

# METHODOLOGIE DE CHOIX D'UNE ARCHITECTURE DE MACHINE-OUTIL 5 AXES POUR L'USINAGE DU TITANE

M. LAJILI <sup>a</sup>, H. CHANAL<sup>a</sup>, B.C. BOUZGARROU<sup>a</sup>, E. DUC<sup>a</sup>

a. Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000  
Clermont–Ferrand, France

[montassar.lajili@sigma-clermont.fr](mailto:montassar.lajili@sigma-clermont.fr) [helene.chanal@sigma-clermont.fr](mailto:helene.chanal@sigma-clermont.fr)  
[belhassen-chedli.bouzgarrou@sigma-clermont.fr](mailto:belhassen-chedli.bouzgarrou@sigma-clermont.fr) [emmanuel.duc@sigma-clermont.fr](mailto:emmanuel.duc@sigma-clermont.fr)

## Résumé :

*Les exigences de productivité et de qualité dans l'industrie aéronautique imposent d'avoir des machines-outils optimisées en termes de précision, de cinématique et de dynamique. C'est dans cette optique que de nombreux travaux d'évaluation des performances des machines-outils dans une phase préliminaire de la conception sont mis en place. Cet article présente une méthodologie de synthèse d'architectures de machines-outils 5 axes en fonction des exigences sur les opérations d'usinage à réaliser. 2160 architectures cinématiques sont possibles dans le cas des machines-outils 5 axes sérielles. Un premier tri est réalisé avant d'affiner les études sur les architectures jugées pertinentes. Il est basé sur l'expression de contraintes techniques auxquelles doit répondre la machine-outil en fonction du type d'opérations d'usinage. L'évaluation est réalisée par l'attribution d'un point à chaque fois qu'une architecture respecte une contrainte technique. Le score obtenu permet ainsi de classer les architectures vis-à-vis des contraintes techniques exprimées. Cette présélection permet de restreindre le nombre d'architectures à analyser plus finement. La problématique est alors d'identifier et d'exprimer les contraintes techniques vis-à-vis d'un type d'opérations d'usinage à réaliser. Nous illustrons cette étude sur la conception d'une machine-outil 5 axes pour l'usinage de pièce aéronautique en titane.*

## Abstract :

*Productivity and quality requirements in the aerospace industry require optimized machine tools in terms of precision, kinematics and dynamics. In this context many researches evaluating the performance of machine tools in the preliminary phase design are made. This paper presents a methodology for selecting 5-axis machine tool architectures according to the requirements of the machining operations to be performed. In fact, 2160 structural architectures are possible in the case of 5-axis serial machine tools. A first sorting must be carried out before refining the studies on the architectures considered relevant. This first sorting is based on the expression of technical constraints to which the machine tool must respond in accordance with the type of machining operations to be performed. The evaluation is carried out by assigning a point whenever an architecture respects a technical constraint. The obtained score allows to classify the architectures with respect to the technical constraints expressed. This pre-selection makes it possible to restrict the number of architectures to be analyzed more finely. The Problematic is then to identify and express the technical constraints with regard to a type of machining operations to be carried out. We illustrate this study on the design of a 5-axis machine tool for the machining of titanium aeronautical parts.*

**Mots clefs : Machine-outil, architecture, conception, analyse préliminaire**

# 1 Introduction

Les exigences sur les machines-outils pour l'usinage de matériaux durs et ayant un espace de travail supérieure ou égal à 1m<sup>3</sup> ont augmenté durant ces dernières années du fait du développement de l'usinage des pièces aéronautiques de grandes dimensions[1]. Afin de répondre aux exigences de conception aéronautique en termes de légèreté, de hautes propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion, les concepteurs optent généralement pour les alliages du titane pour les pièces de structure[2].

Les premiers constats sur l'usinage du titane permettent d'identifier les caractéristiques suivantes : des vitesses de coupe faibles, des forces de coupe importantes et des durées de vie d'outils réduites [3]. De fortes actions mécaniques couplées à des faibles fréquences de rotation de la broche peuvent exciter les modes vibratoires de la structure de la machine. Une machine-outil est un système mécatronique [4] couplant une commande numérique pilotant les axes motorisés et une architecture mécanique permettant la transmission du mouvement à l'outil [5] La trajectoire suivie par l'outil est fonction du comportement mécanique de la structure de la machine-outil. Ainsi, en fonction du type d'opération d'usinage à réaliser et du matériau de la pièce, une architecture cinématique de machine-outil peut être plus pertinente qu'une autre [6].

La conception conventionnelle des machines-outils dans l'industrie compte sur l'intuition et l'expérience du concepteur pour le choix d'une architecture. Cependant l'intuition et l'expérience ne garantissent pas que le choix effectué soit optimal [7]. Vu l'absence de méthodologies et d'algorithmes de choix d'architectures de machines-outils, le développement de nouvelles machines-outils se base généralement sur certaines structures déjà commercialisées et exploités par les industries.

Toutefois, dans le cas de machines-outils 5 axes sérielles, nous comptons 2160 architectures théoriquement possibles [8]. La sélection des architectures potentiellement optimales d'une machine-outil en fonction des opérations d'usinage à réaliser est une étape cruciale pour la préparation de la conception. En effet l'architecture cinématique d'une machine est un facteur déterminant pour ses caractéristiques techniques en particulier sa rigidité, sa précision, et son comportement dynamique.

