie pièce. Les modules internes représentent deux liaisons entre les différents mobiles tandis que les modules d'extrémités (outil et palette) sont associés par une liaison. La structure de machine 4 axes peut être schématisée par un symbole (c) (Figure V.4.a).

Par contre, le schéma de la Figure V.4.c représente la structure articulée de la MOR multibroches qui possède deux broches indépendantes fonctionnant simultanément en vue de la fabrication d'une pièce. La structure est constituée d'un ensemble de modules portant un grand nombre de broches, organisées autour de la pièce à usiner. Tous les modules internes (axes) de la MOR représentent deux liaisons (interface aval, interface amont) sauf la base qui présente des liaisons en fonction du nombre de broches autour de la pièce ainsi qu'une liaison (interface aval) avec la palette. Dans la Figure V.4.c, la base comporte trois liaisons, deux liaisons associées aux chaînes cinématiques portant les broches et une liaison complète liée à la palette portant une pièce.

Or, nous pouvons modéliser la MOR par plusieurs chaînes (Figure V.4.d). Chaque chaîne portant une broche indépendante est schématisée par le symbole (c) puis modélisée par un ensemble de $n+1$ modules reliés par n liaisons. Quelque soit le nombre des modules constituant la chaîne (MOR), nous effectuons une numérotation systématiquement de 0 à n dans le sens de la palette vers l'outil. Le premier module (i) de la MOR est donc la palette en liaison avec le porte-pièce, il portera le numéro (0). La base de la MOR est symbolisée par (B). Pour le module portant une broche, la numérotation correspond à (n, k) n dans l'ordre du module dans la chaîne orientée de la palette vers l'outil de coupe T_c (broche), avec k comme numéro de l'outil de coupe T_c (chaque broche porte un outil de coupe T_c) (Figure V.4.c).

V.4.1 Graphe de connectivité

Nous nous sommes appuyés sur la notion de graphe de connectivité [Gross et Yellen] dont l'objectif est d'assurer une représentation topologique de la structure de la MOR, c'est-à-dire, les relations topologiques entre les modules. A partir du graphe de connectivité nous pouvons représenter toutes les possibilités de connexion d'un module à d'autres modules et les caractéristiques de connexion. Nous avons utilisé le nœud définissant un module (axe, broche,...) de la MOR tandis que l'arc dénote les liaisons de connexion entre les modules. La direction de l'arc est toujours orientée de la palette vers les outils de coupe (palette \rightarrow base \rightarrow outil) et de l'entité vers la palette (entité \rightarrow pièce \rightarrow porte-pièce \rightarrow palette). La Figure V.5 illustre le graphe de connectivité de la MOR associé à notre exemple d'application (voir la Figure IV.19 représentant son diagramme fonctionnel) avec une palette fixe et trois broches F_1 , F_2 et F_3 . Chaque broche est supportée par trois axes de translation (T_x , T_y , et T_z) (désignant le mouvement cartésien par le symbole (T) et respectivement le mouvement polaire désigné par R).

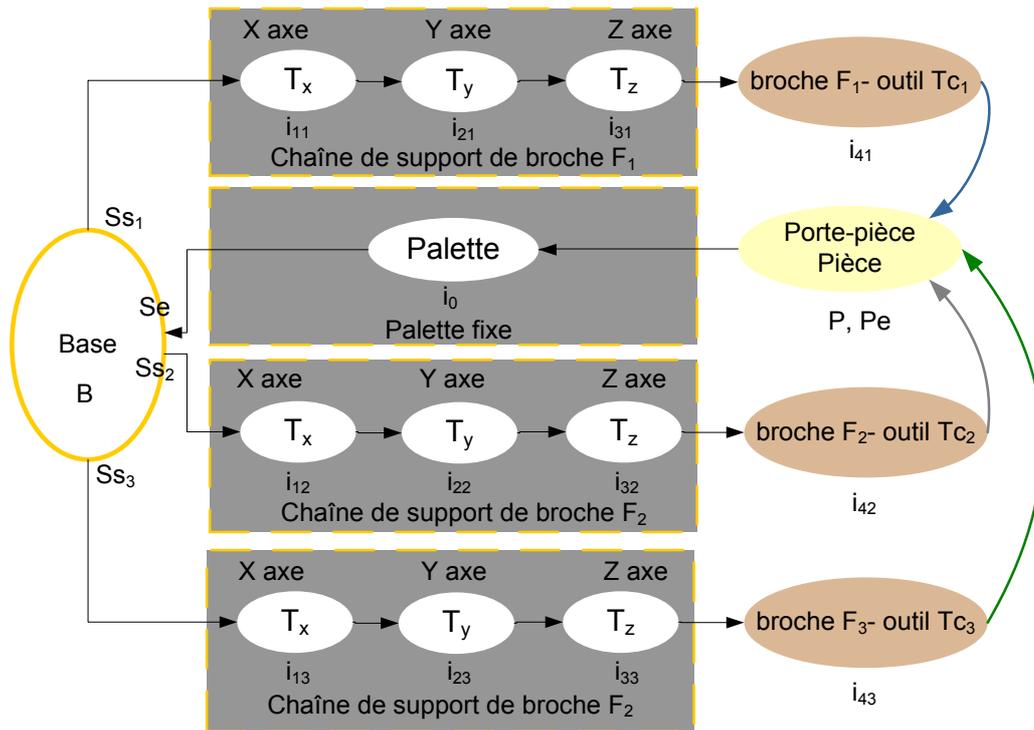


Figure V.5. Graphe de connectivité de chaîne de MOR.

V.4.2 Assemblage des modules

Les activités d'assemblage sont conduites à l'aide des règles qui régularisent la faisabilité des relations topologiques entre deux modules. En effet, pour représenter la structure globale de la MOR, les surfaces de contact (entrée et sortie) entre les modules, leurs positions et leurs orientations doivent être spécifiées précisément dans la fonction d'assemblage. Le changement des repères, du repère d'entrée (aval) du module (i-1) $\mathfrak{R}(I_{-1_v})$ au repère de sortie (amont) du module (i) $\mathfrak{R}(I_a)$ représente la connexion entre des modules (i-1) et (i). Pour exprimer la relation de contact entre deux modules, chaque nœud (module) du graphe de connectivité est représenté comme suit :

$$(i, Se / Ss) \tag{V.4}$$

Où i symbolise le module dans le graphe de connectivité, Se et Ss représentent les surfaces de connexion (surface d'entrée et surface de sortie) du module i avec le module précédent i-1 et avec le module suivi i+1. Par exemple, l'assemblage du module i et module i+1 est exprimé tel que :

$$[i \rightarrow i+1, Ss_i \rightarrow Se_{i+1}, \mathfrak{R}(I_a) / \mathfrak{R}(I_{+1_v})] \tag{V.5}$$

Ce formalisme exprime l'assemblage des modules i et i+1 réalisés en fonction des connexions de Ss_i du module i avec Se_{i+1} du module i+1 et qui est positionné et orienté en fonction du changement des repères du $\mathfrak{R}(I_a)$ à $\mathfrak{R}(I_{+1_v})$.

V.4.3 Modèle géométrique direct

Selon Méry, [Méry, 1997] « le modèle géométrique direct décrit la position que prend le module terminal de la structure (en général l'effecteur) lorsque la valeur des variables articulaires est connue ». C'est-à-dire, pour une structure donnée, le modèle géométrique direct est constitué de l'expression des coordonnées du repère lié au module terminal dans le repère de la base. Alors, il suffit d'effectuer n changements de repère depuis le module (i_0) (palette) jusqu'à le module terminal (outil).

Pour la MOR, nous traitons deux cas :

- La MOR est composée d'une broche unique. Dans cas, le changement de repère depuis la palette (i_0) jusqu'au outil (T_c) s'écrit :

$$\mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(T_c) = \{\mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(B)\} * \{\mathfrak{R}(B)/\mathfrak{R}(i_1)\} * \dots * \{\mathfrak{R}(i_n)/\mathfrak{R}(T_c)\} \quad (\text{V.6})$$

- La MOR est constituée de multibroches. Dans ce cas, la structure de MOR représente plus d'une broche indépendante (au moins deux broches indépendantes). Alors, le changement de repère de la palette à la base de MOR est commun, par contre le changement de repère de la base de l'effecteur dépend de la chaîne cinématique composée des axes portants chaque broche. Or, pour la MOR à k nombres d'outils indépendants (broches indépendantes), le formalisme de la MOR composée de multibroches s'écrit :

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(T_{c_1}) &= \{\mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(B)\} * \{\mathfrak{R}(B)/\mathfrak{R}(T_{c_1})\} \\ \mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(T_{c_2}) &= \{\mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(B)\} * \{\mathfrak{R}(B)/\mathfrak{R}(T_{c_2})\} \\ &\vdots \\ \mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(T_{c_k}) &= \{\mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(B)\} * \{\mathfrak{R}(B)/\mathfrak{R}(T_{c_k})\} \end{aligned} \quad (\text{V.7})$$

Avec $\mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(T_{c_k})$ exprimant le changement de repère de la palette (i_0) à l'outil (T_{c_k}), par contre, $\{\mathfrak{R}(i_0)/\mathfrak{R}(B)\}$, $\{\mathfrak{R}(B)/\mathfrak{R}(T_{c_k})\}$ représentent le changement de repère de la palette (i_0) à la base (B) et de la base (B) à l'outil (T_{c_k}). L'équation (V.7) présente le modèle géométrique direct de la MOR de type multibroches.

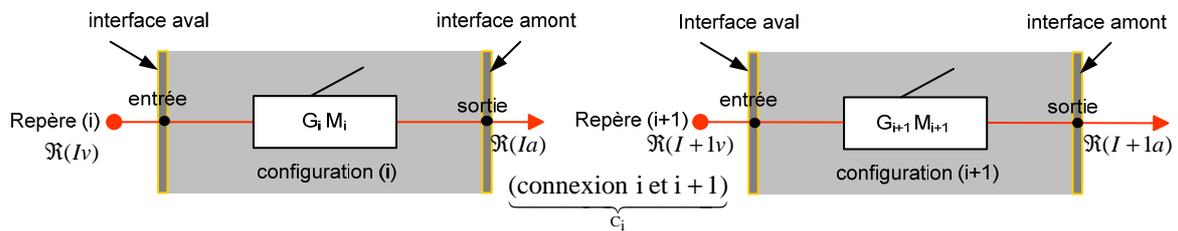


Figure V.6. Changement de repère de i à $i+1$.

Le changement (déplacement) de repère du module (i) au module ($i+1$) s'écrit :

$$\mathfrak{R}(i)/\mathfrak{R}(i+1) = A_i = \underbrace{G_i}_{\text{déplacement/configuration}} \underbrace{M_i}_{\text{Mouvement}} \underbrace{C_i}_{\text{connexion}} \quad (\text{V.8})$$

Avec A_i définissant le modèle global parfait (non perturbé) de module (i). Alors, pour n modules composant la MOR, le modèle parfait s'écrit :

$$\text{Modèle parfait} = \prod_{i=0}^{i=n} \text{configuration (i)} * \text{mouvements (i)} * \text{connexion (i, i+1)}$$

Ainsi :

$$[0 | n] = \prod_{i=0}^{i=n} A_i = \prod_{i=0}^{i=n} G_i M_i C_i \tag{V.9}$$

L'équation (V.9) représente donc le modèle parfait de la structure de la MOR.

V.4.4 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique direct permet de déterminer à partir d'une configuration définie par les coordonnées articulaires la position et l'orientation du repère de l'outil en fonction des paramètres articulaires des axes. La position et l'orientation que doivent atteindre l'outil est définies (tâches à réaliser pour fabriquer la pièce), il faut donc définir les valeurs des coordonnées articulaires. Ce problème conduit à ce que l'on appelle le modèle géométrique inverse ou problème de l'inversion de coordonnées [Méry, 1997]. Ainsi, on peut l'utiliser pour caractériser le fonctionnement des axes. Concrètement, nous pouvons calculer les coordonnées articulaires des axes (amplitude) en fonction des positions et des orientations du module terminal (outil).

V.5 Volume d'accessibilité

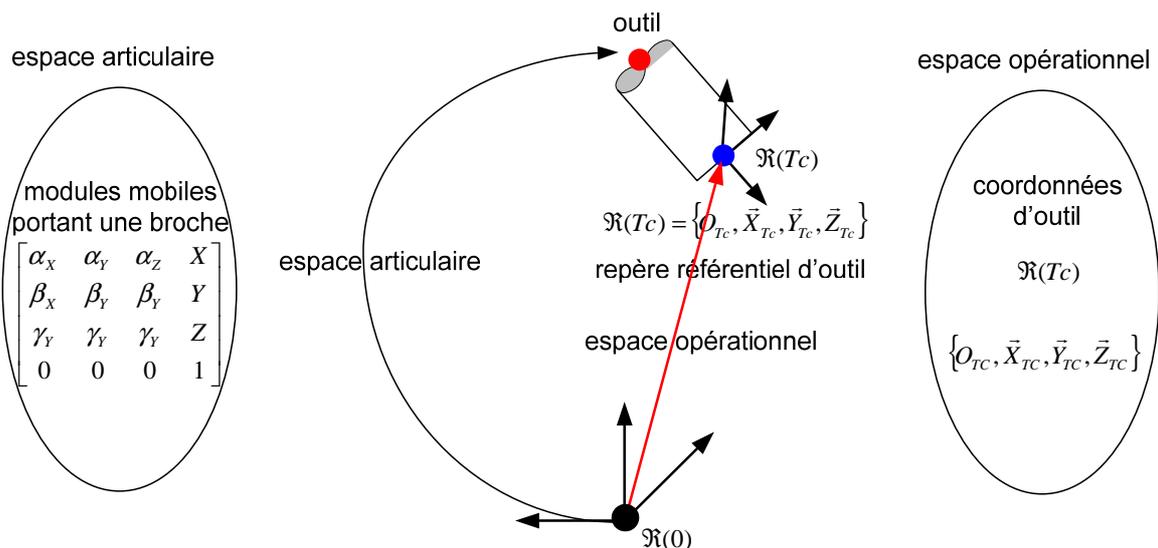


Figure V.7. Schéma d'espace articulaire et d'espace de la tâche.

Il est indispensable identifier deux volumes (espaces) d'accessibilité différents :

- l'espace articulaire associé aux modules mobiles ;
- l'espace de la tâche associé à l'outil.

V.5.1 Espace articulaire

Selon Méry [Méry, 1997], l'espace articulaire est désigné par les variations des amplitudes cinématiques (paramètres articulaires) des modules de la machine. L'axe dont le mouvement est de nature cartésien (glissière), le paramètre articulaire équivaut à une distance tandis que pour un mouvement de nature rotative, le paramètre articulaire est un angle. Pour une machine disposant de n axes, un vecteur de cet espace à n dimensions représente donc une configuration. Or, pour la MOR multibroches, chaque chaîne ouverte simple (portant une broche) spécifie une espace articulaire indépendant (Figure V.7).

V.5.2 Espace opérationnel

L'espace opérationnel (l'espace de la tâche) est l'espace obtenu par les variations cinématiques du vecteur appliqué au point référence de l'outil (Figure V.7). Il est entièrement indépendant de la structure de la machine. Le déplacement de l'outil par rapport à la pièce selon une trajectoire est une succession de positions et d'orientations du point référentiel de l'outil. Le vecteur de cet espace représente la position et l'orientation de l'outil de coupe (T_c). Alors, nous pouvons caractériser la MOR par plusieurs espaces de la tâche en fonction de la multiplicité des outils de coupe (un espace pour chaque outil).

Le modèle géométrique (direct et inverse) exprime le rapport correspondant entre les coordonnées de ces deux espaces.

V.6 Modèle global

La mise en œuvre d'un produit en usinage fait intervenir une machine, un outil, un porte-pièce et une pièce. Pour décrire ces équipements physiques, nous avons retenu la notion de modèle global (qui est déjà utilisée lors de la génération de machines à commande numérique). Il décrit non seulement un ensemble de modules des composants, mais également les liaisons géométriques et cinématiques entre ces modules. Nous nous sommes appuyés sur cette notion comme une issue pratique à la mise en œuvre de la MOR.

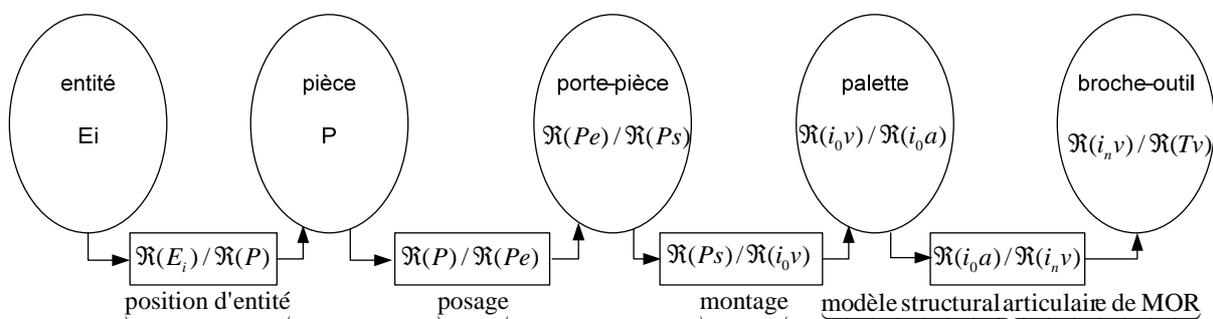


Figure V.8. Modèle global de MOR.

Nous avons désigné dans ce contexte sous le terme du modèle global (dans l'objectif de mise en œuvre de la MOR) un ensemble composé des éléments suivants (Figure V.8) :

- le modèle structural articulaire de la MOR ;
- le montage d'usinage (porte-pièce), comme pouvant recevoir la pièce à usiner ;
- un ou des outils (selon les nombre de broches), comme partie active avec son support ;
- une pièce à usiner ;
- les entités à usiner.

V.6.1 Description géométrique (pièce, entité)

Nous avons mis en évidence dans le chapitre (II) que la pièce est constituée d'un ensemble d'entités d'usinage. De plus, dans l'objectif de positionner les différentes entités, nous avons associé à la pièce à usiner un repère unique $\mathfrak{R}(P)$. D'ailleurs, nous avons défini l'entité d'usinage E_i par un repère local $\mathfrak{R}(E_i)$ (Figure V.9). La position de l'entité E_i est donnée par :

$$\mathfrak{R}(P)/\mathfrak{R}(E_i) \quad (\text{V.10})$$

Ce formalisme exprime le repérage de l'entité E_i par rapport à la pièce P .

