

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique

UNIVERSITE MOHAMMED KHEIDER BISKRA

**FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

Magistère

Spécialité : **Construction Mécanique**

Présentée par :

MAALIM MADANI

THEME

**UTILISATION DE L'OUTIL CAO POUR LA
CONCEPTION D'UNE MACHINE - OUTIL**

jury

Président :	Dr Rachid ATMANI	(M.C) Université de Biskra
Rapporteur :	Dr Mekki ASSAS	(M.C) Université de Batna
Examineurs :	Dr Hammoudi MAZOUZ	(M.C) Université de Batna
	Dr Belkacem BARKAT	(M.C) Université de Batna
	Dr Rabeh MANAA	(C.C) Université de Batna

Remerciements

Je tiens à remercier monsieur Rachid ATHMANI Maître de conférence à l'université de Biskra pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance et pour la confiance qu'il a accordée à mon travail.

Je remercie vivement monsieur Belkacem BARKAT, Maître de conférence à l'université de Batna, pour m'avoir accueilli au sein du Laboratoire de recherche qui est équipé d'une bibliothèque riche et pleine d'articles et thèmes de recherche mise à ma disposition et m'avoir ainsi donné les moyens de mener à bien ce travail de recherche ; veuillez accepter toute ma reconnaissance.

Je remercie aussi tout particulièrement messieurs Hammoudi MAZOUZ Maître de conférence à l'université de Batna et Rabeh MANAA chargé de cours à l'université de Batna, ils ont pris le temps de lire ce document et de me donner leurs commentaires qui ont été très importants pour sa qualité finale.

Mes sincères remerciements vont à monsieur Mekki ASSAS, Maître de conférence à l'université de Batna, en tant que directeur de thèse, vous avez accueilli et suivi avec intérêt mon sujet de recherche ; pour votre disponibilité, votre ouverture d'esprit, vos critiques constructives et vos suggestions clairvoyantes ; je suis heureux de l'opportunité qui m'est donnée de vous témoigner ma reconnaissance pour cet enseignement tout au long de cette thèse.

Enfin, que toute ma famille, trouve ici le témoignage de ma reconnaissance pour leurs encouragements et leur soutien.

Madani MAALIM

SOMMAIRE

CHAPITRE I: Etude générale sur les centres d'usinage

I.1 Introduction	6
I.2. Définitions	6
I.3. Etude organique d'une machine-outil à commande numérique	7
I.3.1. Le bâti	8
I.3.2. Les axes de déplacement	9
I.3.3. La broche	10
I.3.4. Le directeur de commande numérique, architecture fonctionnelle	11
I.3.5. Les porte-outils	12
I.4. Etude morphologique d'une machine-outil à commande numérique	13
I. 4.1. Définition normalisée des axes numériques d'une MOCN	13
I. 4.2. Typologie des machines-outils à commande numérique	15
I. 4.3. Classification basée sur la structure cinématique	16
I.4.4. Classification basée sur l'ordre des axes portants la pièce et l'outil	18
I.5. Choix d'une machine en fonction de l'usinage d'une pièce	21
I.5.1. Exemple de pièce prismatique multi face	23
I.5.2. Exemple de pièce de rotation de forme complexe	23
I.5.3. Exemple de pièce sphérique	24
I.6. Influence de la CN sur la morphologie des centres d'usinage	24
I.6.1. Approvisionnement en outils	24
I.6.2. Approvisionnement en pièces	27
I.7. Exemple d'un Centre d'usinage à 5 axes type W-408B	28
I.7.1. Construction	28
I.7.2. Courses et conception des axes	29
I.7.3. Glissières et asservissement des axes	29
I.7.4. magasin et changeur d'outils	30
I.7.5. Chargeur de pièces	31
I.8. Conclusion	32