L'analyse des performances et du comportement d'une structure de machine-outil est souvent réalisée expérimentalement sur un prototype réel. Récemment et avec le développement des outils de simulations virtuelles, l'analyse des performances est réalisé par la méthode des éléments finis ou par un modèle multi-corps[9]. Bien que l'analyse virtuelle soit bénéfique en termes de temps et de coût, elle reste encore couteuse et long à mettre en œuvre vu qu'il n'intervient qu'en phase de validation finale d'une machine outils conçue.

Afin de comparer les machines-outils, des études se basaient sur certaines caractéristiques structurales. Comme la typologie de la structure ouverte « C » ou bien fermé « O » et le type de la chaîne cinématique : sériel, parallèle et hybride[10]. Cependant la détermination d'une sélection de machines-outils optimales devrait s'appuyer sur des indicateurs de la performance et du comportement de la machine lors de l'usinage.

Dans cet article, nous proposons une méthode de classification des architectures de machines-outils 5 axes sérielles en phase de préconception. Cette méthode permet de sélectionner des architectures optimales en se basant sur une description de la chaîne structurale des architectures et de critères de sélection.

La méthode consiste à déterminer dans un premier temps l'ensemble des solutions cinématiquement possible en fonction du nombre d'axes souhaités. En fonction du type d'opération d'usinage à réaliser, des critères de sélection sont définis. Ces critères permettent de classer ces solutions et d'en extraire les architectures optimales. Cette sélection réduit le nombre d'architectures étudiées avec des outils de simulation mécanique. Dans la suite de cet article, nous commençons par détailler le

formalisme employé pour décrire l'ensemble des architectures de machines-outils à 5 axes avant de définir les critères de sélection. Finalement, nous présentons les architectures sélectionnées après cette phase de préconception.

## 2 Génération de toutes les architectures de machines-outils 5 axes sérielles

Pour éviter d'avoir des solutions symétriques et pour unifier la lecture des codes d'architectures nous utilisons une convention. En effet la lecture du code devrait être faite obligatoirement de la gauche à droite. Ce sens de parcours correspond au parcours de la machine de la pièce passant par la table, le bâti, la plateforme, et la broche arrivant à l'outil. Ensuite le premier terme du code correspond à l'axe le plus proche de la pièce s'il existe sinon le code débutera par le bâti « O ». La position du bâti « Po » dans le code de l'architecture peut être déterminée en connaissant le nombre d'axes mobiles attribué à la table « Nt »  $Po = Nt + 1$ . Par exemple l'architecture de la machine dans la Figure 1 est (C,Y,O,X,Z,B) étant donné que la table est mobile par 2 axes « Y et C » la position du bâti dans le code de l'architecture est  $Po = 2 + 1 = 3$ .

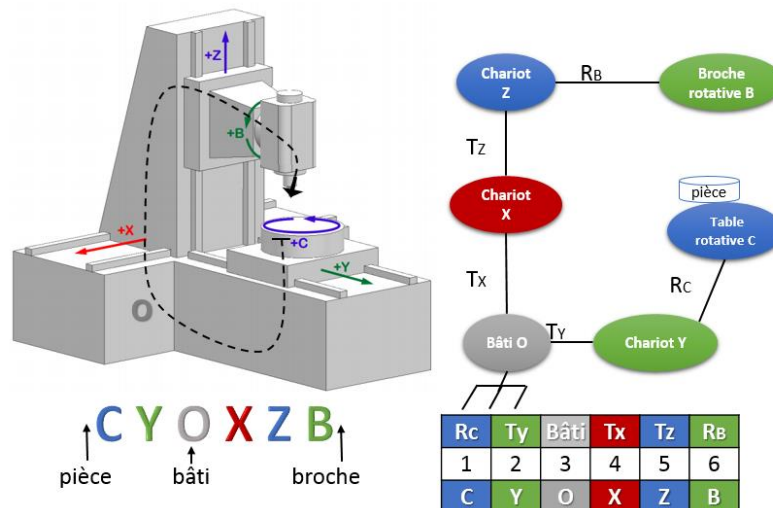


Figure 1: Exemple type d'une machine-outil 5 axes et son graphe de liaison

Dans notre méthodologie, chaque architecture est représentée par un code à 6 composantes décrivant l'agencement des axes de translation et de rotation de part et d'autre du bâti. X, Y et Z sont les termes qui désignent les 3 axes de translation, A, B et C les 3 axes de rotation respectivement autour de « X, Y, Z » et « O » représente le bâti [8]. Une architecture sérielle de machine-outil 5 axes est décrite par 3 axes de translation, 2 axes de rotation et le bâti. Le nombre totale des solutions possibles est obtenu par le calcul du nombre de permutation possible de 6 caractères « 6 ! » multiplié par le nombre de couples possibles d'axes de rotation  $C_2^3$ , donc  $N = 6! \times C_2^3 = 720 \times 3 = 2160$ .

Il est évident que ces 2160 possibilités d'architectures ne sont pas toutes adaptées aux opérations d'usinages du titane envisagés. Ainsi, il faut trier ses architectures par des critères qualitatifs traduisant les performances de ces architectures pour les spécificités de l'usinage du titane.