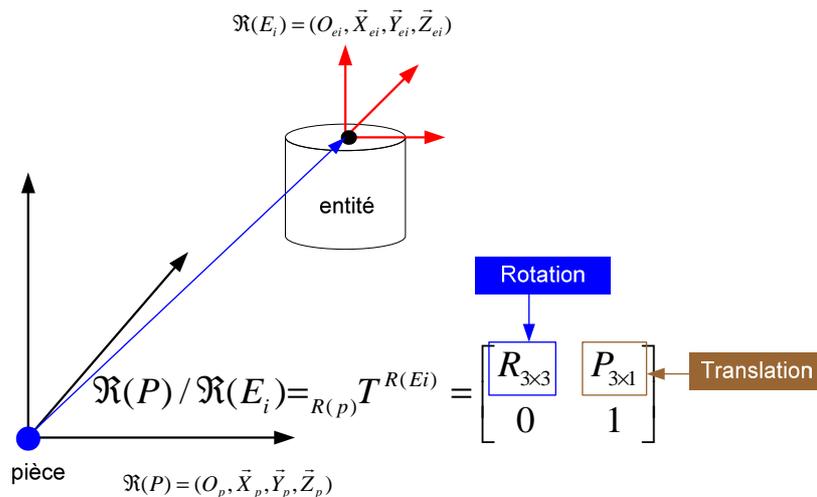


Figure V.9. Rapport géométrique, pièce-entité.

V.6.2 Description géométrique (pièce, porte-pièce)

Nous avons décrit le porte-pièce en chapitre II (II.6.3.3). Dans l'objectif d'assembler la pièce, le porte-pièce et la palette de la MOR, nous avons défini le porte-pièce par deux repères (comme le module i), le repère d'entrée (repère de pose) $\mathfrak{R}(P_e)$ et le repère de sortie $\mathfrak{R}(P_s)$. Le porte-pièce définit de façon géométrique sa propre position et sa localisation par rapport à

la palette de la machine par la mise en coïncidence du repère de sortie $\mathfrak{R}(P_s)$ avec le repère de la palette $\mathfrak{R}(i_0v)$. De la même façon, les repères $\mathfrak{R}(P)$ et $\mathfrak{R}(Pe)$ définissent la position et la localisation de la pièce par rapport au porte-pièce.

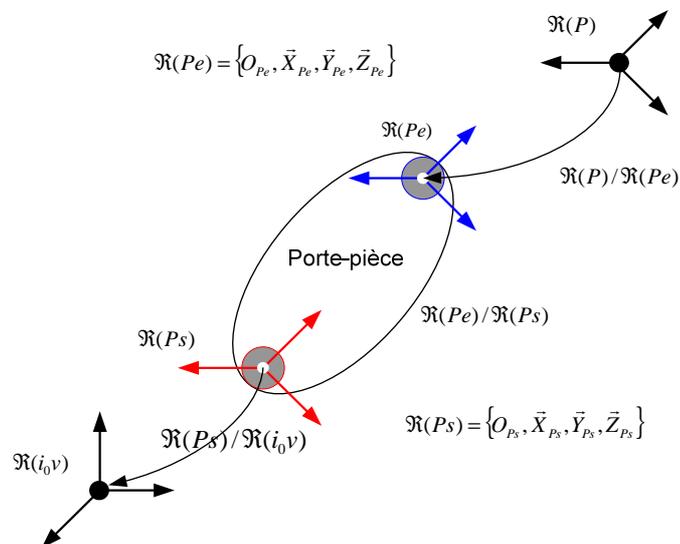


Figure V.10. Rapport géométrique, pièce \rightarrow porte-pièce \rightarrow palette.

Au niveau de chaîne ouverte simple « *pièce \rightarrow porte-pièce \rightarrow palette* », nous pouvons signaler les changements des repères suivants (Figure V.10) :

- $\mathfrak{R}(P)/\mathfrak{R}(P_e)$ exprimant la position (connexion) de la pièce sur le porte-pièce ;
- $\mathfrak{R}(P_e)/\mathfrak{R}(P_s)$ représentant les dimensions caractéristiques du porte-pièce ;
- $\mathfrak{R}(P_s)/\mathfrak{R}(i_0v)$ représentant la localisation du porte-pièce sur la palette de MOR.

V.6.3 Description géométrique (MOR)

Nous avons montré dans le paragraphe V.4 la description géométrique de la MOR dépendant de nombre de broches. La chaîne ouverte simple « *palette \rightarrow modèle géométrique de MOR \rightarrow outil* » est donc fonction des changements des repères suivants :

- $\mathfrak{R}(P_s)/\mathfrak{R}(i_0v)$, la liaison entre le porte-pièce et la palette de MOR ;
- $\mathfrak{R}(i_0v)/\mathfrak{R}(i_a)$, le modèle géométrique de MOR ;
- $\mathfrak{R}(i_a)/\mathfrak{R}(T_v)$, la liaison entre la broche et l'outil.

V.6.4 Description géométrique (broche, outil)

Comme précédemment, nous avons associé à un outil deux repères :

- le repère d'entrée (aval) $\mathfrak{R}(T_v)$ qui est construit à partir des surfaces de mise en position et qui coïncide avec le repère de sortie $\mathfrak{R}(i_a)$ lors de la fixation d'outil sur la broche (dernier module de la MOR).

- le repère de sortie (amont) $\mathfrak{R}(T_c)$ qui est construit à partir des parties actives de l'outil (centre d'outil, nous l'avons représenté largement lors de la représentation d'outil de coupe dans le chapitre III.2.3.1).

Au niveau de la chaîne ouverte simple « broche → outil », les changements des repères (Figure V.11) sont alors :

- $\mathfrak{R}(i_n a) / \mathfrak{R}(T_v)$ désignant la connexion entre la broche et l'outil de coupe ;
- $\mathfrak{R}(T_v) / \mathfrak{R}(T_c)$ décrivant les dimensions caractéristiques de l'outil.

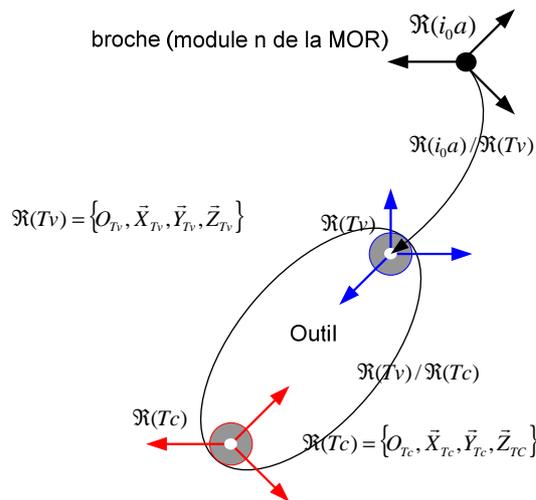


Figure V.11. Rapport géométrique, broche-outil.

V.6.5 Description géométrique (outil-entité) (fermeture de la boucle)

Pour réaliser l'usinage à partir de la notion d'entités d'usinage, c'est-à-dire, conduire l'outil dans le repère de l'entité $\mathfrak{R}(E_i)$. Il est nécessaire, voire obligatoire, de faire coïncider les coordonnées (translations et orientations) de la partie active de l'outil (centre d'outil dans ce cas) dans ce repère.

$$\mathfrak{R}(T_c) / \mathfrak{R}(E_i) \tag{V.11}$$

Ce formalisme exprime la tâche opérationnelle (tâche d'usinage) qui doit être réalisée par une broche.

En conséquence, pour un outil (Tc) porté par une broche F_n de la MOR correspondant à une mise en position, la pièce, le porte-pièce et la structure de MOR font intervenir les coordonnées définies dans le Tableau V.1.

Position	(entité)→(pièce)	$\mathfrak{R}(E_i) / \mathfrak{R}(P)$
Posage + montage	(pièce)→(porte-pièce)	$\mathfrak{R}(P) / \mathfrak{R}(P_e)$
dimensions+connexion	(porte-pièce)→(MOR)	$\mathfrak{R}(P_e) / \mathfrak{R}(i_0 v)$ $\mathfrak{R}(P_e) / \mathfrak{R}(P_s)$

			$\mathfrak{R}(P_s) / \mathfrak{R}(i_0v)$
modèle géométrique	pour une broche F_n de MOR	$\mathfrak{R}(i_0v) / \mathfrak{R}(i_n a)$	
connexion+ dimensions	(broche)→(outil)	$\mathfrak{R}(i_n a) / \mathfrak{R}(Tc)$	$\mathfrak{R}(i_n a) / \mathfrak{R}(Tv)$
			$\mathfrak{R}(Tv) / \mathfrak{R}(Tc)$
tâche opérationnelle	(outil)→(entité) (fermant la boucle)	$\mathfrak{R}(Tc) / \mathfrak{R}(E_i)$	

Tableau V.1. Résumé des changements des repères concernant une broche de MOR.

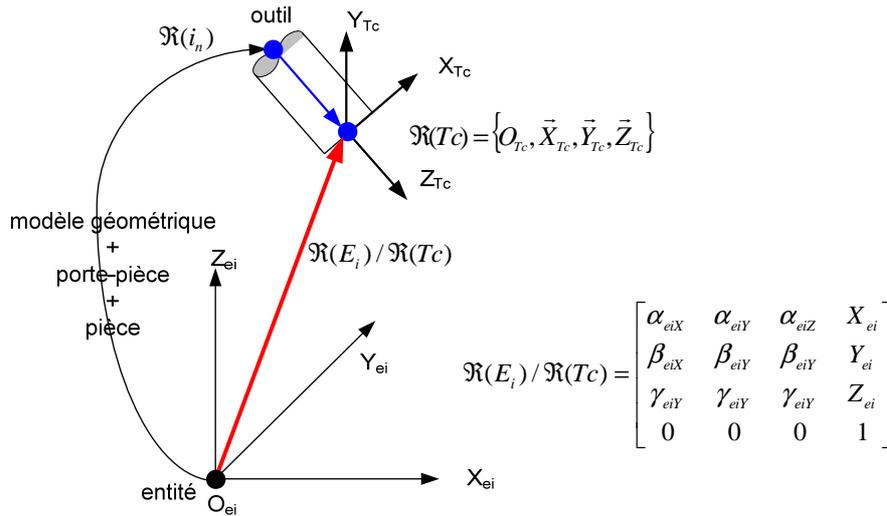


Figure V.12. Définitions géométrique.

Selon Figure V.12, nous pouvons écrire que :

$$\mathfrak{R}(E_i) / \mathfrak{R}(Tc) = \mathfrak{R}(E_i) / \mathfrak{R}(i_n) * \mathfrak{R}(i_n) / \mathfrak{R}(Tc) \tag{V.12}$$

Pour le modèle direct, la tâche de la broche $\mathfrak{R}(E_i) / \mathfrak{R}(Tc)$ est à définir mais avec les amplitudes des axes connues :

$$\mathfrak{R}(E_i) / \mathfrak{R}(Tc) = \mathfrak{R}(E_i) / \mathfrak{R}(P) * \mathfrak{R}(P) / \mathfrak{R}(Pe) * \mathfrak{R}(Pe) / \mathfrak{R}(i_0) * \mathfrak{R}(i_0) / \mathfrak{R}(i_n) * \mathfrak{R}(i_n) / \mathfrak{R}(Tc) \tag{V.13}$$

L'équation (V.13) représente le modèle global direct de la MOR (pour la broche F_n). La correspondance peut être schématisée dans la Figure V.13.

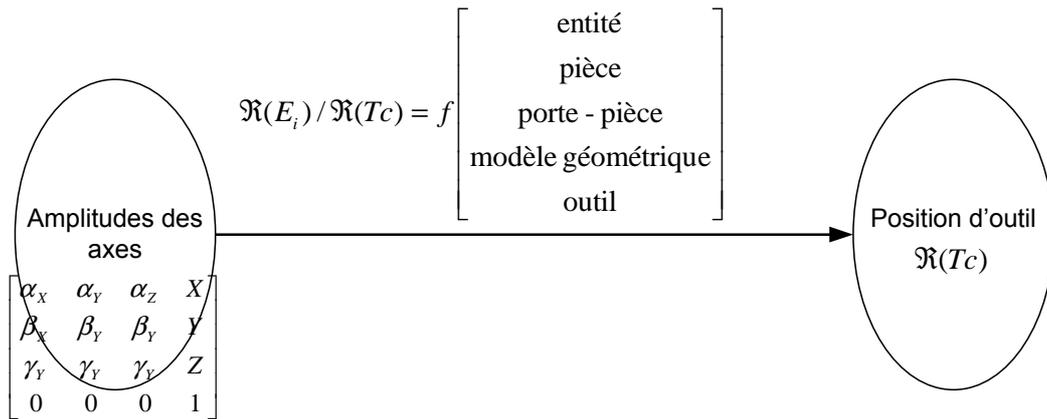


Figure V.13. Modèle global direct.

Par contre le modèle inverse est totalement différent, les amplitudes des axes sont inconnues (à définir) alors qu'au contraire les coordonnées de la tâche sont définies. Alors, le modèle global inverse est :

$$\mathcal{R}(i_0)/\mathcal{R}(i_n) = \mathcal{R}(i_0)/\mathcal{R}(Pe) * \mathcal{R}(Pe)/\mathcal{R}(P) * \mathcal{R}(P)/\mathcal{R}(E_i) * \mathcal{R}(E_i)/\mathcal{R}(T_c) * \mathcal{R}(T_c)/\mathcal{R}(i_n) \quad (\text{V.14})$$

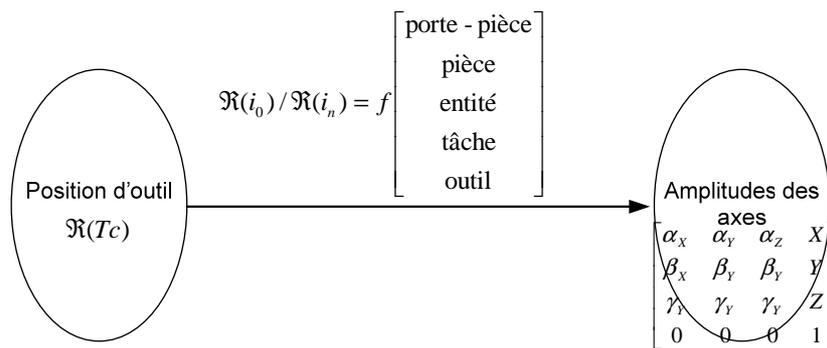


Figure V.14. Modèle global inverse

Ainsi, à l'aide du modèle global inverse, nous pouvons définir tous les paramètres articulaires (amplitudes) des axes afin de réaliser une tâche spécifiée (entité). La Figure V.14 schématise le modèle global inverse de MOR.

V.7 Modèle virtuel de MOR

La mise en œuvre de la nature virtuelle de la MOR s'appuie sur un ensemble d'outils informatiques (CAO, CFAO) permettant au concepteur d'effectuer les dernières vérifications numériques avant la génération réelle. En effet, notre travail s'appuie sur un modèle virtuel CFAO pour mettre au point la génération finale de MOR. Ce modèle s'articule autour de (Figure V.15) :

- la génération et la simulation du ou des programmes d'usinage de famille de pièces ;
- la création de la structure géométrique et cinématique ;

- la simulation de la MOR (phase de validation).

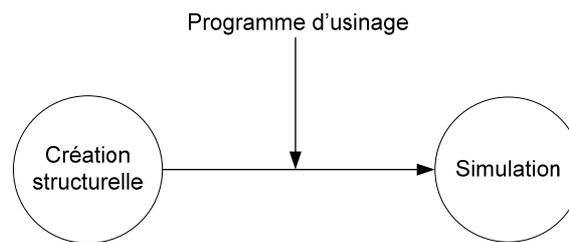


Figure V.15. Modèle CFAO de MOR.

V.7.1 Programme d'usinage

À l'aide de logiciels CFAO (Catia, Delmia), nous pouvons générer le programme d'usinage permettant de concevoir automatiquement la chronologie des opérations d'usinage et d'analyser la totalité des étapes de fabrication de la pièce à usiner à partir de sa définition. Pour la MOR de types multibroches, nous avons fourni à chaque broche un programme indépendant défini à partir du processus de fabrication des entités de la pièce (Cf. chapitre III et IV) tel que les opérations d'usinage, le mode d'usinage, les outils de coupe, les accessibilités, l'ordonnancement et les conditions opératoires.

Dans le chapitre IV, nous avons défini (en respectant les critères d'efficacité et de coût) que, la solution architecturale de l'exécution du couvercle P_A s'appuie sur trois broches $F_{1(\text{suivi } z^-)}$, $F_{2(\text{suivi } y^+)}$ et $F_{3(\text{suivi } z^+)}$ associées à trois processus de fabrication (un processus pour chaque broche) identifiant les opérations exécutées et leur ordonnancement d'usinage selon le formalisme suivant :

$$MOR = S \left[\begin{array}{l} \text{Programme d'usinage } F_1(\text{suivi } Z^-) = \{U_{1e1}^A \wedge M(U_{2e1}^A) \wedge M^2(U_{1e4}^A \wedge U_{1e5}^A) \wedge M^3(U_{1e6}^A) \wedge M^4(U_{1e2}^A)\} \\ \text{Programme d'usinage } F_2(\text{suivi } Y^+) = \{U_{1e8}^A\} \\ \text{Programme d'usinage } F_3(\text{suivi } Z^+) = \delta\{[U_{1e2}^A \wedge U_{1e3}^A) \wedge M(U_{2e2}^A \wedge U_{2e3}^A)] \wedge [(U_{1e7}^A) \wedge M(U_{1e9}^A)]\} \end{array} \right]$$

Alors, la réalisation du couvercle P_A impose obligatoirement de créer trois programmes d'usinage. Le premier conduit la broche $F_{1(z^-)}$ et respecte son processus de fabrication, le deuxième conduit la broche $F_{2(y^+)}$ et le troisième conduit la broche $F_{3(z^+)}$.

La vérification des processus de fabrication des différentes broches est fonction de la visualisation des simulations des différentes opérations qui seront exécutées. Dans la Figure V.16, nous avons créé les trois programmes d'usinage, concernant les broches F_1 , F_2 , F_3 , et simulé les opérations exécutées sur celles-ci. De plus, des vérifications finales des processus et des programmes sont réalisées. Cette phase de simulation a aussi pour but de permettre au concepteur de prendre connaissance rapidement de l'ensemble des procédures et des différents paramètres qui ont été choisis lors de la définition de l'usinage et des cinématiques de la MOR (chapitre III).

La réalisation du carter P_B a également conduit à la définition de trois programmes indépendants associés aux broches $F_{1(z^-)}$, $F_{2(y^+)}$ et $F_{3(z^+)}$ ordonnées selon le formalisme suivant :

$$MOR = S \begin{cases} \text{programme d'usinage } F_1 \text{ (suivi } Z-) = \delta \left[\begin{array}{l} U_{1e1}^B \wedge M(U_{2e1}^B) \wedge M^2(U_{1e3}^B \wedge U_{1e4}^B) \wedge M^3(U_{2e3}^B \wedge U_{2e4}^B \wedge U_{1e5}^B \wedge \\ U_{1e6}^B \wedge U_{1e7}^B \wedge U_{1e8}^B) \wedge M^4(U_{1e9}^B \wedge U_{1e10}^B) \wedge M^5(U_{1e2}^B) \wedge M^6(U_{2e2}^B) \end{array} \right] \\ \text{programme d'usinage } F_2 \text{ (suivi } Y+) = \left[(U_{1e13}^B \wedge U_{1e14}^B) \wedge M(U_{2e13}^B \wedge U_{2e14}^B) \wedge M^2(U_{1e15}^B \wedge U_{1e16}^B) \wedge M^3(U_{1e17}^B) \right] \\ \text{programme d'usinage } F_3 \text{ (suivi } Z+) = \left[(U_{1e11}^B \wedge U_{1e12}^B) \wedge M(U_{2e11}^B \wedge U_{2e12}^B) \right] \end{cases}$$

Néanmoins, le logiciel utilisé (CATIA V5R16) n'est pas adapté actuellement à ce type de configuration. Il a été nécessaire d'effectuer la simulation broche par broche.