CHAPITRE II. Conception Assistée par Ordinateur

II.1. Introduction	34
II.2. Le processus de conception d'un produit	35
II.2.1 Les 4 étapes du processus de conception	36
II.2.2 Les enjeux de la conception d'un produit	37
II.2.3 Le modèle géométrique, coeur des logiciels de CAO	37
II.2.4 La conception et le modèle conceptuel d'objets sous contraintes	39
II.3. Méthodes de résolution de contraintes en CAO	40
II.3.1. Les méthodes formelles	41
II.3.2. Les méthodes numériques itératives	41
II.3.3. Les méthodes numériques d'optimisation : équations, inéquations et fonction objectif	42
II.3.4. Les méthodes CSP (Constraint Satisfaction Problems) pour les GCSP (Geometric CSP) Les CSP discrets	43
II.4. Application	45
II.4.1. Introduction	45
II.4.2. Présentation de logiciel SolidWorks	45
II.4.3. Performances majeurs du SolidWorks	45
II.4.4. Intention de conception	46
II.4.5. Processus de conception appliqué	46
II.4.5.1. Esquisses	47
II.4.5.2. Cotes	49
II.4.5.3. Fonctions	49
II.4.5.4. Assemblages	51
II.4.5.5. Mises en plan	52
II.4.5.6. Familles de pièces	53
II.5. Conclusion	56

CHAPITRE III. Etude statique de la machine outil

III.1. Théorie Rigidité de la machine outil	57
III.2. Analyse algébrique	58
III.2.1. Modèle d'une broche	58
III.3. Déformation de la broche sous l'effet des forces de coupe	58
III.3.1. Flèche due a la broche elle même	58
III.3.2. Déformation de cisaillement	59
III.3.3. Flèche due aux paliers	60
III.3.4. Flèche totale au droit de l'outil	61
III.3.5. Déplacement axial de la broche	63
III.3.6. Flexion de la broche	64
III.3.7. Défaut de planéité	64
III.4. Longueur optimale d'une broche	64
III.4.1. calcul analytique des inconnues	65
III.4.1.1. Calcul des efforts de coupe appliqués a la fraise usinant une pièce en ébauche	65
III.4.1.2. Calcul des efforts de coupe appliqués a la fraise usinant une pièce en finition	66
III.4.2. calcul analytique de longueur optimale L	67
III.4.3. calcul graphique de longueur optimale L	68
III.5. Calcul de la broche par la méthode des éléments finis	69
III.5.1. Pourquoi faire des calculs?	69
III.5.2. Analyse statique	70
III.5.3. Méthode des éléments finis	70
III.5.4. Calcul des déplacements sur la broche sollicité	71
III.6. Conclusion	74
BIBLIOGRAPHIE	77

Introduction générale

De nos jours la conception assistée par ordinateur C.A.O. est devenue un outil prévéligé en engineering. Elle permet un gain considérable en temps et en coût lors de l'élaboration d'un projet de conception d'une machine.

Les centres d'usinage sont des machines-outils complètes, ce qui rend l'emploi de la C.A.O. pour leur conception d'une utilité majeure.

En plus de la conception en 3D avec animation des différents organes, des calculs performants par la méthode numérique en éléments finis peuvent être réalisés.

Ce travail tente de mettre en perspective l'utilisation de l'outil CAO dans la conception des machines outils.

Dans le premier chapitre, nous allons faire une étude bibliographique sur les centres d'usinage; et nous allons présenter les différentes architectures et configurations utilisées dans le monde des machines outils où les différentes possibilités de combinaisons des axes de la machine outil et son effet sur la classification et le choix d'une telle machine.

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à l'outil (CAO) et son utilisation pour la conception, suivi d'une application sur l'utilisation de logiciel SolidWorks pour la conception d'une machine-outil et les différentes démarches de conception.

Enfin, nous terminerons en présentant une étude statique de la machine outil et le calcul des différents éléments de la machine et en particulier la broche par la méthode des éléments finis à l'aide d'un logiciel Cosmosworks .

La machine-outil devient donc, un parfait objet d'étude dans une école d'ingénieurs.