### 3 Critères d'évaluation des architectures des MO à 5 axes pour l'usinage du titane

Pour simplifier l'opération de sélection des architectures des machines-outils 5 axes pour l'usinage du titane, nous traduisons chaque contrainte par un ensemble de codes génériques. Lors de la phase de vérification nous regardons si la solution étudiée peut appartenir à l'un des codes génériques ou non. Lorsqu'une architecture à évaluer satisfait le critère un point lui est attribué.

#### 3.1 Première contrainte : précision géométrique de la machine

L'objectif de cette contrainte est de garantir l'indépendance des mouvements des axes vis-à-vis du mouvement de la pièce par rapport à la broche. Pour se faire, l'architecture satisfaisant cette contrainte devrait ne pas comporter un axe de rotation placé entre deux axes de translation et inversement [11], [8]. D'autres parts, des contraintes de conception nous obligent à placer les axes de rotation soit au début soit à la fin du code de description de l'architecture. [11]

3 types d'architectures de machines-outils 5 axes peuvent satisfaire cette contrainte. Les architectures tolérées sont soit à broche bi-rotative, soit à table bi-rotative soit une solution hybride ( la table et la broche sont équipées chacune d'un axe rotatif) [8], [11], [12].

En codant cette contrainte, nous obtenons l'ensemble **C1** des architectures génériques vérifiant cette contrainte :

$$\begin{aligned} \mathbf{C1} = & (O, T, T, T, R, R) \cup (R, O, T, T, T, R) \cup (R, R, O, T, T, T) \cup (R, R, T, O, T, T) \\ & \cup (R, R, T, T, O, T) \cup (R, R, T, T, T, O) \cup (R, T, O, T, T, R) \cup (R, T, T, O, T, R) \\ & \cup (R, T, T, T, O, R) \cup (T, O, T, T, R, R) \cup (T, T, O, T, R, R) \cup (T, T, T, O, R, R) \end{aligned} \quad (1)$$

Avec « R » représente un axe de rotation, « T » modélise un axe de translation et « O » le bâti. Et chaque code générique représente un ensemble de codes d'architectures, par exemple :

$$\begin{aligned} (O, T, T, T, R, R) = & \{(O, X, Y, Z, A, B), (O, X, Y, Z, B, A), (O, X, Y, Z, A, C), (O, X, Y, Z, C, A) \\ & , (O, X, Y, Z, B, C), (O, X, Y, Z, C, B), (O, Y, X, Z, A, B), (O, Y, X, Z, B, A) \\ & , (O, Y, X, Z, A, C), (O, Y, X, Z, C, A), (O, Y, X, Z, B, C), (O, Y, X, Z, C, B) \\ & , (O, Y, Z, X, A, B), (O, Y, Z, X, B, A), (O, Y, Z, X, A, C), (O, Y, Z, X, C, A) \\ & , (O, Y, Z, X, B, C), (O, Y, Z, X, C, B), (O, Z, Y, X, A, B), (O, Z, Y, X, B, A) \\ & , (O, Z, Y, X, A, C), (O, Z, Y, X, C, A), (O, Z, Y, X, B, C), (O, Z, Y, X, C, B) \\ & , (O, Z, X, Y, A, B), (O, Z, X, Y, B, A), (O, Z, X, Y, A, C), (O, Z, X, Y, C, A) \\ & , (O, Z, X, Y, B, C), (O, Z, X, Y, C, B), (O, X, Z, Y, A, B), (O, X, Z, Y, B, A) \\ & , (O, X, Z, Y, A, C), (O, X, Z, Y, C, A), (O, X, Z, Y, B, C), (O, X, Z, Y, C, B)\} \end{aligned} \quad (2)$$

Le score de la solution proposée dans la figure 1 devient 1/5 vu que cette solution vérifie cette contrainte  $(C, Y, O, X, Z, B) \in (R, T, O, T, T, R) \subset \mathbf{C1}$ .

### 3.2 Deuxième contrainte : dextérité de la machine

Cette contrainte ne s'applique que sur les architectures des machines-outils 5 axes dont leurs axes de rotation sont soit « A » et « C » soit « B » et « C ». En effet pour assurer des tâches d'usinages 5 axes continus, il ne peut pas y avoir un axe de rotation suivant l'axe de la broche[8]. Cette propriété peut se traduire par la contrainte suivante : l'axe « C » doit être placé à gauche des autres axes de rotation dans notre formalisme. Ainsi, l'axe « C » doit être le premier axe de rotation à apparaître dans le vecteur de description.