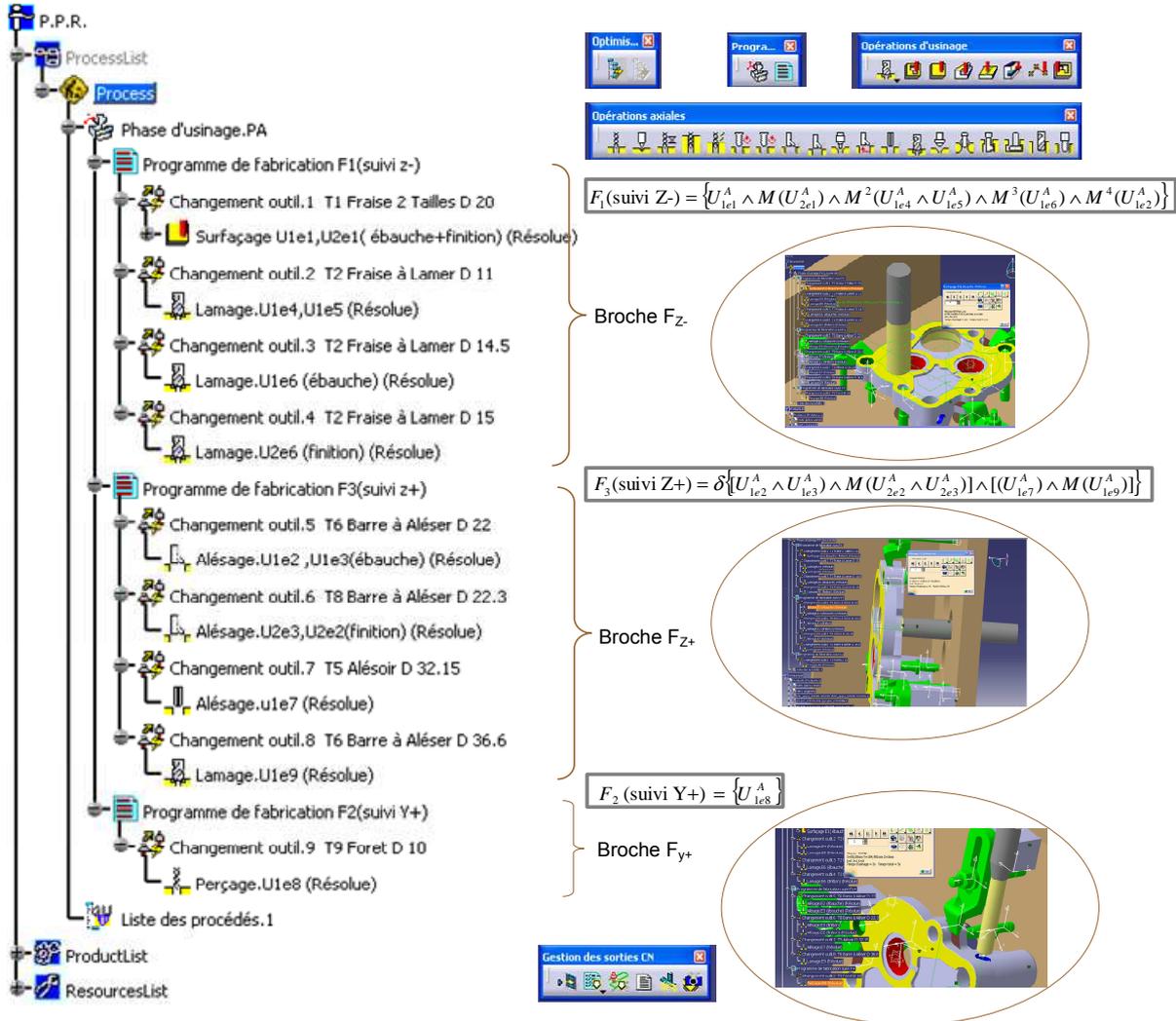


Figure V.16. Programmes d'usinage conduisent les broches F1_(z-), F2_(y+) et F3_(z+) pour effectuer PA.

V.7.2 Création de structure de la MOR

Pour la création du modèle de la structure de MOR, nous avons voulu le rendre capable d'amener la ou les broches dans une ou des positions exactes souhaitées sous le contrôle du système de repérage.

Pour obtenir cette capacité de positionnement et d'accessibilité, deux critères dimensionnels et un critère orientation doivent être définis :

- Concernant la palette portant le porte-pièce avec la ou les pièces à usiner, les caractères dimensionnels sont spécifiés en fonction du volume d'encombrement global (pièce, montage) des pièces à usiner. Par exemple pour des pièces P_A et P_B , nous avons besoin une palette avec les dimensions de 300 par 100mm, mais avec la prise en compte des critères de reconfigurabilité. Les caractères dimensionnels sont de 600 par 100mm (Figure V.17).

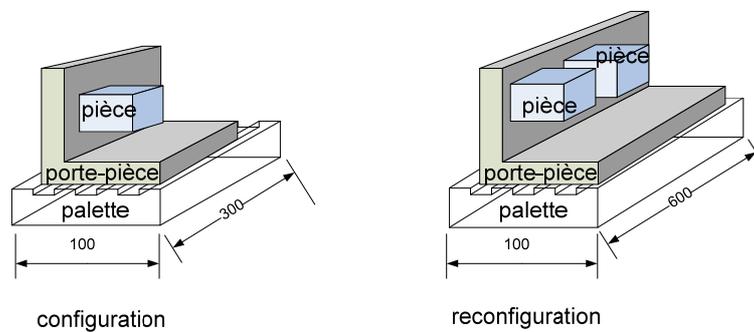


Figure V.17. Palette de MOR.

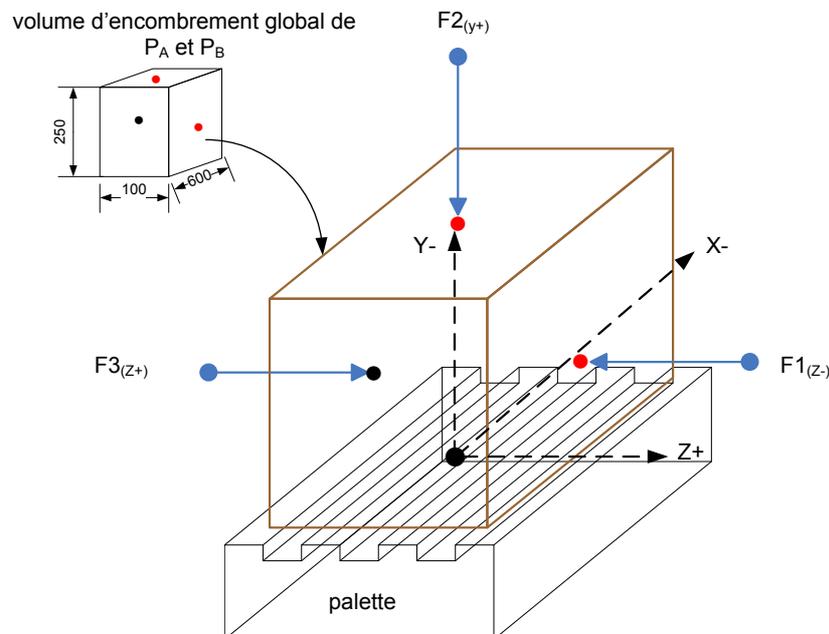


Figure V.18. Positions initiales des broches

- Les positions initiales des broches sont également définies à partir du volume d'encombrement global. La broche doit présenter aucune collision avec le corps de pièces et les dispositifs de posage et de bridage. Pour éviter ces risques, les positions initiales des broches doivent être hors du volume d'encombrement de pièces à usiner. Dans la Figure V.18, nous avons précisé les positions initiales des broches $F_{1(Z-)}$, $F_{2(Y)}$ et $F_{3(Z+)}$ à partir des volumes d'encombrement globaux de P_A et P_B . Cela nous permet de prévenir des risques d'interférences entre les broches et l'environnement d'usinage.
- L'accessibilité, les positions et les orientations des pièces sur la palette sont basées sur la fonction d'adaptation entre l'accessibilité de pièce à usiner (ensemble d'entités) et l'orientation des broches (spécifié par l'accessibilité des pièces et les orientations des broches à l'aide de concept de polyèdre caractéristique). Les outils de coupe utilisés doivent accéder sans risques à toutes les entités. Cette condition doit être respectée lors de la génération de la structure. Par exemple, la réalisation des pièces P_A et P_B impose de respecter l'accessibilité (Figure V.19) avec les broches F_1 , F_2 et F_3 orientées respectivement suivant $Z-$, $Y+$ et $Z+$ par rapport au repère de pièces.

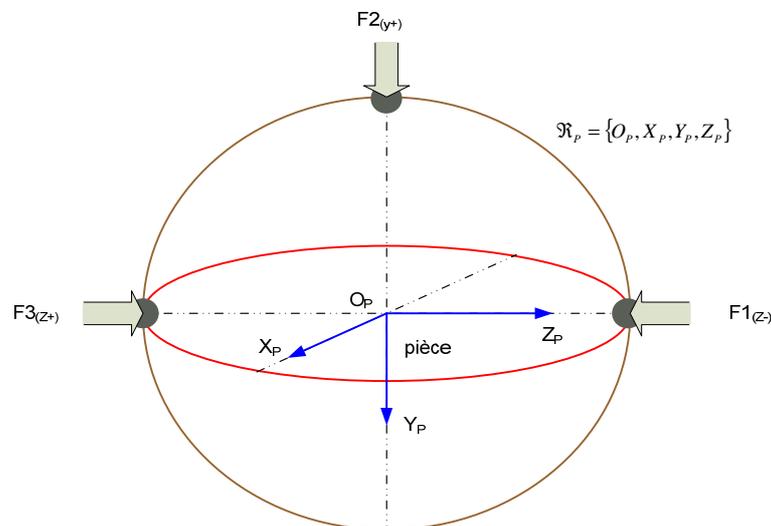


Figure V.19. Accessibilité de MOR répondant à l'usinage des pièces P_A et P_B

La création structurelle (Figure V.20) de MOR permettant de réaliser le modèle virtuel CFAO s'appuie sur la synthèse de l'environnement d'usinage (pièce, dispositifs bridage et montage), l'environnement de la machine (axes, base, palette, broches) et la conception de la machine (assemblage de composants, des liaisons cinématiques de types prismatique ou pivot).

Nous avons défini précédemment l'environnement de l'usinage lors de la spécification de la mise en position dans le chapitre II. L'environnement de la machine peut être spécifié à l'aide d'une bibliothèque de composants de machine (Somex, Trace parts par exemple) répondant au diagramme fonctionnel de MOR (Figure IV.19). Dans ce contexte, la structure de la MOR est choisie à partir des dimensions d'axes selon les produits standards de Somex (www.somex.fr/).

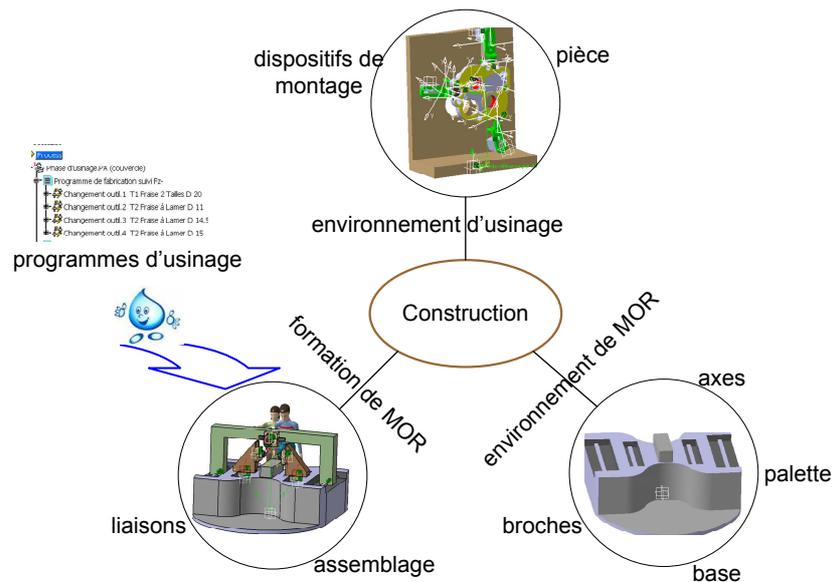


Figure V.20. Création structurale de modèle CFAO de MOR.

D'ailleurs, nous avons réalisé la construction de la structure par deux solutions entièrement différentes :

- La première création (Figure V.21) s'appuyant sur trois broches, positionnées selon la Figure V.18 et orientées selon la Figure V.19 associée une palette. Chaque broche est portée par trois axes (XYZ) cartésiens ainsi l'ordre des axes n'a aucune influence sur la chaîne ouverte simple (si la chaîne portant la broche ne présente que des axes de type T translation/cartésien). L'évolution des courses (amplitudes) des axes lors de la reconfiguration, surtout pour l'axe X de broche F2 de 300mm à 600mm conduit à une réduction de la stabilité et de rigidité de la structure en conséquence sur la qualité d'usinage.

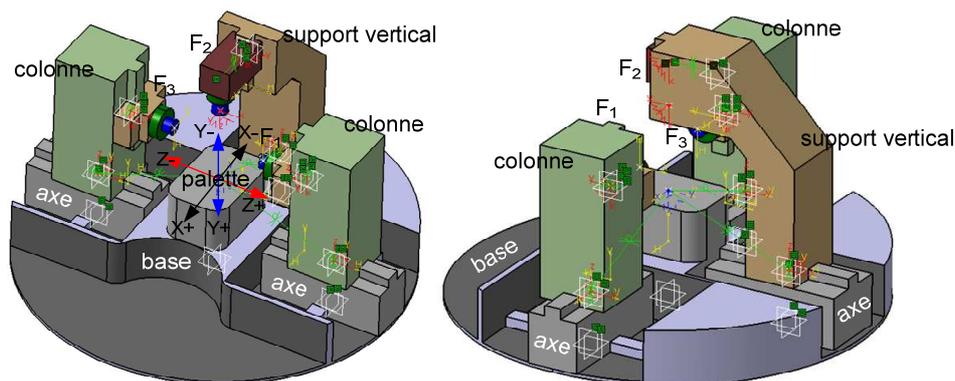


Figure V.21. Un exemple de configuration de MOR.

- la deuxième création (Figure V.22), la rigidité avec une reconfiguration par l'utilisation d'un axe à type portique mobile est plus importante (support vertical de l'axe X de la broche F₂ dans la première création). Avec cette création, nous pouvons effectuer des mouvements de translation, lors de la reconfiguration, avec une stabilité et une rigidité plus grande en première approximation. La Figure V.22 présente la création structurale de type portique avec une accessibilité satisfaisante (Figure V.19)

et des positionnements de broches F_1 , F_2 , F_3 selon les contraintes liées aux entités de la pièce à usiner (Figure V.18).

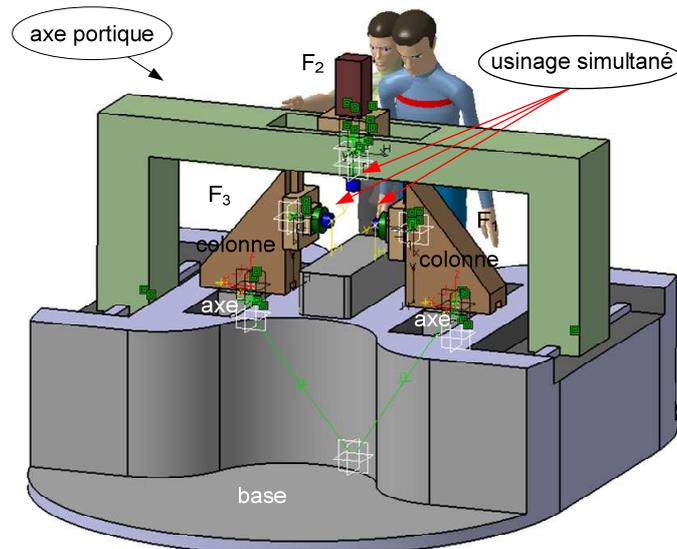


Figure V.22. MOR à type portique.

Les deux créations répondent à la démarche que nous avons proposée. Cependant, les systèmes de chargement et de déchargement des pièces ainsi que celui des outils ne sont pas représentés dans la Figure V.22.

V.7.3 Validation

Lors de la génération de la partie physique d'une machine, le concepteur a besoin de critères d'évaluation qui soient à la fois représentatifs couvrant les aspects importants de la machine à la fois fiables, quantifiables et simples à mettre en œuvre. Le choix d'un équipement particulier lors de la phase d'industrialisation est une décision d'autant plus importante que les investissements deviennent de plus en plus lourds. Ceci est particulièrement vrai pour les machines outils reconfigurables plus coûteuses que les machines classiques (systèmes flexibles et dédiés).

Actuellement, la validation d'une conception et/ou d'une fabrication pour un projet financé est le plus souvent réalisée par deux étapes. Ces deux étapes sont essentiellement virtuelles. La première est basée sur des démarches de conception pouvant utiliser des approches de simulation de mécanismes (collisions statiques et dynamiques) à l'aide des fonctionnalités de Catia par exemple. La seconde est tout aussi virtuelle mais nécessitant une démarche expérimentale. Néanmoins, le retour d'expérience n'est pas toujours disponible. Pour cela, nous nous appuyons sur des solutions fondées sur la simulation virtuelle.

Dans notre contexte, la simulation est la dernière vérification avant la validation pour la génération réelle. Dans cette étape, nous l'utilisons pour examiner la mise en position de pièces sur la palette de la machine, confirmer les programmes d'usinage, vérifier l'accessibilité et nous permettre de corriger les erreurs de conception qui peuvent exister. D'ailleurs, la simulation permet de faire l'analyse des limites de courses des axes et également la détection des collisions.

Actuellement, les logiciels (Catia, Delmia...) ne fournissent pas une réponse complète à la simulation d'usinage simultané de type multibroches. Nous avons réalisé la simulation de façon indépendante pour chaque broche (une broche est en cours de travail et les autres sont bloquées ou considérées comme inactives). Par ce type de simulation, nous pouvons vérifier les limites des courses des axes, l'accessibilité et la détection de collisions entre la broche et l'environnement d'usinage. Mais, nous ne pouvons pas examiner les collisions dynamiques éventuelles entre les broches lors d'usinage simultané. Ainsi, les collisions sont limitées à la détection de collision entre la broche et son environnement (comme pour les machines-outils 3 axes, 4 axes...) identifiant l'existence d'un volume d'interférence.