Problématique générale

Une machine outil a pour but de réaliser physiquement les mouvements de coupe nécessaires à l'obtention d'une surface par enlèvement de matière.

Elle réalise le mouvement de coupe et le mouvement d'avance de l'outil par rapport à la pièce .

Elle doit permettre l'obtention des pièces en respectant les spécifications fonctionnelles .

De nos jours les exigences imposées en matière de performances technico-économiques des machines-outils sont de plus en plus sévères.

La machine-outil est une machine complexe qui nécessite un outil de conception performant.

Actuellement l'utilisation de la conception assistée par ordinateur permet de faciliter la tâche au concepteur vu les performances de cet outil en calculs complexes ainsi que la rapidité de calcul, la possibilité de traiter un grand nombre de données à grande vitesse, sortie graphique, interfaces vers d'autres matériels, etc....

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MACHINES-OUTILS

ET LES CENTRES D'USINAGE

I. Etude générale sur les centres d'usinage

I.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de définir et d'étudier les machines-outils. L'étude commence par l'analyse des solutions technologiques employées dans la conception des éléments clés des machines. Nous analysons les cinématiques possibles des machines de façon à montrer des moyens de sélection de machines en fonction des caractéristiques des pièces à réaliser.

En (1970) des très utiles initiations au fraisage à plusieurs axes était données par Baughman [**Baughman 70**] et par Sim [**Sim 70**] énonçant clairement les applications de fraisage à cinq axes. Les ouvrages de [**Bezier 72**] et [**Held 91**] sur le fraisage ont donné une brève définition sur l'usinage multiaxe. Un article récent [**Abdel-Malek 99**] traite le problème du calcul de volume de travail de la machine à cinq axes et l'usinage multiple en utilisant la méthode de Denavit-Hartenberg .

Plusieurs concepts et construction de machines-outils sont représentés dans les articles [**Bohez 97**] et [**Bohez 02**].

Le nombre d'installations et d'orientations optimales de la pièce sur la table de la machine est discuté dans la référence [**Chen 93**]. Un article traite le chemin d'outil est présentée par B.K. Choi et autres [**Choi 97**]. La simulation graphique de trajectoire de l'outil est également présentée par [**Grimaldi 94**].

I.2. Définitions

Une machine outil a pour but de réaliser physiquement les mouvements de coupe nécessaires à l'obtention d'une surface par enlèvement de matière. Elle réalise le mouvement de coupe et le mouvement d'avance de l'outil par rapport à la pièce.

De plus, elle doit permettre l'obtention de pièces en respectant les spécifications fonctionnelles.

Machine-outil à commande numérique (MOCN) : machine-outil programmable équipée d'une commande numérique par ordinateur (CNC) ,et assure la réalisation automatisée des pièces, les mouvements nécessaires sont décrits dans un programme.

Centre d'usinage (CU) : toute machine-outil à commande numérique équipée d'un changeur d'outil. On distingue les centres de tournage et les centres de fraisage. Souvent, par abus de langage, on appelle centre d'usinage, les centres de fraisage.

La cellule flexible d'usinage : est un centre d'usinage équipé d'un système automatique de chargement et déchargement de pièces. [NF Z 68-036].

L'axe numérique: est l'axe de déplacement pour lequel une infinité de positions peut être atteinte à la résolution de positionnement près - OU - axe de déplacement asservi en position et en vitesse [NF Z 68-037].

I.3. Etude organique d'une machine-outil à commande numérique

Si on ne s'intéresse qu'aux méthodes d'enlèvement de matière par mouvement de rotation (cas classiques du tournage, perçage, fraisage), la machine outil à commande numérique doit avoir la structure suivante :

- Des systèmes, autant que nécessaire, assurant la mise en position de l'outil par rapport à la pièce et les mouvements d'avance; ce sont **les axes de la machine** ;
- Un système qui réalise le mouvement de coupe par mise en rotation des outils ou de la pièce : **la broche** ;
- Un système de contrôle - commande, qui permet le suivi automatique du programme de commande de la machine ;

-Un élément mécanique qui assure le lien entre ces systèmes : **le bâti**.