L'ensemble des architectures génériques vérifiant cette contrainte **C2** s'écrit ainsi :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{C2} = \{ & (C, O, R, T, T, T) \cup (C, O, T, R, T, T) \cup (C, O, T, T, R, T) \cup (C, O, T, T, T, R) \\
 & \cup (C, R, O, T, T, T) \cup (C, R, T, O, T, T) \cup (C, R, T, T, O, T) \cup (C, R, T, T, T, O) \\
 & \cup (C, T, O, R, T, T) \cup (C, T, O, T, R, T) \cup (C, T, O, T, T, R) \cup (C, T, R, O, T, T) \\
 & \cup (C, T, R, T, O, T) \cup (C, T, R, T, T, O) \cup (C, T, T, O, R, T) \cup (C, T, T, O, T, R) \\
 & \cup (C, T, T, R, O, T) \cup (C, T, T, R, T, O) \cup (C, T, T, T, O, R) \cup (C, T, T, T, R, O) \\
 & \cup (O, C, R, T, T, T) \cup (O, C, T, R, T, T) \cup (O, C, T, T, R, T) \cup (O, C, T, T, T, R) \\
 & \cup (O, T, C, R, T, T) \cup (O, T, C, T, R, T) \cup (O, T, C, T, T, R) \cup (O, T, T, C, R, T) \\
 & \cup (O, T, T, C, T, R) \cup (O, T, T, T, C, R) \cup (T, C, O, R, T, T) \cup (T, C, O, T, R, T) \\
 & \cup (T, C, O, T, T, R) \cup (T, C, R, O, T, T) \cup (T, C, R, T, O, T) \cup (T, C, R, T, T, O) \\
 & \cup (T, C, T, O, R, T) \cup (T, C, T, O, T, R) \cup (T, C, T, R, O, T) \cup (T, C, T, R, T, O) \\
 & \cup (T, C, T, T, O, R) \cup (T, C, T, T, R, O) \cup (T, O, C, R, T, T) \cup (T, O, C, T, R, T) \\
 & \cup (T, O, C, T, T, R) \cup (T, O, T, C, R, T) \cup (T, O, T, C, T, R) \cup (T, O, T, T, C, R) \\
 & \cup (T, T, C, O, R, T) \cup (T, T, C, O, T, R) \cup (T, T, C, R, O, T) \cup (T, T, C, R, T, O) \\
 & \cup (T, T, C, T, O, R) \cup (T, T, C, T, R, O) \cup (T, T, O, C, R, T) \cup (T, T, O, C, T, R) \\
 & \cup (T, T, O, T, C, R) \cup (T, T, T, C, O, R) \cup (T, T, T, C, R, O) \cup (T, T, T, O, C, R) \}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Avec « R » représente un axe de rotation, « T » modélise un axe de translation et « O » le bâti. Et chaque code générique représente un ensemble de codes d'architectures, par exemple :

$$\begin{aligned}
 (C, O, R, T, T, T) = \{ & (C, O, A, X, Y, Z), (C, O, B, X, Y, Z), (C, O, A, Y, X, Z), (C, O, B, Y, X, Z) \\
 & , (C, O, A, Y, Z, X), (C, O, B, Y, Z, X), (C, O, A, Z, Y, X), (C, O, B, Z, Y, X) \\
 & , (C, O, A, Z, X, Y), (C, O, B, Z, X, Y), (C, O, A, X, Z, Y), (C, O, B, X, Z, Y) \}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Le score de la solution proposée dans la figure 1 devient 2/5. La solution proposée vu que cette solution vérifie cette contrainte.  $(C, Y, O, X, Z, B) \in (C, T, O, T, T, R) \subset \mathbf{C2}$ .

### 3.3 Troisième contrainte : Masses mobiles de la machine

Dans cette contrainte nous nous intéressons aux positions des axes de translation régissant les plus grands déplacements dans la machine. En effet pour limiter l'impact des grands déplacements de la structure de la machine sur son comportement dynamique, il est judicieux de placer ces deux axes de translations de part et d'autre du bâti [7].

Dans la majorité des cas les deux axes de translation assurant les déplacements les plus importants sont l'axe « X » et « Y ». De ce fait les architectures vérifiant cette contrainte dispose obligatoirement de l'une des deux séquences suivantes « X,O,Y » ou « Y,O,X ».

L'ensemble **C3** regroupant les solutions génériques d'architectures vérifiant cette contrainte est le suivant :

$$\begin{aligned} \mathbf{C3} = & \{(R, R, X, O, Y, Z) \cup (R, R, Y, O, X, Z) \cup (R, R, Z, X, O, Y) \cup (R, R, Z, Y, O, X) \\ & \cup (R, X, O, Y, R, Z) \cup (R, X, O, Y, Z, R) \cup (R, Y, O, X, R, Z) \cup (R, Y, O, X, Z, R) \\ & \cup (R, Z, R, X, O, Y) \cup (R, Z, R, Y, O, X) \cup (R, Z, X, O, Y, R) \cup (R, Z, Y, O, X, R) \\ & \cup (X, O, Y, R, R, Z) \cup (X, O, Y, R, Z, R) \cup (X, O, Y, Z, R, R) \cup (Y, O, X, R, R, Z) \\ & \cup (Z, R, X, O, Y, R) \cup (Z, R, Y, O, X, R) \cup (Z, X, O, Y, R, R) \cup (Z, Y, O, X, R, R)\} \end{aligned} \quad (5)$$

Avec « R » représente un axe de rotation et « O » le bâti. Et chaque code générique représente un ensemble de codes d'architectures, par exemple :

$$\begin{aligned} (R, R, X, O, Y, Z) = & \{(A, B, X, O, Y, Z), (B, A, X, O, Y, Z), (A, C, X, O, Y, Z) \\ & , (C, A, X, O, Y, Z), (B, C, X, O, Y, Z), (C, B, X, O, Y, Z)\} \end{aligned} \quad (6)$$

Le score de la solution proposée dans la figure 1 devient 3/5. La solution vérifie cette contrainte vu que  $(C, Y, O, X, Z, B) \in (R, T, O, T, T, R) \subset \mathbf{C3}$ .