En considérant l'environnement des broches inactives (axes, broches, outils), positionnées dans des places à risques, la détection des collisions est spécifiée par la fonction de l'analyse de collision d'une broche en cours d'usinage. Si la collision se produit, les éléments s'interférant, la position est spécifiée (couleur rouge sous Catia) lors de la simulation.

V.7.3.1 Validation de programme d'usinage

La vérification des processus de fabrication des différentes broches est basée sur la simulation des différentes opérations qui seront exécutées en respectant l'ordonnancement qu'est spécifié à partir des contraintes d'antériorité et des différentes conditions opératoires conduisant les opérations. Nous avons simulé chaque opération associée aux conditions opératoires (spécifiées dans le chapitre III) lors de création des programmes d'usinage (paragraphe V.7.1). Cette validation est classique et ne nécessite pas un développement spécifique.

V.7.3.2 Expérimentation virtuelle d'accessibilité et des limites de courses des axes

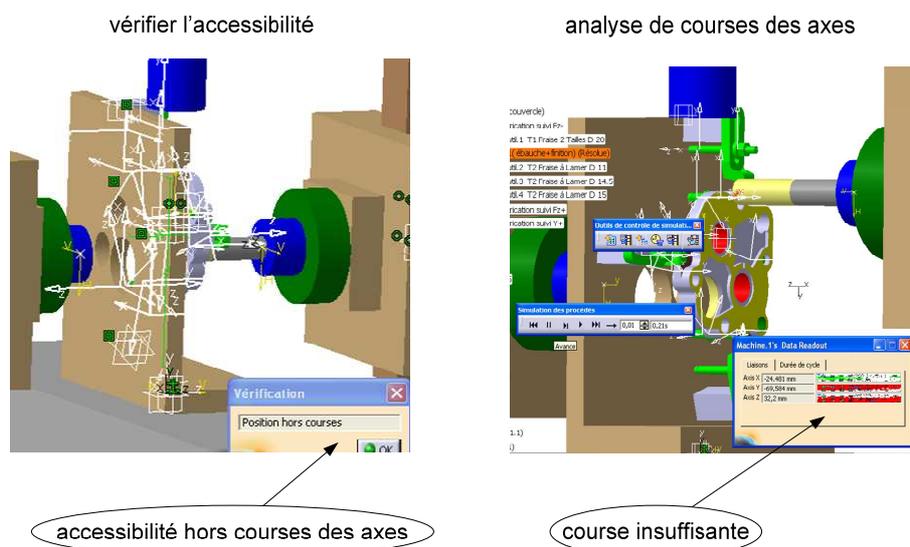


Figure V.23. Analyse d'accessibilité et des limites de courses des axes.

Selon les résultats de la simulation sur Delmia et Catia (Figure V.23), nous avons remarqué que l'analyse de l'accessibilité (affichage de vecteurs) et diverses informations comme les

valeurs hors courses des axes sont affichés. L'orientation des broches peut être alors évaluée par rapport par exemple à la mise en position de la pièce ainsi que les entités qui y sont rattachées. L'analyse des limites de courses des axes montre que les amplitudes des axes sont insuffisantes (résultat rouge). Ce résultat est fonction de la divergence entre le repérage de la position de la pièce (calculé les limites de courses à partir de ce point en chapitre IV) et le zéro broche (position d'outil lors les courses des axes sont zéro). La décision que nous devons prendre est dans ce cas que la solution est à exclure (machine dite stérile). En fait, l'analyse de limites de courses, nous permet donc de prendre la décision de valider ou d'invalidier la solution étudiée.

Pour traiter ce problème, nous avons principalement deux pistes de correction concernant la géométrie :

- La première est d'ajouter des interfaces supplémentaires permettant de déplacer ou/et d'orienter les broches selon les repères des entités des pièces ;
- La deuxième solution consiste à augmenter les bornes limites des courses de certains axes permettant de déplacer les broches aux points désirés.

Mais dans notre cas, la première proposition présente l'inconvénient majeur de créer des corps solides sans réel cahier des charges pouvant ainsi créer des interférences appelées interférences statiques (mauvais dimensionnement des pièces) et dynamiques (collision des corps modélisés lors des mouvements relatifs aux liaisons) entre les composants constituant la MOR. La seconde solution permet de traiter le problème de courses insuffisantes par la modification de celle-ci. Cette dernière solution semble moins contraignante dans un premier temps. Mais, cela impose une démarche de conception des modules élémentaires constituant la MOR intégrant la variation de course d'une liaison prismatique essentiellement. Néanmoins, il faut s'assurer tout de même qu'il n'y a pas d'interférences en conception de mécanisme. Pour ce qui nous concerne, nous choisissons de résoudre les conflits d'accessibilité par la seconde solution.

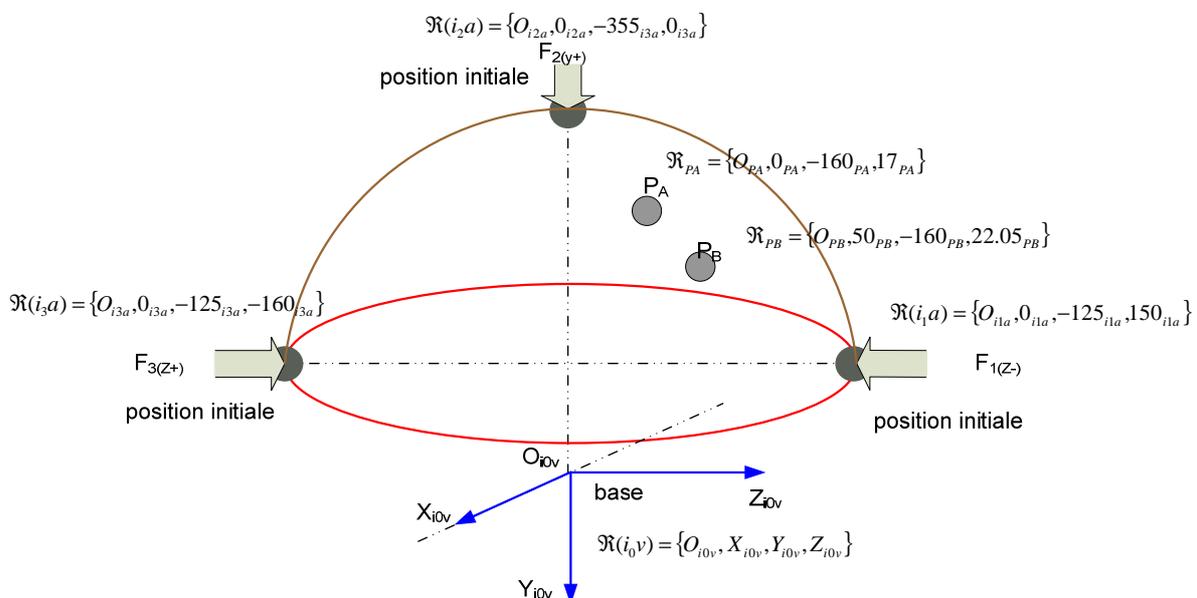


Figure V.24. Positionnement des broches et des pièces sur la palette de machine.

La Figure V.24 représente le positionnement et la localisation des broches (F_1 , F_2 et F_3) ainsi que ceux des pièces (P_A et P_B) par rapport de la base de la MOR. En appliquant la deuxième méthode de résolution pour la famille de pièces (P_A et P_B), nous modifions les limites aux mouvements pour déplacer les broches dans les repères de chaque pièce. Les limites des courses modifiées sont :

Broche (position initiale)	Mouvement requis, limite de course
$F_1 = (0 + \varepsilon 0) \{0, 0, 1\}^T + \varepsilon \{0, -125, 150\}^T$	$XF_1 = [121.76, -71.72; 0](0 + \varepsilon 1) \{1, 0, 0\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$
	$YF_1 = [75.15, -71.08; 0](0 + \varepsilon 1) \{0, 1, 0\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$
	$ZF_1 = [1, -183; 0](0 + \varepsilon 1) \{0, 0, 1\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$
$F_2 = (0 + \varepsilon 0) \{0, 1, 0\}^T + \varepsilon \{0, -355, 0\}^T$	$XF_2 = [144.78, -189.72; 0](0 + \varepsilon 1) \{1, 0, 0\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$
	$YF_2 = [197, -28; 0](0 + \varepsilon 1) \{0, 1, 0\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$
	$ZF_2 = [53, 4 - 37.7; 0](0 + \varepsilon 1) \{0, 0, 1\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$
$F_3 = (0 + \varepsilon 0) \{0, 0, 1\}^T + \varepsilon \{0, -125, -160\}^T$	$XF_3 = [80.7, -30.7; 0](0 + \varepsilon 1) \{1, 0, 0\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$
	$YF_3 = [44.46, -35; 0](0 + \varepsilon 1) \{0, 1, 0\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$
	$ZF_3 = [182.05, -58.5; 0](0 + \varepsilon 1) \{0, 0, 1\}^T + \varepsilon \{0, 0, 0\}^T$

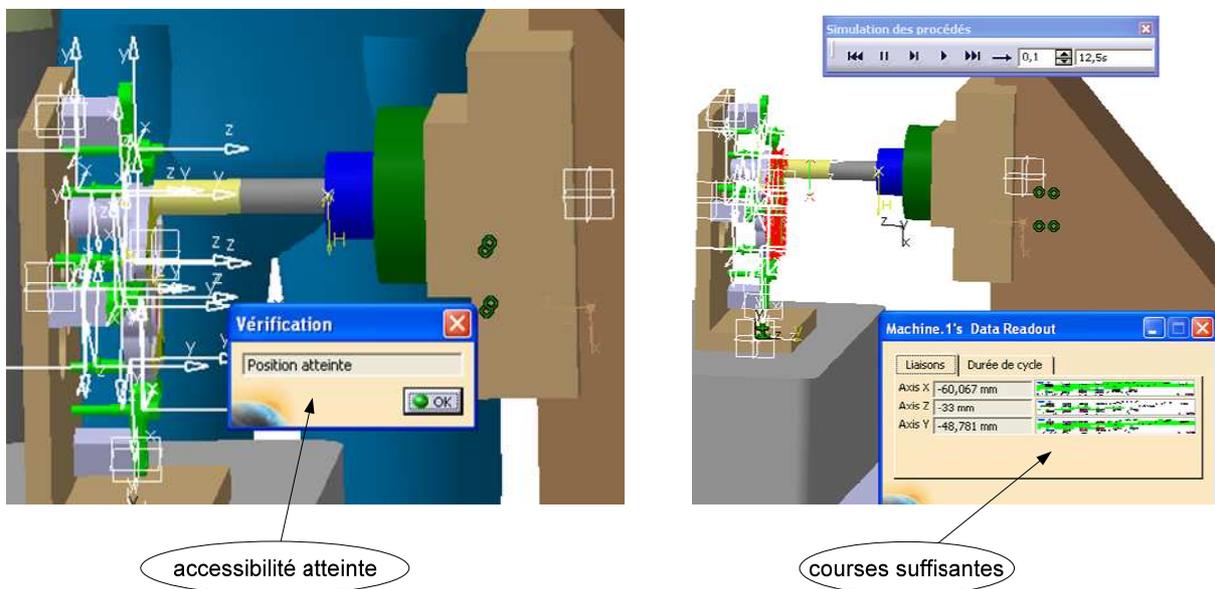


Figure V.25. Accessibilité et courses des axes suffisantes.

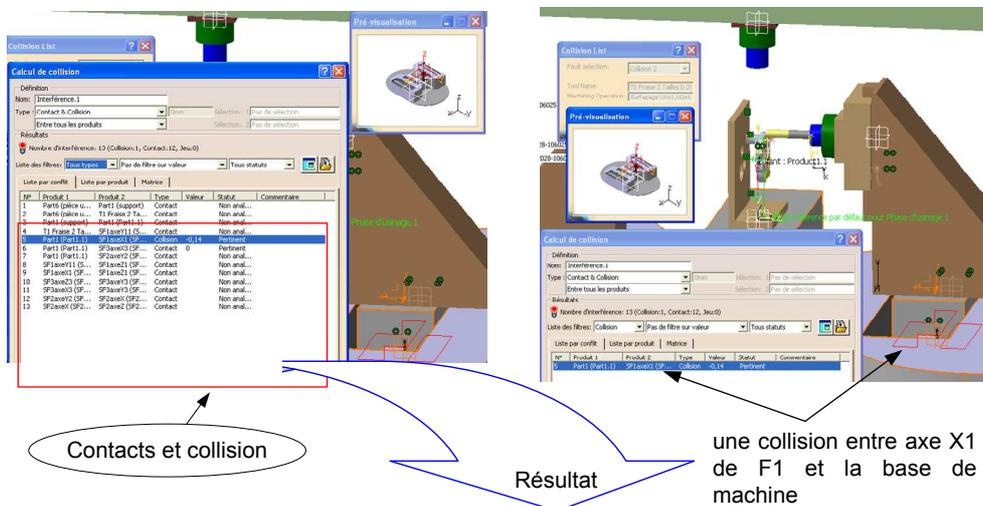
Dans la Figure V.25, il apparaît que les modifications apportées permettent de valider la simulation. C'est-à-dire, les mouvements associés aux broches sont valides au niveau des orientations et également au niveau des positions par rapport à la mise en position de la pièce.

D'ailleurs, l'analyse des limites de courses des axes représentés par les amplitudes sont suffisantes par axes portant les broches (résultat vert). La MOR est donc valide.

V.7.3.3 Vérification virtuel de collision.

Nous avons utilisé le progiciel de CFAO Catia/Delmia afin de vérifier virtuellement les risques de collision entre les broches et l'environnement de machine lors de l'usinage. La fonction d'aide à l'analyse de collisions permet au concepteur de déterminer la faisabilité des processus d'usinage au regard de la structure créée. L'existence ou l'absence de collision indique si la MOR est à ce stade valide ou non.

Pour cette vérification, les logiciels actuels nous imposent d'effectuer obligatoirement la simulation de façon indépendante pour chaque broche. Par ce type de la simulation, nous pouvons conserver la possibilité de détecter les contacts entre les broches et l'environnement de machine.



Federated Clash Publish

▼ Interférence.1

Spécification du calcul de collision

Selection Mode	Computation Mode
TWO_LIST	Contact / Clash

Produits sélectionnés

Product name	Shape name	Process mode
Part1 (Part.1)	Shape 1	Flat files
SFlaxeX1 (SFlaxeX.1)	Shape 1	Flat files

▼ Computation Result

Product vs product	Liak
	DataBase/Part1 (Part.1) -- Shape 1---SFlaxeX1 (SFlaxeX.1) -- Shape 1---1.xml

Figure V.26. Détection de collision lors de fonctionnalité de F₁.

Dans la Figure V.26, nous avons détecté un ensemble de contacts résultant de la fonction outil/pièce (tangences outil/pièce, simulation de la coupe, non traité) et une collision entre axe X₁ de F₁ et la base de machine. Cette dernière résulte de défauts géométriques existant lors de la conception (erreurs ou défauts dimensionnelles des modules, défauts d'assemblage lors de

création de la structure, défauts de mise en position, *etc.*). Alors dans ce cas, la machine est considérée comme non valide. Pour se faire, il faut revérifier les paramètres géométriques des modules qui sont identifiés en collision (base et axe X_1).

Le contrôle géométrique (interférence statique) des modules ainsi modifiés comme la base mais également l'axe X_1 est mené en vue de la détection des défauts d'assemblage des deux composants. Dans la Figure V.27, nous avons présenté le résultat de cette analyse de collision entre la base et l'axe X_1 suite à la correction du défaut. Il apparaît clairement une absence de collision. Nous pouvons dire que la machine est valide.

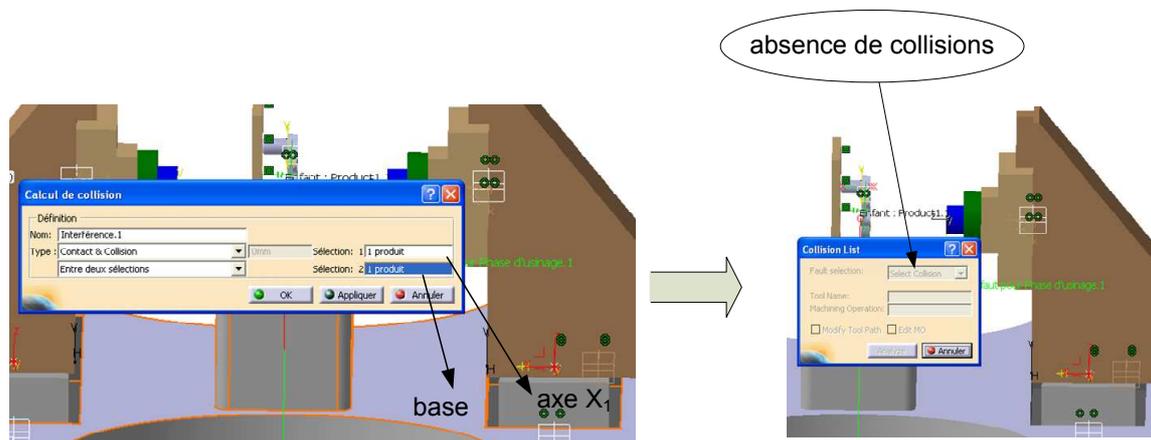


Figure V.27. Analyse de collision.

V.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à valider par la définition de la structure notre démarche de conception de la MOR, sachant que nous avons posé comme hypothèses fortes le principe d'indéformabilité des solides ayant des géométries nominales, parfaites et non perturbées. La conception structurale repose sur l'emploi de modules définis par des corps solides modélisés sous Catia. La jonction de ces modules est basée sur les outils et méthodes déjà utilisés en robotique (matrice de transformation à coordonnées homogènes, modèles géométriques et cinématique direct ou inverse...).

Nous avons proposé d'utiliser des techniques de représentation des liaisons par des graphes de connexions facilitant la description du modèle fonctionnel (global) de la MOR.

Nous avons proposé une démarche de validation par l'emploi de la simulation virtuelle à l'aide du progiciel de CFAO Catia/Delmia de l'éditeur Dassault System nous permettant de vérifier l'accessibilité en fonction des gammes proposées et de l'architecture définie aux chapitres précédents. Seule la vérification des collisions, fonctionnalité résidant dans le logiciel Catia permet de valider broche par broche les trajectoires et accessibilités. Cette situation nous impose de traiter les problèmes de collisions entre broches manuellement.

Les informations fournies à l'écran par Catia nous autorisent de corriger les erreurs de conception qui peuvent exister. Mais, cela ne peut pas être des corrections rapides et simples. Les interférences dues aux modifications introduisent plus de difficultés en termes de modélisation géométrique des modules. A ce titre, une démarche structurante lors de la modélisation CAO doit être introduite.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons présenté une étude portant sur la méthodologie de conception de la machine outil reconfigurable à type multibroches. La particularité de ce type de machine par rapport aux autres types conventionnels réside dans la possibilité d'évolution au niveau de la capacité et/ou de la flexibilité et d'exécuter simultanément plusieurs opérations à l'aide de broches actionnées de façon simultanée.