### 3.4 Quatrième contrainte : accessibilité à l'espace de travail

L'utilisation de machines-outils à tête d'usinage immobile n'est pas privilégiée dans le cas de l'usinage de pièces aéronautique de grandes dimensions. En effet, les contraintes d'accessibilité et de masse en mouvement amènent à privilégier les machines dont la table est fixe dans la cas de pièces de grandes dimensions[7]. Dans notre cas d'étude, nous souhaitons dédier la machine à des pièces de dimensions moyennes. Ce besoin s'exprime alors par un compromis à déterminer entre l'orientation de la broche et de la table. Ainsi, les machines, dont la tête et la table sont actionnées, sont les plus adaptée à notre besoin.

Pour exprimer cette contrainte, nous nous focalisons sur l'emplacement du bâti dans le vecteur de description de l'architecture. Ainsi, cette contrainte tend à privilégier les architectures amenant à proposer des mouvements à la fois de la table et de la broche.

L'ensemble **C4** regroupant les architectures génériques vérifiant cette contrainte est le suivant :

$$\mathbf{C4} = \{(I, I, I, I, O, I) \cup (I, I, I, O, I, I) \cup (I, I, O, I, I, I) \cup (I, O, I, I, I, I)\} \quad (7)$$

Avec « O » représente le bâti et « I » représente n'importe quels axes. Et chaque code générique de cet ensemble représente lui-même un ensemble de codes génériques, par exemple :

$$\begin{aligned} (I, I, I, I, O, I) = & \{(R, R, T, T, O, T) \cup (T, R, R, T, O, T) \cup (T, T, R, R, O, T) \\ & \cup (R, T, R, T, O, T) \cup (R, T, T, R, O, T) \cup (R, T, T, T, O, R) \\ & \cup (T, R, T, T, O, R) \cup (T, T, R, T, O, R) \cup (T, T, T, R, O, R)\} \end{aligned} \quad (8)$$

Avec « R » représente un axe de rotation, « T » modélise un axe de translation et « O » le bâti. Et chaque code générique représente un ensemble de codes d'architectures, par exemple :

$$\begin{aligned}
(R, R, T, T, O, T) = \{ & (A, B, X, Y, Z), (A, B, Y, X, Z), (A, B, Y, Z, X), (A, B, Z, Y, X) \\
& , (A, B, Z, X, Y), (A, B, X, Z, Y), (B, A, X, Y, Z), (B, A, Y, X, Z) \\
& , (B, A, Y, Z, X), (B, A, Z, Y, X), (B, A, Z, X, Y), (B, A, X, Z, Y) \\
& , (C, A, X, Y, Z), (C, A, Y, X, Z), (C, A, Y, Z, X), (C, A, Z, Y, X) \\
& , (C, A, Z, X, Y), (C, A, X, Z, Y), (A, C, X, Y, Z), (A, C, Y, X, Z) \\
& , (A, C, Y, Z, X), (A, C, Z, Y, X), (A, C, Z, X, Y), (A, C, X, Z, Y) \\
& , (B, C, X, Y, Z), (B, C, Y, X, Z), (B, C, Y, Z, X), (B, C, Z, Y, X) \\
& , (B, C, Z, X, Y), (B, C, X, Z, Y), (C, B, X, Y, Z), (C, B, Y, X, Z) \\
& , (C, B, Y, Z, X), (C, B, Z, Y, X), (C, B, Z, X, Y), (C, B, X, Z, Y) \}
\end{aligned} \tag{9}$$

Le score de la solution proposée dans la figure 1 devient 4/5. En effet son architecture vérifie cette contrainte vu que  $(C, Y, O, X, Z, B) \in (R, T, O, T, T, R) \subset (I, I, O, I, I, I) \subset \mathbf{C4}$

### 3.5 Cinquième contrainte : répartition de la masse de la structure

L'arrangement des axes de part et d'autre du bâti permet d'optimiser le comportement dynamique de la structure et de réduire les sollicitations générées lors des mouvements [13]. Pour cela le bâti « O » doit être placé au milieu de l'architecture. L'ensemble **C5** des architectures génériques vérifiant ce critère est le suivant :

$$\mathbf{C5} = \{(I, I, I, O, I, I) \cup (I, I, O, I, I, I)\} \tag{10}$$

Avec « O » représente le bâti et « I » représente n'importe quels axes. Et chaque code générique de cet ensemble représente lui-même un ensemble de codes génériques, par exemple :

$$\begin{aligned}
(I, I, I, O, I, I) = \{ & (R, R, T, O, T, T) \cup (R, T, R, O, T, T) \cup (R, T, T, O, R, T) \\
& \cup (R, T, T, O, T, R) \cup (T, R, R, O, T, T) \cup (T, R, T, O, R, T) \\
& \cup (T, R, T, O, T, R) \cup (T, T, R, O, R, T) \cup (T, T, R, O, T, R) \\
& \cup (T, T, T, O, R, R) \}
\end{aligned} \tag{11}$$