Notre méthodologie s'est appuyée sur le concept d'entité d'usinage déjà fort utilisé en génération de la gamme de fabrication. Cette méthodologie s'est focalisée sur un ensemble d'activités permettant précisément de passer des entités d'usinage à la structure réelle de la MOR. Elle conduit au choix de la configuration de la machine-outil et son niveau de reconfigurabilité.

Nous avons proposé une méthodologie en appuyant systématiquement sur trois catégories de problématiques, géométrique, architecturale et structurale. Ces concepts ont été développés permettant de traiter la fabrication de la famille de pièces.

Dans le chapitre I de ce mémoire, nous avons dépeint le cadre de réflexion dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse en présentant une étude bibliographique des systèmes manufacturiers actuels qui sont largement classés en systèmes manufacturiers dédiés et systèmes manufacturiers flexibles. Il a également permis d'introduire une vue sur différents travaux existants dont le point de vue de la reconfigurabilité porte essentiellement sur les aspects technico-économiques. Nous nous positionnons sur le champ de la conception de la MOR.

Dans le chapitre II, nous avons rappelé les notions d'entité, d'accessibilité, de volume d'encombrement et de polyèdre caractéristique qui constituent des éléments de référence de notre travail. Ces concepts ont constitué le point de départ de notre recherche permettant de formaliser les différentes connaissances nécessaires à la génération de MOR. Nous nous sommes appuyés sur le concept d'entité d'usinage caractérisé par des données de description relatives à la représentation interne, externe et par l'usinabilité. À partir de ces données, nous avons défini les caractéristiques indispensables permettant la description univoque de la famille de pièces à usiner. Associé à cette description, nous avons pu définir des processus d'usinage (gamme) conduisant à la génération des architectures géométriques et cinématiques de la MOR.

Par ailleurs, nous avons déterminé le concept de volume d'encombrement dont le rôle principal est de déterminer le volume d'occupation du système de posage et bridage de pièces à usiner dans le référentiel de la MOR. Ce volume d'encombrement permet de garantir les usinages en respectant les spécifications dimensionnelles et géométriques au travers de contraintes géométriques décrivant les espaces fonctionnels et de contraintes technologiques.

Le chapitre III est destiné à répondre à la question : « quelles tâches doivent être effectuées par la MOR ? Pour cela, nous avons mis en évidence deux aspects influençant sur la génération de l'architecture (géométrique et cinématique) de la MOR. Le premier aspect porte sur les facteurs opératoires nécessaires à l'exécution des entités d'usinage. Nous avons identifié chaque entité par un processus d'usinage (opérations, outils de coupe, directions d'approches et conditions opératoires) qui traduise toutes les connaissances élémentaires requises à la réalisation des opérations d'usinage. Le second aspect est consacré à l'usinabilité des entités au sens des trajets et trajectoires des outils et en conséquence les mouvements des

axes qui concourent à la réalisation des opérations d'usinage à assurer par la MOR. De plus, nous avons utilisé le concept de volume de balayage comme élément de spécification de l'espace de tâche de la MOR.

Le chapitre IV s'est focalisé sur les activités de description des processus de fabrication éventuels répondant précisément à la génération de tâche d'usinage de la MOR. Nous avons créé à partir des contraintes de fabrication basées sur des règles métiers et des connaissances permettent de définir l'ordonnancement d'usinage et les possibilités d'usinage de manière séquentielle et/ou de manière simultanée avec plusieurs broches. Nous avons utilisé le concept de la logique temporelle afin de répondre à la question de représentation des différents processus possibles. Au cours de ce chapitre, nous avons traité également deux problèmes liés à la configuration et à la reconfiguration de MOR à type multibroches. Le premier est architectural s'appuyant sur la définition d'architecture géométrique et cinématique de la MOR à partir de la spécification des processus de fabrication. Nous avons identifié de manière systématique les solutions répondant à la réalisation de famille de pièces à partir des règles basées sur les solutions d'usinage des entités et sur la possibilité de regroupement. Par ailleurs, nous avons spécifié les différentes solutions d'architecture par des critères s'appuyant sur, la productivité et sur le coût (nombre des broches, les axes requis). A partir de ces critères, nous avons illustré notre démarche en définissant la fabrication de la famille de pièces (P_A et P_B) avec informations concernant les demandes de clients et/ou marché. Ensuite, nous avons introduit un ensemble des contraintes sur l'emploi des systèmes technologiques (outil combiné, système à broches multiples...) et sur les possibilités de changement de modules de la MOR (une ou plusieurs broches sur un même axe ou ajout de broches supplémentaires associées à des axes). Une évaluation de la reconfigurabilité en tenant compte de ces contraintes a été présentée. Nous avons noté que la reconfiguration par ajouts de broches (dépendantes et indépendantes) est un caractère permettant de répondre réellement aux fluctuations de marché en termes de la productivité. Néanmoins, les charges financières semblent plus importantes.

Le chapitre (V) présente la mise en œuvre de notre démarche de conception de la MOR qui fait intervenir le modèle structural, le montage (porte-pièce), l'outil et la pièce. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la modélisation de la structure de la MOR multibroches conduisant à la génération d'un modèle global à partir de la définition de nature géométrique et cinématique des modules (composants standards ou spécifiques). Ce modèle global s'articule autour de la représentation de modèle géométrique et cinématique structural à l'aide des outils développés pour la robotique. Ce chapitre se conclut par une validation virtuelle faisant appel à la fonction de simulation du logiciel CFAO (Catia et Delmia). Cet outil de modélisation et de simulation nous a permis d'examiner la mise en position de pièces sur la palette de la machine, de confirmer les programmes d'usinage, de vérifier l'accessibilité, de corriger les erreurs de conception qui peuvent exister, d'analyser les limites de courses des axes et de détecter les collisions (si elles existent).

Perspectives et travaux futurs

En préambule, notre méthode est fortement conditionnée par la complétude des données décrivant la famille de produit tant sur le plan des évolutions dimensionnelles, géométriques, matériaux... mais aussi concernant les conditions définissant les cadences et évolutions de celles-ci. Néanmoins, l'approche entité, indépendamment des problématiques de conception de MOR, permet de structurer l'analyse pour satisfaire à une description univoque des pièces à fabriquer.

Par ailleurs, les perspectives relatives à ces travaux sont des trois ordres :

- l'un portant sur les aspects méthodologiques ;
- l'introduction des comportements mécaniques, de commande de manière à proposer des modèles de simulations plus prédictifs en se référant au plus près de la réalité par les développements logiciels que nous pouvons attendre ;
- les aspects technologiques de la reconfiguration.

Concernant les aspects méthodologiques, il convient de définir les relations entre les différentes caractéristiques définissant les géométries de la MOR. Ces relations doivent être définies par des critères permettant le choix raisonné des configurations géométriques. Ces critères doivent reposer sur les conditions de fabrication des familles de pièces et des contraintes économiques (nombre de broches et d'axes). L'expertise en gamme (ordonnancement, outils, processus, montage d'usinage) est sans nul doute le point d'achoppement pour la détermination de ces critères en respectant les objectifs de reconfigurabilité face aux contraintes d'accessibilité des entités, des cadences... Concernant l'architecture de MOR, l'intervention conjointe des automaticiens et de mécaniciens est primordiale. Néanmoins, s'agissant des concepteurs mécaniciens, l'étude des perturbations dimensionnelles et géométriques selon les empilages des axes (chaîne ouverte simple) conditionne les critères de qualité des pièces produites, de « commandabilité » de la MOR. Les aspects de conception structurale doit répondre aux contraintes de commande et de comportement dynamique et vibratoire en mécanique (tant pour la broche et les axes ainsi que les bases). Les solutions de résolution des aspects mécaniques peuvent s'orienter vers l'utilisation d'approches de modélisation multicorps.

Il y a un manque d'outils « capables » d'automatiser les phases d'analyse débouchant sur la génération de la géométrie et de l'architecture de la MOR. Concernant l'architecture, les outils logiciels actuels ne disposent pas de fonction permettant de simuler les mouvements des broches simultanément. Des développements informatiques sont à réaliser. Par ailleurs, notre méthodologie est fortement contrainte par les démarches de la modélisation géométrique des solides car les modifications des modules sont souvent génératrices d'interférences. La coopération automaticiens/mécaniciens nécessitent de développer des outils interactifs (commande, actionnement, câblage, gestion des interfaces)

La conception de MOR est considérablement tributaire des technologies. En effet, l'approche allemande (PTW de Darmstadt) repose essentiellement sur la configurabilité locale des modules avec le développement des technologies d'interfaçage mécanique, fluide et électrique. Cet aspect n'est nullement à négliger. Il permet de résoudre des problèmes de reconfigurabilité par des changements rapides de modules (essentiellement d'organes terminaux).

Références bibliographiques

(Par ordre alphabétique)

- [Abele et al, 2006] E. ABELE, T. LIEBECK and A. WÖRN, "Measuring flexibility in investment decisions for manufacturing systems", *Annals of the CIRP*, 55/1: 433-440, 2006.
- [Al-bender et Symens, 2005] F. AL-BENDER and W. SYMENS, "Characterization of frictional hysteresis in ball-bearing guideways", *Wear*, Volume 258, Issues 11-12, June 2005, Pages 1630-1642.
- [Amara, 2002] H. AMARA, « *Contribution à la génération de gammes d'usinage: intégration de l'homme et approche multi-agent* », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, 2002.
- [Anotaiapaiboon et al, 2006] W. ANOTAIPAIBOON, S. MAKHANOV and E.L.J. BOHEZ, "Optimal setup for five-axis machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46: 964–977, 2006.
- [Anselmetti et al, 1995] B. ANSELMETTI, A. CHEP and P. MOGNOL, "Decision-Based Approach : Application To The Automatic Design Of Process Planning", *International Journal of Production Planning & Control*, Taylor & Francis publishers, London, vol 6, n°4, pp. 345-351, 1995.
- [Anselmetti et al, 1996] B. ANSELMETTI, A. CHEP, K. MAWUSSI et F. VILLENEUVE, « Approche entité-état pour la conception de processus d'usinage », *First international conference on Integrated Design and Manufacture in Mechanical Engineering* IDMME'96, Nantes, France, pp. 593-612, April 1996.
- [Anselmetti et Bourdet, 1993] B. ANSELMETTI and P. BOURDET, "Optimization of a workpiece considering production requirements", *Computers in Industry*, 21 (1993) 23-34.
- [Anselmetti et Hassen, 2005] B. ANSELMETTI and H. LOUATI, "Generation of manufacturing tolerancing with ISO standards", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005) 1124–1131.

- [Anselmetti, 2003] B. ANSELMETTI, « Cotation de fabrication et métrologie », Paris : Hermes science publications-Lavoisier, 2003 - ISBN 2-7462-0667-6.
- [Anselmetti, 2008] B. ANSELMETTI, « Cotation fonctionnelle tridimensionnelle et statistique », Paris : Hermès science publications-Lavoisier, 2008 - ISBN 978-2-7462-1597-9.
- [Askin et Standrige, 1993] R.G. ASKIN and C.R. STANDRIDGE, "Modeling and Analysis of Manufacturing Systems", *John Wiley & Sons, Inc*, 1993.
- [Azab et El Maraghy, 2007] A AZAB and H EL MARAGHY, "Sequential process planning: A hybrid optimal macro-level approach", *Journal of Manufacturing Systems*, 26, pp 147–160, 2007.
- [Azab et El Maraghy, 2009] A. AZAB and H. EL MARAGHY, "Reconfiguring Process Plans: A New Approach to Minimize Change," *Book of Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems, Springer London*, pp 179-194, ISBN: 978-1-84882-066-1, 2009.
- [Belmokhtar, 2006] S. BELMOKHTAR, « *Lignes d'usinage avec équipements standard : modélisation, configuration et optimisation* », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006.
- [Benmokhtar et al, 2006] S. BELMOKHTAR, A. DOLGUI, N. GUSCHINSKY and G. LEVIN, "Integer programming models for logical layout design of modular machining lines", *Computers & Industrial Engineering* 51, 502–518, 2006.
- [Besson, 1983] Patrick BESSON, « l'atelier de demain: perspective de l'automatisation flexible », *Presse Universitaire de Lyon*, 1983.
- [Bohez, 2002] E.L.J. BOHEZ, "Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis", *Journal of Machine tools and Manufacture*, 42, 505-520, 2002.
- [Bouzgarrou et al, 2002] B. C. BOUZGARROU, B. THUILOT, P. RAY and G. GOGU, "Modélisation des manipulateurs flexibles appliquée aux machines-outils UTGV Modeling of flexible manipulators applied to HSMW machine tools", *Mécanique & Industries*, 3 (2002) 173–180.
- [Boyle et Rong, 2004] I.M. BOYLE and K. RONG, "A CASE-BASED Reasoning fixture design method", *Framework and indexing mechanisms, ASME, Design Engineering*

Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, September 28 – October 2, Salt Lake City, Utah USA, 2004.

[Cao et Altintas, 2007] Y. CAO and Y. ALTINTAS, "Modeling of spindle-bearing and machine tool systems for virtual simulation of milling operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Issue 9, July 2007, Pages 1342-1350.

[Castagnetti et al, 2008] C. CASTAGNETTI, E. DUC and P. RAY, "The Domain of Admissible Orientation concept: A new method for five-axis tool path optimisation", *Computer-Aided Design* (2008), doi:10.1016/j.cad.2008.07.002.

[Chanal et al, 2007] H. CHANAL, M. RAUCH, E. DUC, J-Y. HASCOET et P. RAY, « Identification géométrique des machines outils à structure parallèle : proposition d'une méthode basée sur l'usinage d'une pièce », *Mécanique & Industries* 8, 505–512, 2007.

[Chang et Angkasith, 2001] C. A. CHANG and V. ANGKASITH, "Using hopfieldneural networks for operational sequencing for prismatic parts on NC machines", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14 (2001) 357–368.

[Chen et al, 2002] L. CHEN, J. PU and X. WANG, "A general model for machinable features and its application to machinability evaluation of mechanical parts", *Computer-Aided Design*, 34-239-249, 2002.

[Chen et Yanb, 1999] F-C. CHEN and H-S. YANB, "Configuration synthesis of machining centres with tool change mechanisms", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 273–295, 1999.

[Chen, 2000] F.C. CHEN, "On the structural configuration synthesis and geometry of machine centres". *Proceedings of Instrumentation and Mechanics Engineers*, vol. 215, p.641-652, 2000.

[Chiou, 2004] C.J. CHIOU, « Accurate tool position for 5-axis rules surface machining by swept envelop approach », *Computer Aided Design*, 36:967–974, 2004.

[Cordebois, 2003] J-P. CORDEBOIS, « Fabrication par usinage », collaborateurs (P. MARTIN, Mi. CHAMBE, A. D'ACUNTO, M. DURSAPT, P.FRANÇOIS, B. FURET, J-F. GUENAL, J-M. LEMEUR, L. MATHIEU, F. MOLLET, Y. POUZAIN, J. RECH), *Dunod*, Paris, 2003.

- [Dano, 1966] S. DANO, "Industrial Production Model. Vienna", *Springer*, 1966.
- [Defersha et Chen, 2006] F.M. DEFERSHA and M. CHEN, "A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems", *Int. J. Production Economics*, 103:767–783, 2006.
- [Denkena et al, 2007] B. DENKENA, M. SHPITALNI, P. KOWALSKI, G. MOLCHO and Y. ZIPORI, "Knowledge management in process planning", *Annals of the CIRP*, 56/1, 175-180, 2007.
- [Derigent, 2005] W. DERIGENT, « *Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques* »: Prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2005.
- [Derras, 1998] C. DERRAS, « *Formalisation de l'imprécision informationnelle et des incertitudes décisionnelles des connaissances expertes pour la génération de processus de fabrication* », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 1998.
- [Due et al, 2006] E. DUC, V. PATELOUP and P. RAY, "The certification of CAM output tool paths: A necessary improvement", *A Proceedings Volume from the 12th IFAC Conference*, 17-19 May 2006, Saint-Etienne, France 2006, Pages 793-798.
- [Edalew et al, 2001] K. O. EDALEW, H. S. ABDALLA, and R. J. NASH, "A computer-based intelligent system for automatic tool selection", *Materials & Design*, Volume 22, Issue 5, 337-351, 2001.
- [ElMaraghy, 1993] H.A. ELMARAGHY, "Evolution and future perspective of CAPP", *Annals of the CIRP*, 42, 739-751, 1993.
- [ElMaraghy, 2005] H.A. ELMARAGHY, "Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. Special Issue: Reconfigurable Manufacturing Systems, 17/4: 261-276, 2005.
- [Étienne, 2007] A. Étienne, « *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, Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique ENSAM, CER de Metz, Université de PAUL VERLAINE-Metz, école doctorale IAEM lorraine, 2007.

- [Finel, 2004] B. FINEL, « *Structuration de lignes d'usinage : méthodes exactes et heuristiques* ». Thèse de doctorat, Université de Metz, 2004.
- [Freiheit, 2003] T. FREIHEIT and S.J. HU, "Impact of Machining Parameters on Machine Reliability and System Productivity", *2nd International Conference CIRP on Agile, reconfigurable Manufacturing*, August 20-21, 2003.
- [Furet et al, 2000] B. FURET, Y. GRATON and N. RAFII, « Optimisation de la préparation et de la mise en œuvre de la production, Application industrielle : Entreprise de fabrication de moules pour l'automobile », *IDMME 2000*, SCGM/CSME, Montréal, mai 2000.
- [Gagnol et al, 2007] V. GAGNOL, B.C. BOUZGARROU, P. RAY and C. BARRA, "Model-based chatter stability prediction for high-speed spindles", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Issues 7-8, June 2007, Pages 1176-1186.
- [Gama, 1990] Groupe GAMA, « La gamme automatique en usinage », *Hermès*, Paris, 1990.
- [Gama, 1999] Groupe GAMA, « Ingénierie simultanée : conception des processus de fabrication », Université d'été, ENS de Cachan, 5-9 juillet 1999.
- [Garro et Martin, 1993] O. GARRO and P. MARTIN, "Shiva a multiarms machine tool", *Annals of the CIRP*, 42/1, 433-436, 1993.
- [Garro et Martin, 1993] O. GARRO and P. MARTIN, « Towards new architectures of Machine Tools », *International Journal of Production Research*, Vol. 31, n° 10, pp. 2403-2414, ISSN 0020-7543, October 1993.
- [Garro, 1992] O. GARRO, « *Conception d'éléments Physiques de Systèmes de Production: application aux machines outil à architecture parallèle* », Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, 1992.
- [Gen et al, 2009] M. GEN, L. LIN and H. ZHANG, "Evolutionary techniques for optimization problems in integrated manufacturing system: State-of-the-art-survey", *Computers & Industrial Engineering* 56 (2009) 779–808.
- [Gogu et al, 2003] G. GOGU, P. RAY, D. COUTELLIER and P. CHEDMAIL, "Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering", *4th International Conference in IDMME held in Clermont-Ferrand, France*, at the Institut

Français de Mécanique Avancée (IFMA), May 14-16, 2002, Dordrecht Boston London : Kluwer Academic Publishers , cop. 2003 . ISBN 1-4020-1163-6 (rel).