Avec « R » représente un axe de rotation, « T » modélise un axe de translation et « O » le bâti. Et chaque code générique représente un ensemble de codes d'architectures, par exemple :

$$\begin{aligned}
(R, R, T, O, T, T) = \{ & (A, B, X, O, Y, Z), (A, B, Y, O, X, Z), (A, B, Y, O, Z, X), (A, B, Z, O, Y, X) \\
& , (A, B, Z, O, X, Y), (A, B, X, O, Z, Y), (B, A, X, O, Y, Z), (B, A, Y, O, X, Z) \\
& , (B, A, Y, O, Z, X), (B, A, Z, O, Y, X), (B, A, Z, O, X, Y), (B, A, X, O, Z, Y) \\
& , (A, C, X, O, Y, Z), (A, C, Y, O, X, Z), (A, C, Y, O, Z, X), (A, C, Z, O, Y, X) \\
& , (A, C, Z, O, X, Y), (A, C, X, O, Z, Y), (C, A, X, O, Y, Z), (C, A, Y, O, X, Z) \\
& , (C, A, Y, O, Z, X), (C, A, Z, O, Y, X), (C, A, Z, O, X, Y), (C, A, X, O, Z, Y) \\
& , (B, C, X, O, Y, Z), (B, C, Y, O, X, Z), (B, C, Y, O, Z, X), (B, C, Z, O, Y, X) \\
& , (B, C, Z, O, X, Y), (B, C, T, O, T, T), (C, B, X, O, Y, Z), (C, B, Y, O, X, Z) \\
& , (C, B, Y, O, Z, X), (C, B, Z, O, Y, X), (C, B, Z, O, X, Y), (C, B, X, O, Z, Y) \}
\end{aligned} \tag{12}$$

Le score de la solution proposée dans la figure 1 devient 4/5. En effet son architecture vérifie cette contrainte vu que  $(C, Y, O, X, Z, B) \in (R, T, O, T, T, R) \subset (I, I, O, I, I, I) \subset \mathbf{C5}$ .

### 3.6 Vérification de la discrimination des contraintes

Avant d'entamer la classification des architectures nous avons étudié la distance entre les contraintes en évaluant le nombre de solution vérifiant chaque couple de contraintes. Le tableau 1 présente le nombre de solutions communes entre chaque contrainte de sélection.

	contrainte 1	contrainte 2	contrainte 3	contrainte 4	contrainte 5
contrainte 1	432	144	72	360	216
contrainte 2		720	48	480	240
contrainte 3			144	144	72
contrainte 4				1440	720
contrainte 5					720

Tableau 1: Nombre de solutions communes entre les contraintes

L'analyse du tableau montre que les contraintes proposées ne favorisent pas toujours les mêmes architectures de machines-outils.

Toutefois, nous pouvons voir dans le tableau 1 que l'ensemble des architectures satisfaisant la contrainte 3 répondent aussi à la contrainte 4. Toutefois, ces deux contraintes rendent compte de deux comportements distincts. En effet la troisième s'intéresse aux positions des axes de translation « X » et « Y » et la quatrième s'intéresse à la position du bâti « O ».

De même toutes les solutions vérifiant la contrainte 5, vérifient aussi la contrainte 4. Cependant les deux contraintes privilégient deux comportements différents, l'une l'amélioration de l'accessibilité et l'autre la répartition de la masse des parties mobiles de part et d'autres du bâti.

Une fois les contraintes établies, l'ensemble des solutions de machines-outils sont évalués et notés.

## 4 Calcul du score de chaque architecture

L'implémentation de plusieurs fonctions Matlab, nous a permis de de générer l'ensemble des codes de description d'architecture de machines-outils 5 axes et de calculer le score de chacune en fonction des contraintes listées précédemment.

### 4.1 Calcul du score de chaque architecture

Une contrainte est vérifiée si l'architecture en question est en accord avec une architecture générique de l'un des ensembles **C1, C2, C3, C4 et C5**. A chaque fois qu'une solution valide une des cinq contraintes un point lui est attribué.

Toutefois, la contrainte 2 n'est applicable qu'aux architectures présentant un axe de rotation « C ». Un point est alors attribué à toutes les architectures permettant de ne pas mettre en rotation la broche suivant l'axe de l'outil.



## 4.2 Sélection des architectures optimales

Le résultat du calcul fait avec Matlab a permis d'obtenir la classification suivante des architectures :

	score 0/5	score 1/5	score 2/5	Score 3/5	score 4/5	score 5/5
<b>Nombre d'architecture</b>	216/2160	632/2160	616/2160	504/2160	160/2160	32/2160
<b>Pourcentage</b>	10,0	29,3	28,5	23,3	7,4	1,5

Tableau 2: Classification des architectures selon leurs scores

Afin de donner ample informations sur le nombre de solutions vérifiant les cinq contraintes nous fournissons le tableau 3 ci-dessous :