[Gross et Yellen] J. GROSS and J. YELLEN, "Handbook of Graph Theory", *Series: Discrete Mathematics and Its Applications*, Volume: 25, CRC, ISBN 1-58488-090-2, (December 29, 2003).

[Guschinskaya, 2007] O. GUSCHINSKAYA, « *Outils d'aide à la décision pour la conception en avant-projet des systèmes d'usinage à boîtiers multibroches* », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2007.

[Harik, 2007] R.F. HARIK, « *Spécifications de fonctions pour un système d'aide à la génération automatique de gamme d'usinage : Application aux pièces aéronautiques de structure, prototype logiciel dans le cadre du projet RNTL USIQUICK* », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Université de Nancy 1, 2007.

[Heisel et Meitzner, 2003] U. HEISEL and M. MEITZNER, "Reconfigurable manufacturing systems," *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 1/1: 6–9, 2003.

[Hitomi, 1996] K. HITOMI, "Manufacturing system engineering", Taylor & Francis, 1996.

[Hollis et Quaid, 1995] R.H. HOLLIS and A. QUAID, "An architecture for agile assembly", *Proc. Am. Soc. of Precision Engineering*, 10th Annual Meeting, Austin, Oct. 15-19, 1995.

[Johansson, 2006] U. JOHANSSON, « *Statistiques en bref : industrie, commerce et services* », *Technical Report KS-NP-06-010-FR-N*, Communauté Européenne, 2006.

[Jönsson et al, 2005] A. JÖNSSON, J. WALL and G. BROMAN, "A virtual machine concept for real-time simulation of machine tool dynamics", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 795–801, 2005.

[Kamar et al, 2001] T.R. KRAMER, H. HUANG, E. MESSINA, F.M. PROCTOR and H. SCOTT, « *A feature-based inspection and machining system* », *Computer-Aided Design*, 33-653-669, 2001.

[Koren et al, 1999] Y. KOREN, T. MORIWAKI, F. JOVANE, G. ULSOY and H. Van BRUSSEL, "Reconfigurable Manufacturing Systems", *Annals of the CIRP*, 48/2, 527-540, 1999.

- [Koren et Ulsoy, 2002] Y. KOREN and G. ULSOY, "vision, Principles and Impact of Reconfigurable Manufacturing Systems", *Powertrain International*, 14-21, 2002.
- [Koren, 2005] Y. KOREN, "Reconfigurable Manufacturing and Beyond (Keynote Paper)", *CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing*, Ann Arbor, Michigan, 11.-12.05.2005.
- [Kumar et al, 2000] A. S. KUMAR, J.Y.H. FUH and T.S. KOW, « An automated design and assembly of interference-free modular fixture setup », *Computer-Aided Design*, 32, 583-596, 2000.
- [Kusiak et Huang, 1996] A. KUSIAK and C-C. HUANG, "Development of Modular Products", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Part A, Vol. 19, No.4, pp. 523-538, 1996.
- [Kusiak et Larson, 1995] A. KUSIAK and N. LARSON, "Decomposition and Representation Methods in Mechanical Design", *ASME Transaction*, Special 50th Anniversary Design Issue, Vol. 117, pp.17-24, 1995.
- [Kyoung-Gee et al, 2006] A. KYOUNG-GEE, M. BYUNG-KWON, J. ZBIGNIEW and P. PASEK, "Modeling and compensation of geometric errors in simultaneous cutting using a multi-spindle machine tool", *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, 29: 929–939, 2006.
- [Landers et Min, 2002] R.G. LANDERS and B-K. MIN, "*Development of a prototype reconfigurable machine tool*", University of Michigan, Department of Mechanical Engineering, Ann Arbor, Michigan, 2002.
- [Lee et al, 1996] H.S. LEE, E.F. MORITZ and Y. ITO, "Functional Description of Machine Tools and Its Application to Marketability Analysis", *Journal of Engineering Design*, Vol. 7, No. 1, pp. 83-94, 1996.
- [Lee et al, 2003] I-H. LEE, J-H. CHA, M-W. PARK and J-J. KIM, "An integrated inference architecture for machine tools design involving complex knowledge", *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, 22: 321–328, 2003.
- [Lee et She, 1997] R-S. LEE and C-H. SHE, "Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools", *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, 13:658-665, 1997.

- [Lee, 1997] G.H. LEE, "Reconfiguration Consideration Design of Components and Manufacturing Systems", *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, Vol. 13, pp. 376-386, 1997.
- [Levaillant et al, 2005] G. LEVAILLANT, M. DESSOLY, P. GHIDOOSI, P. LEROUX, J-C. MOULES, G. POULACHON and P. ROBERT, « *Usinage par enlèvement de copeaux de la technologie aux applications industrielles* », Groupe Eyrolles, 2005, ISBN 2-212-11648-9, 2005.
- [Lim et al, 2000] T. LIM, J. CORNEY and D. E. R CLARK, "Exact Tool Sizing for Feature Accessibility", *Int J Adv Manufacturing Technology*, 16:791–802, 2000.
- [Lin et Shen, 2003] Y. LIN and Y. SHEN, "Modelling of Five-Axis Machine Tool Metrology Models Using the Matrix Summation Approach", *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, 21:243–248, 2003.
- [Liu et Wang, 2006] Z. LIU and L. WANG, "Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning", *Computers in Industry*, doi:10.1016/j.compind .2006.07.003, 2006.
- [Malek et Yang, 2005] K. ABDEL-MALEK and J. YANG, « Sweeping of an object held by a robotic end-effector) », *Robotics and computer-Integrated Manufacturing*, 21, 159-173, 2005.
- [Mangesh et al, 1999] P. MANGESH, B. BHANDARKAR and R. NAGI, "STEP-based feature extraction from STEP geometry for Agile Manufacturing", *Computers in Industry*, 41(2000), 3–24, 1999.
- [Martin et al, 2001] P. MARTIN, A. D'ACUNTO et F. SCHNEIDER, « Quelques génie mécanique en intégration produit-process », 15^{ème} Congrès français de mécanique, Nancy 3-7 septembre 2001.
- [Martin et al, 2002] P. MARTIN, A. D'ACUNTO, J. ARZUR et L. ABT, « Intégration produit-process : méthodologie de conception d'un système de fabrication dédié à la grande série », *Revue français de CAO*, novembre, 459-476, 2002.
- [Martin, 2005] P. MARTIN, "Some aspects of integrated product and manufacturing process", *Advances in Integrated design and manufacturing in mechanical engineering*, edited by A. Bramley, D. Brissaud, D. Coutellier and C. McMahon, *Kluwer Academic Press*, 2005.

- [Martin, 2006] P. MARTIN, "Integrated product and manufacturing process: Virtual Manufacturing of Reconfigurable Manufacturing Systems", *Proceedings of the 15th International Conference on Manufacturing Systems – ICMaS*, Published by Editura Academiei Romane, ISBN, University POLITEHNICA of Bucharest, Machine and Manufacturing Systems Department Bucharest, Romania, 26 - 27 October, 2006.
- [Mehrabi et al, 2000] M.G. MEHRABI, A.G. ULSOY, and Y. KOREN, "*Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics*", University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2125, 2000.
- [Mehrabi et al, 2002] M.G. MEHRABI., A.G. ULSOY., Y. KOREN., and P. HEYTLER, "*Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems*". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13:135–146, 2002.
- [Méry, 1997] B. MÉRY, « *Machine à commande numérique* », Paris : Hermès, 1997, ISBN 2-86601-607-6.
- [Moon et Kota, 1998] Y. MOON and S. KOTA, "*Generalized Kinematic Modeling Method for Reconfigurable Machine Tools*", *Proceedings of DETC' 98, ASME Design Engineering Technical Conferences*, Atlanta, Georgia, USA, September 13-16, 1998.
- [Moon et Kota, 2002] Y. MOON and S. KOTA, "*Generalized Kinematic Modeling of Reconfigurable Machine Tools*", *ASME Transactions, Journal of Mechanical Design*, V. 124.47, pp. 47-51, March 2002.
- [Moon, 2000] Y-M. MOON, "*Reconfigurable Machine Tool Design: Theory and Applications*", Ph. D Dissertation, Mechanical Engineering in the University of Michigan, 2000.
- [Moriwaki, 2008] T. MORIWAKI, "Multi-functional machine tool", *Annals of the CIRP - Manufacturing Technology* 2008, doi:10.1016/j.cirp.2008.09.004.
- [Moriwaki, 2008] T. MORIWAKI, "Multi-functional machine tool", *CIRP - Manufacturing Technology*, 57 (2008), pp 736–749.
- [Moyne et al, 2004] J. MOYNE, J. KORSKAS and D. TILBURY, "Reconfigurable Factory Testbed (RFT): A distributed test-bed for reconfigurable manufacturing systems", *Proceedings of 2004 JUSFA, 2004 Japan – USA Symposium on Flexible Automation*, Denver, Colorado, July 19-21, 2004.

- [Paredis et al, 1996] C.J.J. PAREDIS, P.K. KHOSLA and H.B. BROWN, "A Rapidly Deployable Manipulator System", *In Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, pp. 1434-1439, 1996.
- [Paredis et Khosla, 1993] C.J.J. PAREDIS and P.K. KHOSLA, "Kinematic Design of Serial Link Manipulator From Task Specification", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 274-286, 1993.
- [Paredis et Khosla, 1994] C.J.J. PAREDIS and P.K. KHOSLA, "Mapping Tasks into Fault Tolerant Manipulators", *In Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, 1994.
- [Paredis, 1996] C.J.J. PAREDIS, "An Agent-Based Approach to the Design of Rapidly Deployable Fault Tolerant Manipulators", Ph. D Dissertation, Department of Electronical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1996.
- [Paris, 1995] H. PARIS, « *Contribution à la conception automatique des gammes d'usinage : le problème du posage et du bridage des pièces* », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble, 1995.
- [Pritschow et al, 2003] G. PRITSCHOW, K.H. WURST, M. SEYFARTH and T. BÜRGER, "Requirements for controllers in reconfigurable machining systems", *CIRP - 2nd International Conference on Reconfigurable Manufacturing*, 2005.
- [Pritschow et Junghans, 1993] G. PRITSCHOW and G. JUNGHANS, "Open system controllers – a Challenge for the future of the machine tool industry", *Annals of the CIRP*, 42/1: 449-452, 1993.
- [Rameshbabu et Shunmugam] V. RAMESHBABU and M. S. SHUNMUGAM, "Hybrid feature recognition method for setup planning from STEP AP-203", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25: 393–408, 2009.
- [Regli et al, 1997] W. C. REGLI, S. K. GUPTA and D. S. NAU, "Towards multiprocessor feature recognition", *Computer-Aided Design*, Volume 29, Issue 1, Pages 37-51, January 1997.
- [Regli, 1995] W. C. REGLI, "Geometric algorithms for recognition of features from solid models", Thèse de doctorat, University of Maryland at College Park, 1995.

- [Robin et al, 2007] V. ROBIN, L. SABOURIN, G. GOGU et J-M. FAUCONNIER, « Démarche de conception d'une cellule de parachèvement », *18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble*, 27-31aout 2007.
- [Roboam, 1988] M. ROBOAM, « *Modèle de référence et intégration des méthodes d'analyse pour la conception des systèmes de production* », Thèse de doctorat, Univerté de Bordeaux 1, 12 juillet 1988.
- [Rogers et Bottaci, 1997] G.G ROGERS and L BOTTACI, "Modular Production Systems: A New Manufacturing Paradigm", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.8, pp. 147-156, 1997.
- [Sabourin et Villeneuve, 1996] L SABOURIN and F VILLENEUVE, "an expert CAPP system", *Advances in Engineering Software*, Elsevier Science Limited, n°25, pp. 51-59, 1996 Omega.
- [Sabourin, 1995] L. SABOURIN, « *Expertise en conception de gammes d'usinage : approche par entité et propagation de contraintes* », Thèse de doctorat, LURPA (ENS de Cachan), 1995.
- [Schuktschik, 1983] R. SCHUKTSCHIK, "Requirements for structures of automated machine tool", *Annals of the CIRP*, vol.32/1/1983.
- [SCRA, 2002] SCRA, "The STEP Manufacturing Suite: Defining the Suite of STEP Application Protocols and the implementation architecture for STEP-enabled parts production within commercial and Defense applications", white paper (version 3), 2002.
- [Seo et Kim, 2005] Y. SEO and T. KIM, "Structure modelling of machine tools and internet-based implementation", *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2005.
- [She et Chang, 2007] C-H. SHE and C-C. CHANG, "Development of a five-axis postprocessor system with a nutating head", *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188 (2007) 60–64.
- [Sohlenius, 1992] G. SOHLENIUS, "Concurrent engineering, Royal Institute of Technology", *Annals of the CIRP*, 41/2, p 645-655, 1992.

- [Sommashekar et Subrahmanyam, 2002] R. SOMMASHEKAR and S. SUBRAHMANYAM, "Fixture features selection in feature-based systems", *Computers in Industry* 48, 99-108, 2002.
- [Sorby, 2007] K.SORBY, "Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47-299–306, 2007.
- [Species, 2008] SPECIES, "Robust Production System Evolution Considering Integrated Evolution Scenarios", <http://www.species.polimi.it>. Accessed 27 March 2008.
- [Spicer et al, 2002] P. SPICER, Y. KOREN, M. SHPITALNI and D. YIP-HOI, «Design principals for Machining System Configurations », *Annals of the CIRP*, 51/ 1, 2002.
- [Spyridi et Requicha, 1990] A. J. SPYRIDID and A. REQUICHA, "Accessibility for the automatic inspection of mechanical parts by coordinate measuring machines", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1284-1289, Cincinnati (USA), 1990.
- [Srinivasan et Sheng, 1999a] M. SRINIVASAN and P. SHENG, "Feature-based process planning for environmentally conscious Machining - Part 1: Microplanning", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 15 (1999) 257-270.
- [Srinivasan et Sheng, 1999b] M. SRINIVASAN and P. SHENG, "Feature based process planning in environmentally conscious machining - Part 2: Macroplanning", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 15 (1999) 271-281.
- [Stampfer et Rétfalvi, 2006] M. STAMPFER and A. RÉTFALVI, "Integrated Process and Fixture Planning System", *SISY, 4th Serbian-Hungarian Joint Symposium on Intelligent Systems*, 2006.
- [SUH et al, 2003] S-H. SUH, Y. SEO, S-M. LEE, T-H. CHOI, G-S. JEONG and D-Y. KIM, "Modelling and implementation of internet-based virtual machine tools", *Int J Adv Manufacturing Technology*, 21:516–522, 2003.
- [Tandon et Khan, 2009] P. TANDON and M. R. KHAN, "Three dimensional modeling and finite element simulation of a generic end mill", *Computer-Aided Design*, 41:106-114, 2009.

- [Tichkiewitch et al, 2007] S. TICHKIEWITCH, P. RAY and M. TOLLENAERE, "Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering", Dordrecht : *Springer*, 2007, ISBN 978-1-4020-6760-0.
- [Tiwari et al, 2001] M. K. TIWARI, K R. KOTAIAH and S. BHATNAGAR, "A case based computer aided process planning system for machining prismatic components", *Int J Adv Manufacturing Technology*, 17: 400-411, Springer 2001.
- [Tollenaere, 1998] M. TOLLENAERE, « Conception de produits mécanique, méthodes modèles et outils », *Hermès*, Paris, 1998.
- [Tseng, 1999] Y-J. TSENG, "Fixturing design analysis for successive feature-based machining", *Computers in Industry*, 38, 249–262, 1999.
- [Tutunea-Fatan et Feng, 2004] O. TUTUNEA-FATAN and H.Y. FENG, " Configuration analysis of five-axis machine tools using a generic kinematic model", *Journal of Machine tools and Manufacture*, 44, 1235-1243, 2004.
- [Van Brussel et al, 1998] H. Van BRUSSEL, J. WYNS, P. VALCKENAERS, L. BONGAERTS and P. PEETERS, "Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA", *Computers In Industry*, special issue on intelligent manufacturing systems, Vol. 37, No. 3, pp. 255 - 276, 1998.
- [Villeneuve, 1990] F. VILLENEUVE, « Génération Ascendante de processus application aux entités d'usinage de type alésage », *Groupe GAMA*, Hermès, Paris, 1990.
- [Villeneuve, 1990] François VILLENEUVE, « Génération ascendante d'un processus d'usinage, proposition d'une formalisation de l'expertise, application aux entités alésages », Thèse de doctorat, LURPA (ENS de Cachan), Ecole Centrale Paris, 1990.
- [Villeneuve, 1999] F. VILLENEUVE, « Contribution à la génération des processus d'usinage et à l'intégration des contraintes de fabrication en conception de produits », habilitation à diriger des recherches de l'institut national Polytechnique de Grenoble, LURPA (ENS de Cachan), 1999.
- [Patrity, 1998] V. PATRITY, « Systèmes de pilotage auto-organisés et gammes distribuées : méthode de conception et application à une machine-outil », Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, Nancy, 1998.

[Wang et al, 2006] Q.H. WANG, J-R. LI and R-R. ZHOU, « Graphics- assisted approach to rapid collision detection for multi-axis machining », *Int J Adv Manufacturing Technology*, 30, 852-863, 2006.

[Yao et al, 2002] Y. YAO, J. LI, W B LEE, C. F. CHEUNG and Z. YUAN, "VMC: a test-bed for machining", *Computers in Industry*, 47, 255-268, 2002.

[Yao et al, 2006] Y. YAO, H. ZHAO, J. L. and Z. YUAN, "Modeling of virtual workpiece with machining errors representation in turning", *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 437-444, 2006.

[Yongtao et Jingying, 2006] H. YONGTAO, M. JINGYING, "A knowledge-based auto-reasoning methodology in hole-machining process planning", *Computers in Industry*, 57, 297-304, 2006.

[Zirmi, 2006] O. ZIRMI, « *Analyse de fabricabilité en conception de gammes d'usinage pour l'aéronautique* », Thèse de doctorat, l'INPG, école doctorale Mécanique.