Contrainte 1	Contrainte 2	Contrainte 3	Contrainte 4	Contrainte 5	Score	Solutions	%
0	0	0	0	0	0	216	10,0
1	0	0	0	0	1	24	1,1
0	1	0	0	0		432	20,0
0	0	1	0	0		0	0,0
0	0	0	1	0		176	8,1
0	0	0	0	1		0	0,0
1	1	0	0	0	2	48	2,2
1	0	1	0	0		0	0,0
1	0	0	1	0		40	1,9
1	0	0	0	1		0	0,0
0	1	1	0	0		0	0,0
0	1	0	1	0		352	16,3
0	1	0	0	1		0	0,0
0	0	1	1	0		16	0,7
0	0	1	0	1		0	0,0
0	0	0	1	1		160	7,4
1	1	1	0	0	3	0	0,0
1	1	0	1	0		80	3,7
1	1	0	0	1		0	0,0
1	0	1	1	0		8	0,4
1	0	1	0	1		0	0,0
1	0	0	1	1		56	2,6
0	1	1	1	0		32	1,5
0	1	1	0	1		0	0,0
0	1	0	1	1		320	14,8
0	0	1	1	1		8	0,4
1	1	1	1	0	4	16	0,7
1	1	1	0	1		0	0,0
1	1	0	1	1		112	5,2
1	0	1	1	1		16	0,7
0	1	1	1	1		16	0,7
1	1	1	1	1	5	32	1,5
					<b>Total</b>	2160	100,0

Tableau 3 : analyse des contraintes vérifiées par les 2160 solutions

Le premier constat que nous dégageons du tableau 2 est que 32 solutions ont obtenus un score de 5/5. Ces 32 architectures représentent seulement 1,5% des architectures possibles. Ainsi, à l'aide de la méthodologie mise en place, 98% des architectures de machines-outils 5 axes possibles sont écartés. Il ne reste plus que 32 architectures pour lesquelles des investigations plus poussées doivent être menées.

Les 32 architectures optimales peuvent être classées en 3 types : machine à table tournante, machine hybride et machines à broche rotative. Ces architectures sont classées dans le tableau 4.

En prenant l'hypothèse que l'axe « A » « B » assurent la même accessibilité à la pièce, nous pouvons réduire de moitié le nombre d'architectures à analyser ultérieurement. Les architectures restant après cette hypothèse sont classées dans le tableau 5.

En prenant une deuxième hypothèse que tous les axes rotatifs amènent à un comportement équivalent en rigidité et accessibilité soit directement soit par symétrie, nous pouvons réduire encore de moitié le nombre de structures à analyser. Les différentes structures qui restent avec cette hypothèse sont classées dans le tableau 6.

Table bi-rotative	Hybride	Broche bi-rotative
$(C,B,Y,O,X,Z)$	$(C,Z,Y,O,X,B)$	$(Z,Y,O,X,C,B)$
$(C,B,X,O,Y,Z)$	$(C,Z,X,O,Y,B)$	$(Z,X,O,Y,C,B)$
$(C,A,Y,O,X,Z)$	$(C,Y,O,X,Z,B)$	$(Z,Y,O,X,C,A)$
$(C,A,X,O,Y,Z)$	$(C,X,O,Y,Z,B)$	$(Z,X,O,Y,C,A)$
$(B,A,Y,O,X,Z)$	$(A,Z,Y,O,X,B)$	$(Z,Y,O,X,B,A)$
$(B,A,X,O,Y,Z)$	$(A,Z,X,O,Y,B)$	$(Z,X,O,Y,B,A)$
$(A,B,Y,O,X,Z)$	$(A,Y,O,X,Z,B)$	$(Z,X,O,Y,A,B)$
$(A,B,X,O,Y,Z)$	$(A,X,O,Y,Z,B)$	$(Z,Y,O,X,A,B)$
	$(B,Y,O,X,Z,A)$	
	$(B,X,O,Y,Z,A)$	
	$(B,Z,X,O,Y,A)$	
	$(B,Z,Y,O,X,A)$	
	$(C,Y,O,X,Z,A)$	
	$(C,X,O,Y,Z,A)$	
	$(C,Z,Y,O,X,A)$	
	$(C,Z,X,O,Y,A)$	

Tableau 4: Architectures optimales de machines-outils 5 axes sérielles pour l'usinage du titane

Table bi-rotative	Hybride	Broche bi-rotative
$(C,B,Y,O,X,Z)$	$(C,Z,Y,O,X,B)$	$(Z,Y,O,X,C,B)$
$(C,B,X,O,Y,Z)$	$(C,Z,X,O,Y,B)$	$(Z,X,O,Y,C,B)$
$(B,A,Y,O,X,Z)$	$(C,Y,O,X,Z,B)$	$(Z,Y,O,X,B,A)$
$(B,A,X,O,Y,Z)$	$(C,X,O,Y,Z,B)$	$(Z,X,O,Y,B,A)$
	$(A,Z,Y,O,X,B)$	
	$(A,Z,X,O,Y,B)$	
	$(A,Y,O,X,Z,B)$	
	$(A,X,O,Y,Z,B)$	

Tableau 5 : sélection d'architectures optimales réduit par la première hypothèse

Table bi-rotative	Hybride	Broche bi-rotative
$(R,R,Y,O,X,Z)$	$(R,Z,Y,O,X,R)$	$(Z,Y,O,X,R,R)$
$(R,R,X,O,Y,Z)$	$(R,Z,X,O,Y,R)$	$(Z,X,O,Y,R,R)$
	$(R,X,O,Y,Z,R)$	
	$(R,Y,O,X,Z,R)$	