[Cnomo, web] <http://www.cnomo.com>

[CNRS/LAAS] <http://www.laas.fr/laas/>

[ERC/RMS] <http://erc.engin.umich.edu/>

[Licon, web] <http://www.licon.com/index.php>

[Meteor2010, web] <http://www.meteor2010.de>

[Modelling of machine]

<http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machtool/machtool/model.html>

[Omgnet, web] http://www.omgnet.eu/index_en.cfm

[PCI, web] <http://www.Pci.fr>

[Pibomulti, web] <http://www.pibomulti.com/>

[Ramp, web] http://ramp.isg-scra.org/ap224_steponapage.html

[RAMP] http://ramp.isg-scra.org/ap224_details_shaperep.html

[Sandvik, web] <http://www.coromant.sandvik.com/fr>

[Scra, web] <http://www.isg-scra.org/>

[SKF, web] <http://www.skfpt.com/spindles.html>

[Somex, web] <http://www.somex.fr/>

[Step ap-224, web] http://www.steptools.com/support/stdev_docs/express/ap224/

[Step, AP224] http://ramp.isg-scra.org/ap224_desc.html

[Symop, web] http://www.symap.com/francais/QuiSommesNous/P1_5.asp

[System design] <http://sysdesign.org/publications.htm>

[Traceparts, web] <http://www.traceparts.com/>

[Unito, web] <http://www.unito.fr/english/index2.htm>

[Usinage] <http://stanb.club.fr/Usinage/usinage.htm>

<http://www.machine-outil.info/>

http://www.ceratizit.com/index_FRA_HTML.htm

VI. Annexes

VI.1 Annexe. A : nomenclature des entités d'usinage

La nomenclature proposée ne prétend pas à l'exhaustivité ; il est en effet difficile de définir a priori les diverses opérations d'usinage qui se retrouvent sur les différentes pièces mécaniques et se prêtent à un paramétrage. L'utilisateur a toujours la possibilité de créer, pour ses besoins propres, d'autres entités.

AP-224 Summary

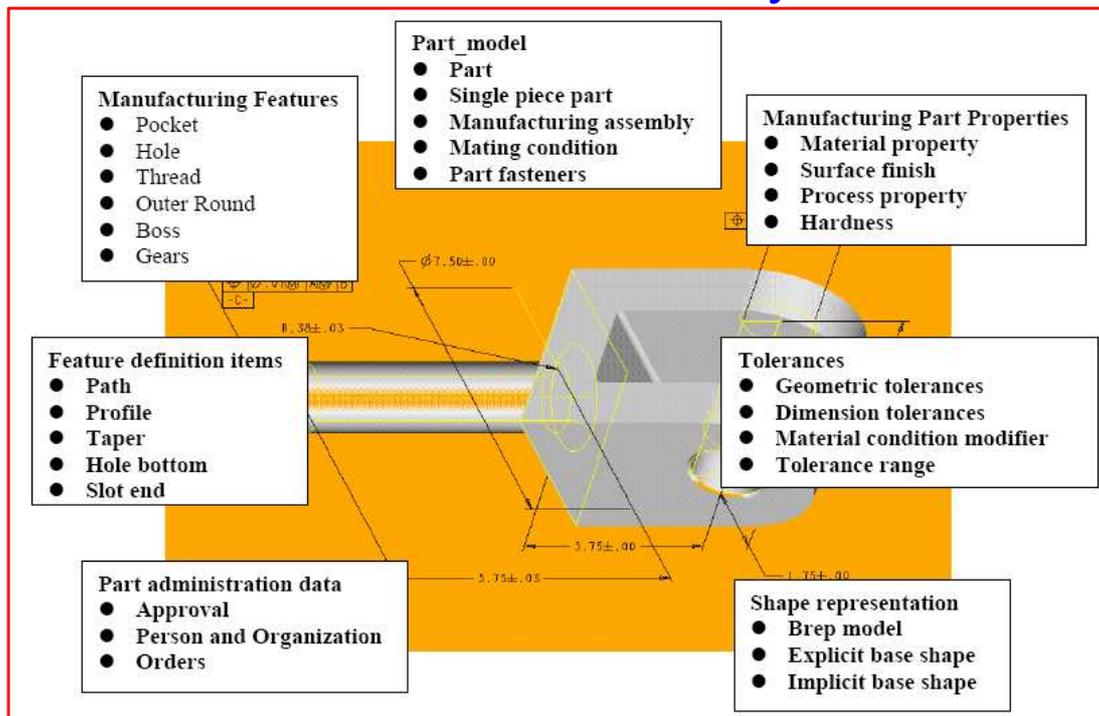


Figure VI.1 STEP AP-224 [Scara, web]

Dans ce travail, on s'est appuyé sur le protocole STEP AP-224 ISO 10303 (Mechanical product definition for process planning using machining features), qu'a édité comme norme ISO standard en 1999.

AP (Application Protocol) 224 est largement une spécification d'une bibliothèque des entités d'usinage, mais également est porté à la définition des entités d'usinage en termes de B-rep. La Figure VI.1 résume le protocole STEP AP-224 d'après la publication de SCARA.

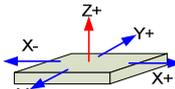
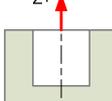
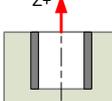
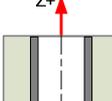
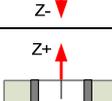
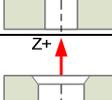
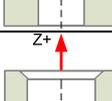
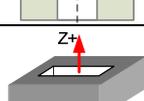
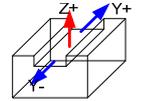
La deuxième édition de AP-224, éditée en avril 2001, a classifié 16 catégories des entités d'usinage caractérisées par 51 paramètres. Chacune d'entité a une forme stéréotypée constituée par plusieurs paramètres. Par exemple, pour spécifier un trou, les paramètres incluent le diamètre, profile circulaire (circular-profile) et profondeur (hole-depth), le trou est précisément défini par une valeur pour chaque paramètre.

Le Tableau VI.1 montre les différentes catégories des entités d'usinage cataloguées en STEP AP-224 (édité en 2001).

Entités d'usinage	Machining features	Entités d'usinage	Machining features
Bossage	Boss	Face plane	Planar-face
Poche	Pocket	Entité de révolution	Revolved-feature
Trou	Hole	Calotte	Spherical-cap
Rainure	Slot	Profil extérieur général	General-outside-profile
Protubérance	Protrusion	Filetage	Thread
Bout arrondi	Rounded-end	Marquage	Marking
Arrondi	Outer-round	Moletage	Knurl
Epaulement	Step	Enlèvement de volume de matière	General-volume-removal

Tableau VI.1. Catégories des entités d'usinage selon STEP AP-224.

Dans le Tableau VI.2, nous représentons quelques types d'entités d'usinage 2.5D de STEP AP-224 (certains types attachés dans notre travail) et ses directions d'usinage associées au chaque type de celles-ci, réalisables par d'opérations d'usinage axiales ou par le fraisage (en bout ou en roulant).

Entité	Opération d'usinage		Direction d'usinage	Dessin
Surface plane	Fraisage	en bout	Z+	
		en roulant	Y+ ou Y- ou X+ ou X-	
Trou non débouchant	Pointage + Perçage		Z+	
Trou alésé non débouchant	Alésage		Z+	
Trou alésé débouchant	Alésage		Z+ ou Z-	
Trou lamé	Lamage		Z+	
Trou chanfreiné	Perçage + chanfreiner		Z+	
Trou lamé chanfreiné	Lamage + chanfreiner		Z+	
Poche	Fraisage en bout		Z+	
Rainure	Rainurage	en bout	Z+	
		en roulant	Y+ ou Y-	

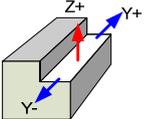
Epaulement	Fraisage en bout	Z+	
	Fraisage en roulant	Y+ ou Y-	

Tableau VI.2. Quelques entités d'usinage utilisées à type prismatique
2.5D.

VI.2 Annexe B: opérations d'usinage

L'usinage d'une entité consiste à passer de son état brut (entité brute) à son état fini (entité usinée). Ce passage est assuré par une succession d'actions opératoires appelé *processus d'usinage*. Les différentes techniques des systèmes d'usinage, particulièrement les outils de coupe dont ces actions sont exécutées. Un outil de coupe permet d'enlever de la matière dans l'objectif de générer la pièce attendue. Une action au cours de laquelle un outil produit une forme géométrique est appelée une opération d'usinage. Dans ce mémoire, on s'est appuyé sur les opérations d'usinage à type prismatique.

VI.2.1 Type d'opérations d'usinage

Le passage d'un état brut à l'état fini d'une entité est généralement composé de trois phases d'usinage : ébauche, demi-finition et finition, chacune de ces phases est caractérisée par différents modes d'opérations. L'ébauche, qui est la première étape du processus d'usinage d'une entité à usiner, permet d'enlever le maximum de matière en un minimum de temps actif. Pour l'effectuer, il est capital de la nécessité des efforts de coupe et des outils pouvant y résister et ayant des grands diamètres. La finition est l'action opératoire finale dans un processus d'usinage d'une entité (surface), et on cherche le plus souvent la qualité imposée : dimensions, forme et rugosité dans les tolérances données. L'objectif de la finition est d'exécuter précisément une surface respectant les contraintes géométriques requises du bureau d'études. Contrairement au mode d'ébauche, le temps d'usinage en finition n'a pas la nécessité devant le respect des contraintes imposées sur l'entité. La profondeur de passe pour la finition est globalement faible donc les efforts sont alors faibles (plus faibles que l'ébauche), les outils utilisés sont donc entièrement différents. L'étape de demi-finition présente l'intermédiaire entre l'ébauche et la finition.

Généralement, toute opération d'usinage peut être définie généralement (en manière commune) par les indicateurs suivants : l'outil de coupe, sa direction d'approche, sa trajectoire et les conditions opératoires. Dans ce mémoire, on s'est appuyé notamment sur deux types d'opérations : les opérations axiales (pointage, perçage, alésage,...) et les opérations de fraisage (en bout et en roulant). Ces ont les opérations qui sont, de façon générale, effectuées pour réaliser les entités d'usinage de type prismatique.

VI.2.1.1 Opérations axiales

Cette appellation (opérations axiales) englobe les techniques à mouvement de coupe circulaire et avance axiale pure et présente à priori l'ensemble des opérations associées à l'usinage des différentes entités de type trou, telles que pointage, perçage, alésage, lamage, taraudage, etc (voir la Figure VI.2). Les opérations axiales sont effectuées par deux types de mouvements : une rotation permet d'assurer la coupe orthogonale (caractérisée par un ou des arrêtes d'usinage) et l'autre est linéaire pour réaliser les trajectoires d'usinage qui sont globalement simples.

Dans ce qui suit, nous recensons les différents paramètres (indicateurs) utilisés pour conduire ces deux mouvements.

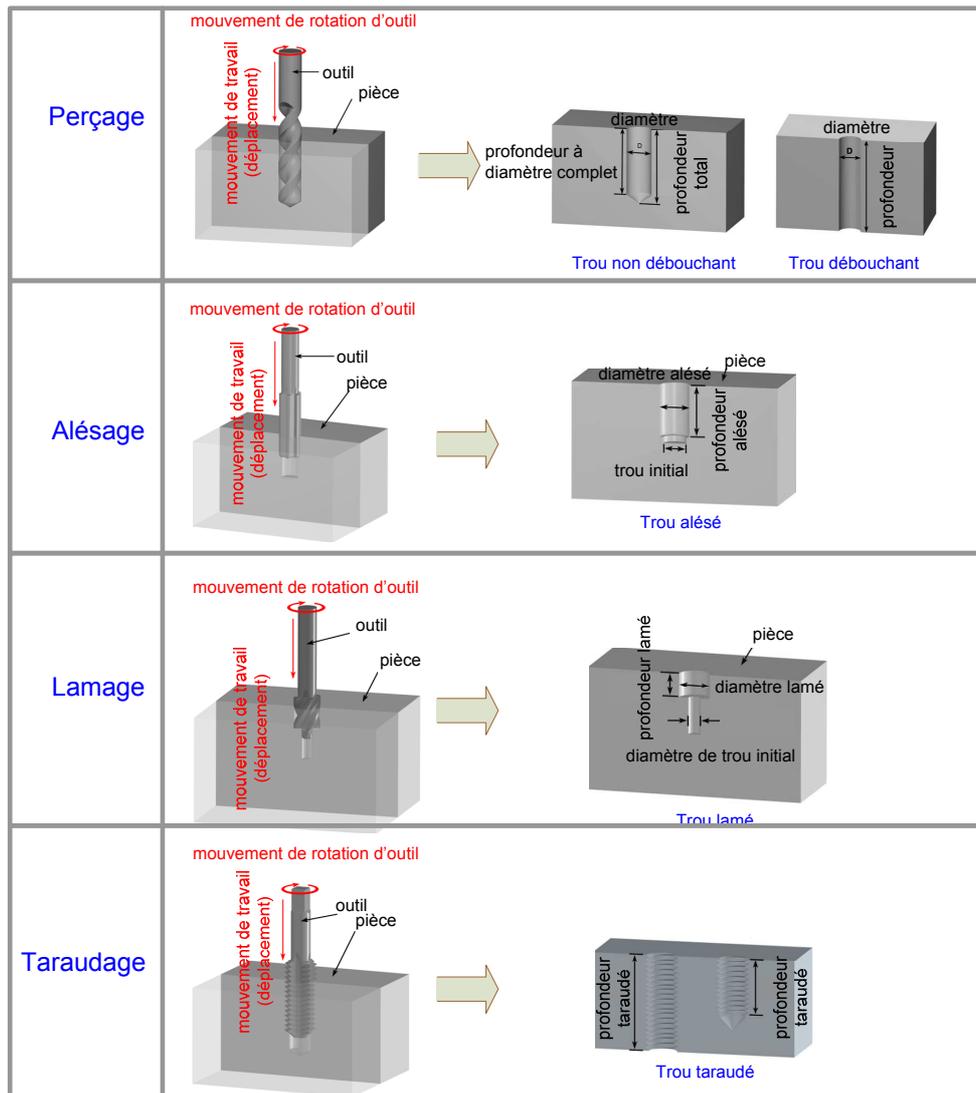


Figure VI.2. Opérations d'usinage axiales.

Vitesse de broche n (tr/min)

Vitesse de coupe V_c (m/min)
$$V_c = \frac{\pi \times D_c \times n}{1000} \text{ où } D_c \text{ diamètre d'outil (mm)} \quad (\text{VI.1})$$

Avance par tour f_n (mm/tr)
$$f_n = Z \times f_z \quad (\text{VI.2})$$

 f_z : avance par dent (mm), Z : nombre de dent

Vitesse d'avance V_f (mm/min)
$$V_f = f_n \times n \quad (\text{VI.3})$$

Pour réaliser une forme avec une qualité souhaitée, on définit, pour chaque opération, les conditions opératoires qui conduisent les mouvements de l'outil enlevant de la matière. La définition des conditions consiste à sélectionner les valeurs appropriées pour la vitesse de

coupe V_c et l'avance par tour f_n . Ces valeurs sont déterminées à partir des tableaux de caractéristiques de coupe. Il y a plusieurs critères pour effectuer ce choix, notamment l'interdépendance à une mode d'usinage (ébauche, demi-finition, finition), la matière usinée (acier, aluminium), la matière de l'outil (ARS, carbure) et le type de l'opération (perçage, alésage, taraudage) [Guschinskaya, 2007]. En spécifiant la longueur de la course d'outil L et en la divisant par la vitesse d'avance V_f , on obtient le temps d'usinage t .

$$\text{Temps d'usinage } t \text{ (min)} \qquad t(\text{min}) = \frac{L(\text{mm})}{V_f (\text{mm/min})} \qquad (\text{VI.4})$$

VI.2.1.2 Opération de fraisage

Cette appellation (opérations de fraisage) englobe les techniques à mouvement de coupe circulaire et avance axiale et/ou radiale et sont utilisées dans l'objectif de la réalisation des états de surfaces diverses, comme la présentation de la Figure VI.3 [Sandvik, web], par enlèvement progressif d'une certaine quantité de matière de la pièce usinée à un taux de mouvement ou d'avance relativement faible par une fraise tournant à une vitesse comparativement élevée.



Figure VI.3. Exemple des opérations de fraisage [Sandvik, web].

La caractéristique capitale du procédé de fraisage est l'enlèvement de matière sous forme de copeaux individuels par chaque dent. Dans notre contexte, nous en limitons ici l'application aux deux types de procédés de fraisage (Figure VI.4). Le premier en bout, où la surface usinée est sous la fraise. Le deuxième en roulant, la surface usinée est tangente à la génératrice de la

fraise, c'est donc le profil de la fraise qui va déterminer la forme. L'axe de la fraise est placé perpendiculairement (fraisage en bout) et parallèlement (fraisage en roulant) à la surface à usiner.

Lors du fraisage en bout, la surface fraisée résulte d'une action des arêtes de coupe situées sur le bout de la fraise. Par contre, lors du fraisage en roulant, la fraise a un certain nombre de dents autour de sa circonférence. Les fraises utilisées en fraisage en roulant peuvent avoir une denture droite ou hélicoïdale réalisant une action de coupe orthogonale ou oblique.

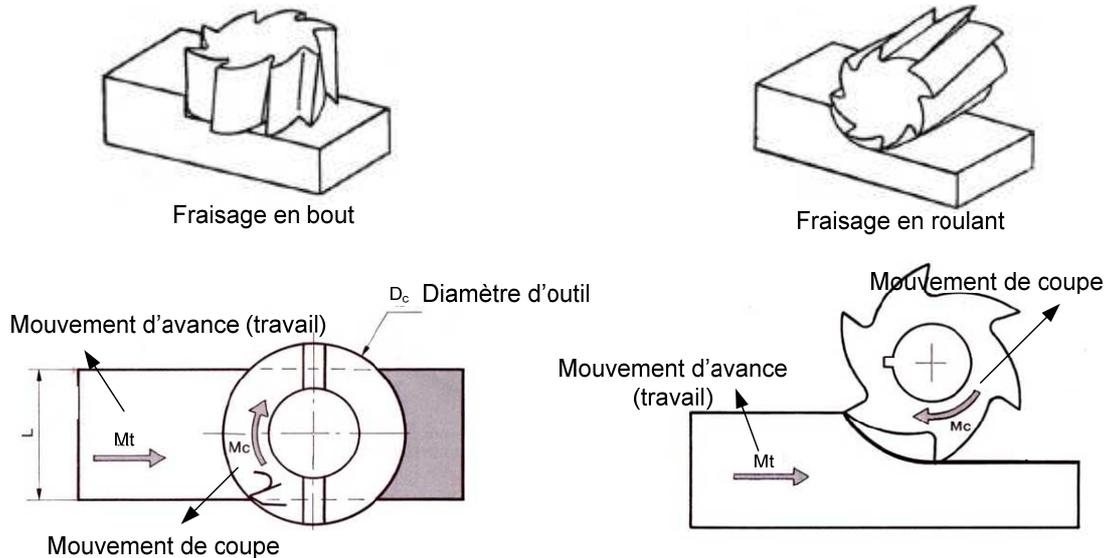


Figure VI.4. Opérations de fraisage en bout et en roulant

Une opération de fraisage en bout ou en roulant emploie un ou plusieurs mouvements d'outil : axiaux et radiaux (linéaires, circulaires), qui sont décrits en utilisant les mêmes paramètres qu'une opération axiale, à savoir *la vitesse de broche n (tr/min)*, *la vitesse de coupe V_c (m/min)*, *l'avance par tour f_n (mm/tr)* et *la vitesse d'avance V_f (mm/min)*.

La Figure VI.5 [Sandvik, web] montre différents outils utilisés pour effectuer des opérations de fraisage.

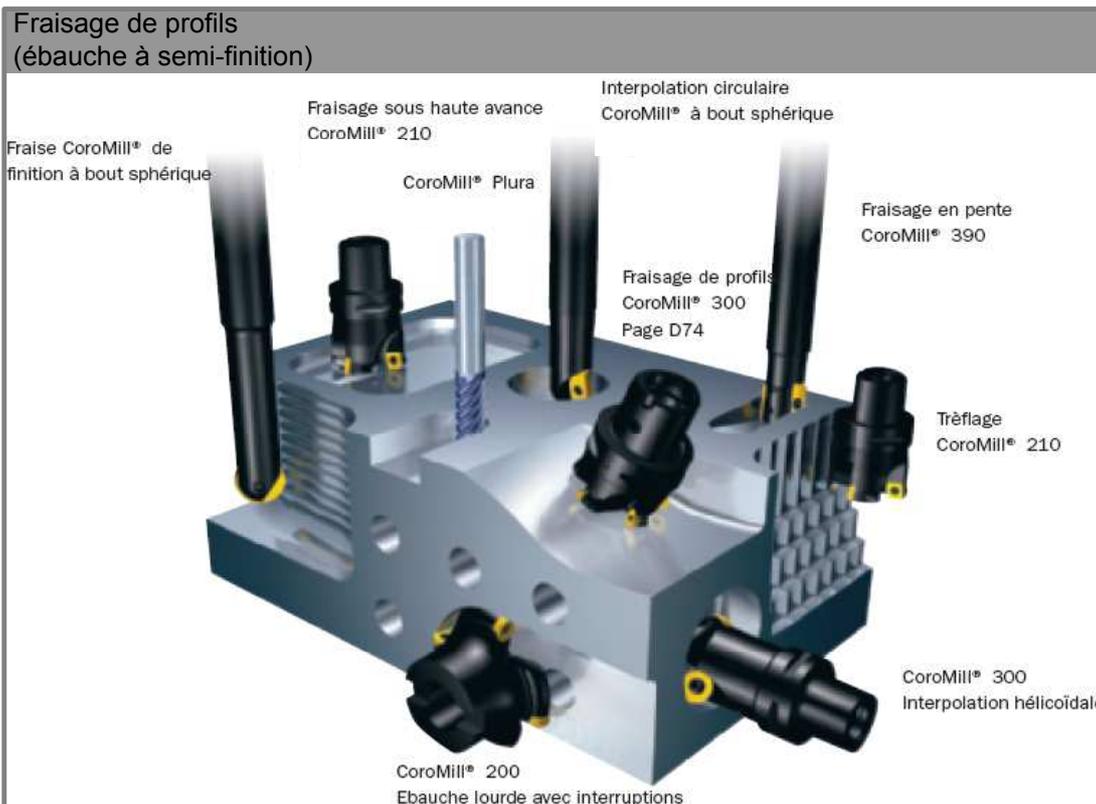
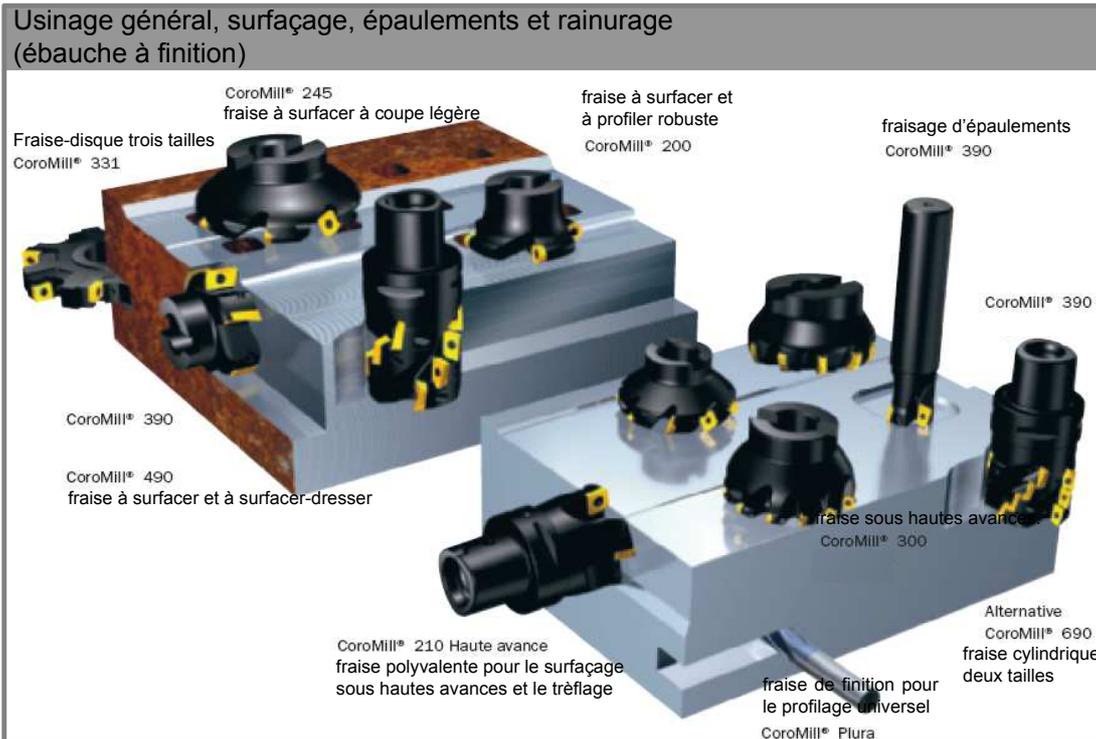


Figure VI.5. Exemple des outils de fraisage [Sandvik, web].

VI.3 Annexe C : Mouvement des corps rigides

Un corps dit rigide lorsqu'il est supposé indéformable. Ainsi, nous n'avons pas besoin de décrire le mouvement de tous les points le composant, car l'ensemble des distances mutuelles entre les différents points du solide reste invariable tout au long du mouvement. Alors, le mouvement de l'objet sera donc représenté à l'aide d'un seul des points du corps et des trois axes de coordonnées attachées à ce point.

Soit un corps rigide S (Figure VI.6) caractérisé par un repère $\mathfrak{R}(A)$ constitué de l'origine O_A et d'une base orthonormée $\{\vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A\}$, où $\mathfrak{R}(A) = \{O_A, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A\}$. La transformation du corps S peut se définir par les données du champ de déplacement entre deux points, O_A (position initiale) et O_B (position actuelle) (constitué de l'origine O_B , où $\mathfrak{R}(B) = \{O_B, \vec{X}_B, \vec{Y}_B, \vec{Z}_B\}$).

Soit P, un point quelconque du corps S, identifié selon ${}^{OB}r^P$ par rapport au $\mathfrak{R}(B)$ et selon ${}^{OA}r^P$ par rapport au système de coordonnées $\mathfrak{R}(A)$.

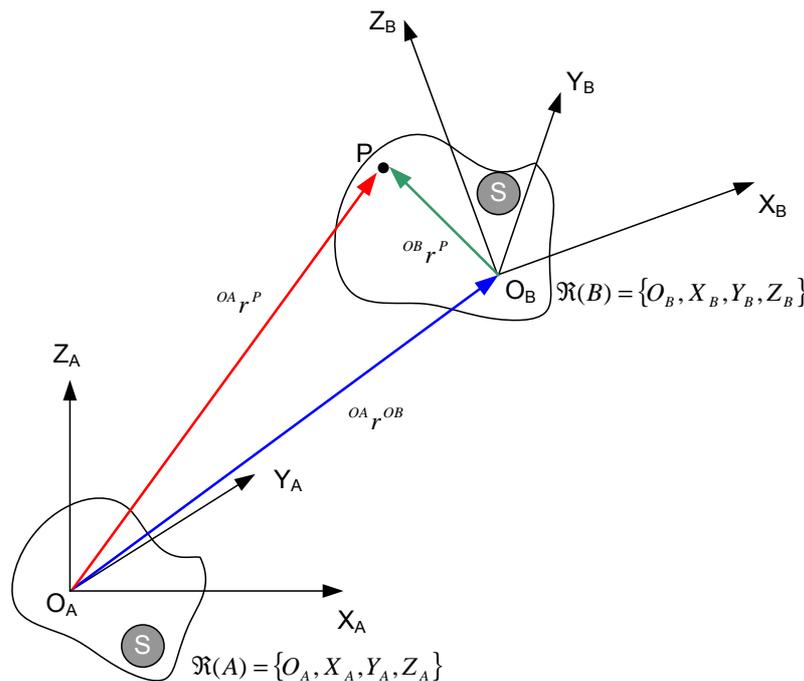


Figure VI.6. Position de corps rigide.

Le déplacement de tout point P (particule) de S est donné par la relation suivante :

$${}^{OA}r^P = {}^{OA}r^{OB} + {}_{OA}R^{OB} \times {}^{OB}r^P \quad (\text{VI.5})$$

Ce formalisme exprime la localisation du P par rapport au système de coordonnées global $\mathfrak{R}(A) = \{O_A, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A\}$.

- ${}^{OA}r^P$: coordonnées du P par rapport au $\mathfrak{R}(A)$;
- ${}^{OB}r^P$: coordonnées du P par rapport au $\mathfrak{R}(B)$;
- ${}^{OA}r^{OB}$: translation de l'origine O_B par rapport à l'origine O_A ;
- ${}^{OA}R^{OB}$: rotation du repère $\mathfrak{R}(B)$ par rapport au repère $\mathfrak{R}(A)$.

Selon la représentation homogène, l'équation ((VI.5)) est :

$$\begin{bmatrix} {}^{OA}r^P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{OA}r^{OB} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^{OA}R^{OB} \\ 0_{1 \times 3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^{OB}r^P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.6})$$

Nous pouvons écrire l'équation (IV.6) en façon suivante :

$$\begin{bmatrix} {}^{OA}r^P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{OA}R^{OB} & {}^{OA}r^{OB} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{OB}r^P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.7})$$

Ce formalisme (IV.7) représente la position de point P par rapport du $\mathfrak{R}(A)$.

$${}^A T^B = \begin{bmatrix} {}^{OA}R^{OB} & {}^{OA}r^{OB} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.8})$$

L'équation (VI.8) exprime la matrice 4x4 de coordonnées homogènes de la transformation du point, O_A au point O_B .

Le passage du O_A au O_B est réalisé régulièrement par une succession de translations et d'orientations sur et autour du système de coordonnées $\mathfrak{R}(A)$ (Figure VI.7).

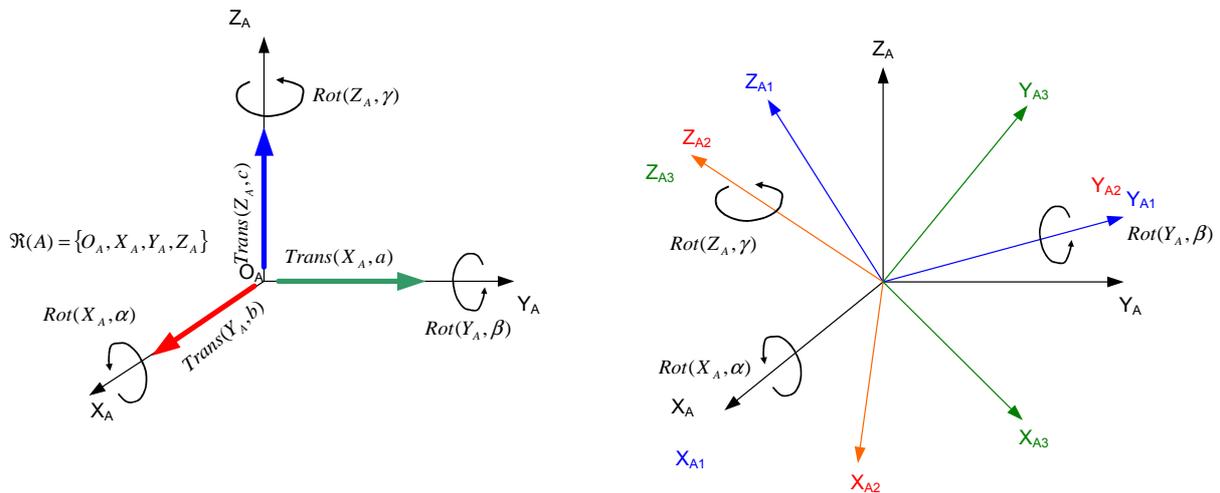


Figure VI.7. Paramètres de transformations de repère.

La succession de translations s'effectue par trois paramètres $Trans(a, b, c)$ (mouvements cartésiens) sur $\mathfrak{R}(A)$ sont le suivant (Figure VI.7) :

- passage sur X_A , de la valeur a ;

$$Trans(X_A, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.9})$$

- passage sur Y_A , de la valeur b ;

$$Trans(Y_A, b) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.10})$$

- passage sur Z_A , de la valeur c .

$$Trans(Z_A, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.11})$$

De façon générale, pour les translations $Trans(a, b, c)$ (mouvements cartésiens) sur $\{X_A, Y_A, Z_A\}$ respectivement, l'équation (VI.8) est :

$${}_A T^B = trans(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.12})$$

Ce formalisme présente la matrice de coordonnées homogènes de la translation du $\mathfrak{R}(A)$ au $\mathfrak{R}(B)$.

D'ailleurs, la succession d'orientations s'effectue également par trois paramètres (mouvements polaires) $Rot(\alpha, \beta, \gamma)$ autour $\mathfrak{R}(A)$ sont le suivant (Figure VI.7) :

- rotation autour X_A , d'angle α ;

$$Rot(X_A, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.13})$$

- rotation autour Y_A , d'angle β ;

$$Rot(Y_A, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.14})$$

- rotation autour Z_A , d'angle γ .

$$Rot(Z_A, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.15})$$

Alors, pour les mouvements d'orientations polaires $Rot(\alpha, \beta, \gamma)$ autour $\{X_{A1}, Y_{A2}, Z_{A3}\}$ successivement, est le suivant :

$${}_{oA}T^{oB} = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma & -C\alpha S\gamma & S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma C\beta & 0 \\ C\beta S\gamma + S\alpha S\beta C\gamma & C\alpha C\gamma & S\beta S\gamma - S\alpha C\beta C\gamma & 0 \\ -C\alpha S\beta & S\alpha & C\alpha C\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.16})$$

L'équation (VI.16) exprime la succession d'orientations effectuée lors de déplacement du $\mathfrak{R}(A)$ au $\mathfrak{R}(B)$.

Alors, la transformation (translations et orientations) du $\mathfrak{R}(A)$ au $\mathfrak{R}(B)$ est définie, selon les équations (VI.12) et (VI.16), par le formalisme suivant:

$${}_{oA}T^{oB} = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma - S\alpha S\beta S\gamma & -C\alpha S\gamma & S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma C\beta & a \\ C\beta S\gamma + S\alpha S\beta C\gamma & C\alpha C\gamma & S\beta S\gamma - S\alpha C\beta C\gamma & b \\ -C\alpha S\beta & S\alpha & C\alpha C\beta & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{VI.17})$$

Ce formalise présente la matrice 4x4 du changement de repère du $\mathfrak{R}(A)$ au $\mathfrak{R}(B)$.

CONCEPTION DU SYSTEME DE FABRICATION DE PIECES MECANIQUES EN GRANDE SERIE: FORMALISATION DE LA CONFIGURATION GEOMETRIQUE (ENVELOPPE) ET CINEMATIQUE DE MACHINE-OUTIL RECONFIGURABLE (MOR)

RESUME: Tous les secteurs industriels sont aujourd'hui soumis à une pression économique importante et à une concurrence internationale accrue de part la globalisation des marchés. Pour répondre à cet état de fait, les entreprises sont contraintes d'innover et d'améliorer le cycle d'élaboration des produits et/ou processus depuis l'idée jusqu'au la mise sur le marché des produits. L'évolutivité rapide des produits et de la concurrence ont conduit les entreprises industrielles à faire un pas supplémentaire en imaginant de nouveaux systèmes de fabrication pour assurer simultanément une haute productivité et une haute flexibilité avec la contrainte nouvelle de changements rapides de famille de pièces. Le principe de « reconfigurabilité » de système de fabrication répond à ces contraintes. Or, il faut aujourd'hui faire preuve d'une très grande réactivité, pouvoir répondre rapidement à l'apparition d'un nouveau produit (évolution du design) et/ou une nouvelle demande (fluctuation de volume) afin de rester compétitif. L'objectif de notre travail est de proposer une méthodologie de conception concernant les « Machines-Outils Reconfigurable » (MORs). Ces nouvelles machines-outils disposant de multibroches sont une réponse face aux fluctuations (changements fréquents) de la demande, de manière rapide et rentable en tenant compte du nombre croissant de variantes (variabilité en fonctionnalités et en volumes). La particularité de ce type de machine par rapport aux autres types conventionnels réside dans la possibilité d'évolution au niveau de la capacité et/ou de la flexibilité et d'exécuter simultanément plusieurs opérations à l'aide de broches actionnant de façon simultanée. Le domaine concerné porte sur la fabrication de famille de pièces mécaniques essentiellement prismatiques utilisant les techniques d'usinage (fraisage, opérations axiales...). La validation de notre méthodologie passe par la simulation virtuelle de la machine-outil fondée sur la modélisation géométrique, cinématique en tenant compte des concepts d'entité d'usinage, de visibilité, d'accessibilité.

Mots-clés: *machine-outil reconfigurable, conception de machine de production (machine-outil, robot industriel, MMT), systèmes manufacturiers reconfigurables, configuration de machine, structure de machine, entités d'usinage, accessibilité*

MANUFACTURE SYSTEMS DESIGN OF MECHANICAL WORK PIECE IN MASS PRODUCTION: FORMALIZATION OF THE GEOMETRICAL (ENVELOPE) AND KINEMATIC CONFIGURATION OF RECONFIGURABLE MACHINE TOOL (RMT)

ABSTRACT: Today all industrial sectors are subjected to an upward economic pressure and the international competition from the market globalization. To answer in this irrefutable fact, the companies are required to innovate and improve the cycle of product development and/or process from the idea to the product marketing. The fast changes in parts for existing products and competition have led the industrial companies to take an additional step by imagining new manufacturing systems to ensure simultaneously a high productivity and a high flexibility with additional constraints of rapid changes of the part family. This emergence of the "reconfigurability" we can date from the beginning of the year 1990. However, it is necessary today to show a very great reactivity, to be able to answer quickly the appearance of a new product and/or a new demand (fluctuation of volume) in order to stay competitive. The purpose of this paper is to propose and to validate a design methodology of the new paradigm concerning the "Reconfigurable Machine Tools" (RMT), which are one of the answers, faced with fluctuations of demands (frequent market changes), quickly and cost effective by taking into account the increasing alternatives (variability in terms of functionality and volume). The characteristic of this type of machine in relation to other conventional types lies in the upgrading capability in terms of the capacity and/or flexibility and to carry out simultaneously several operations using spindles actuating simultaneously. The field concerned this work is defined for the manufacturing of workpieces using the technology of prismatic machining (milling, axial operations...) based on different concepts of visibility, accessibility and machining features.

Keywords: *reconfigurable machine tool, design of production machine (machine tool, industrial robot, CMM), reconfigurable manufacturing systems, configuration of machine, structure of machine, machining features, accessibility*