Tableau 6 : structures de machines-outils optimales réduit par la première et la deuxième hypothèse

## Conclusion & Perspectives

Nous avons développé une méthodologie rationnelle de sélection d'architectures de machine-outil 5 axes pour l'usinage de pièces de moyenne dimension en titane. Cette méthodologie permet de dégager rapidement une sélection d'architectures pertinentes. En effet, parmi 2160 nous dégageons 32 architectures de machine-outil adaptées à l'usinage exigeant du titane, ce qui se traduit par un gain important en temps d'analyse lors des études approfondies. Dans la figure 2 nous avons voulu illustrer ce gain de temps par rapport à la conception conventionnelle, pour cela le schéma réalisé dans les travaux d'Altintas a été complété.

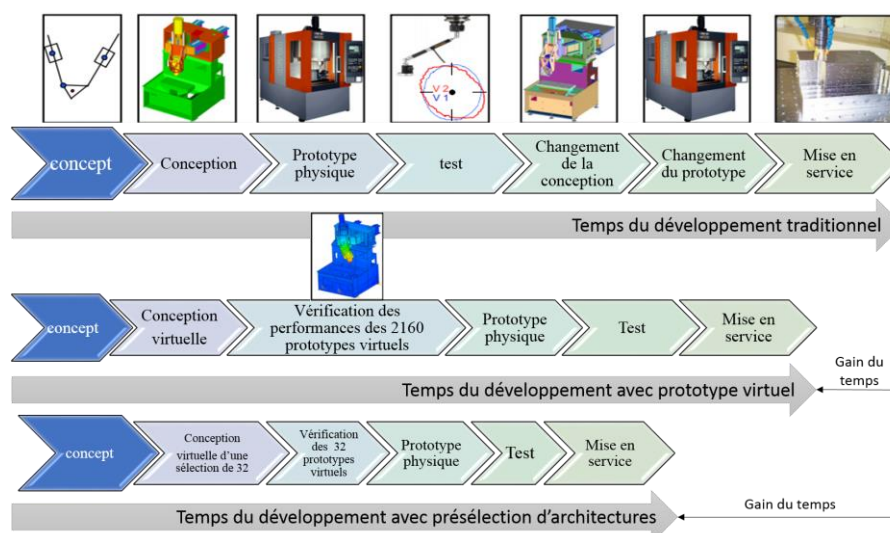


Figure 2 : comparaison de la conception traditionnelle et la conception avec la nouvelle méthodologie [9]

Après l'élaboration de cette méthodologie de sélection d'architectures de machines-outils, nous allons nous intéresser aux étapes permettant de réaliser une analyse approfondie du comportement mécanique de chaque architecture sélectionnée. Cette analyse approfondie va nous permettre d'évaluer le comportement statique et dynamique de chaque modèle d'architecture. Cet algorithme devrait être le plus générique possible.

## Remerciement

Ces travaux de thèse appartiennent au projet MMaSyF (2015-2020) financé par le CPER Région Auvergne pour la conception et la réalisation d'une machine d'usinage à haute rigidité. Ces travaux sont cofinancés par l'Union Européenne. L'Europe s'engage en auvergne avec le fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

## Références

- [1] P. Kolar, M. Sulitka, and J. Šindler, “Development methods for high performance machine tools,” 2014.
- [2] V. WAGNER, “Amélioration de la productivité en usinage d’un titane réfractaire : le Ti5553,” 2011.
- [3] K. MOUSSAOUI, “Influence de l’usinage sur la durée de vie en fatigue de pièces aéronautiques en alliage de titane,” Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2013.
- [4] C. et coll Tournier, *USINAGE A GRANDE VITESSE Technologies, Modélisations, Trajectoires*. Cachan, 2010.
- [5] B. Ye, W. Xiao, K. Mao, and B. Li, “Hybrid analytic-experimental modeling for machine tool structural dynamics,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016.
- [6] S. PATELOUP, “Modélisations et aptitudes à l’emploi des machines-outils à structure parallèle : vers une optimisation dirigée du processus,” pp. 1–204, 2011.
- [7] U. Heisel, S. Pasternak, M. Storchak, and O. Solopova, “Optimal configurations of the machine tool structure by means of neural networks,” *Prod. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 219–226, 2011.
- [8] F.-C. Chen, “On the structural configuration synthesis and geometry of machining centres,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 215, no. 6, pp. 641–652, 2001.
- [9] Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, and S. Witt, “Virtual Machine Tool,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 115–138, 2005.
- [10] L. . López de Lacalle and A. Lamikiz, *Machine Tools for High Performance Machining*. 2009.
- [11] O. R. Tutunea-Fatan and H. Y. Feng, “Configuration analysis of five-axis machine tools using a generic kinematic model,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 11, pp. 1235–1243, 2004.
- [12] E. L. J. Bohez, “Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 4, pp. 505–520, 2002.
- [13] S. Grzegorz, J. Daniel, P. Piotr, and M. Pawel, “The Selection of Milling Machine Geometric-Kinematic Structure-Preliminary Selection of Structure Variants,” *Arch. Mech. Technol. Autom.*, vol. 32, no. 1, pp. 65–76, 2012.