A cela, il faut ajouter des éléments d'interfaces spécifiques à la production permettant la mise en position des outils et des pièces sur la machine. figure I.1

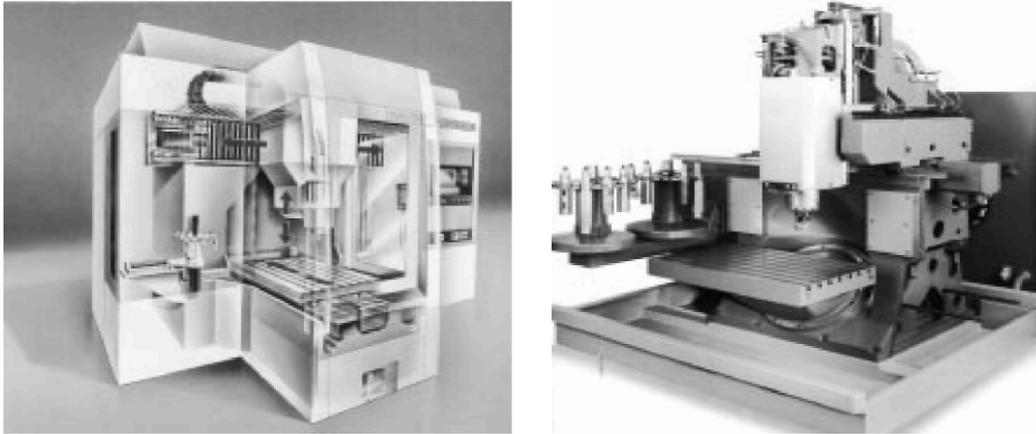


Figure I.1: Vue générale de machines à fraiser [ADEPA 89]

I.3.1. Le bâti

Le bâti assure le guidage des axes de mouvements, et l'agencement des autres organes de la machine. Pour assurer une géométrie correcte, et encaisser les actions mécaniques dues aux accélérations élevées des mobiles, le bâti doit être rigide et limiter les déformations dues à la chaleur. Les nouvelles machines intégrant de nouveaux matériaux de construction (béton), et la répartition des masses est optimisée.

La liaison au sol du bâti est également importante. Pour augmenter la rigidité des machines, on a recours à des liaisons hyperstatiques au sol, ce qui pose des problèmes de déformation du bâti. Par contre, les machines actuelles, plus rigides, permettent la réalisation de liaisons isostatiques sur trois points, qui limitent les déformations du bâti. Cette rigidité importante pose des problèmes de dissipation énergétique lors des chocs.

En plus de ces fonctions essentielles, le bâti remplit aussi des fonctions

auxiliaires importantes, comme la gestion des copeaux, et la protection des opérateurs.

I.3.2. Les axes de déplacement

Les axes de déplacement mettent en mouvement les parties mobiles des machines avec de fortes accélérations. Les axes sont constitués d'un guidage, d'un système d'entraînement, d'une motorisation et d'un système de mesure.

Le guidage positionne précisément des solides. Il est assuré par des glissières, qui sont de plus en plus réalisées au moyen de rouleaux précontraintes, afin de limiter les frottements, et de supporter des charges plus élevées [NF ISO 6983-1].

En fraisage, l'augmentation de la fréquence de rotation entraîne une augmentation des vitesses d'avance.

La transmission du mouvement se fait encore beaucoup au moyen de vis à billes précontraintes. figure I.2



Figure I.2: vis à billes

On assiste à l'arrivée de moteurs dit linéaires, qui éliminent les jeux et les frottements de l'entraînement.

Le système de mesure transmet la position du solide à la commande numérique. Deux technologies sont utilisées :

- les systèmes de mesure, qui comptent les nombres de tours de vis et la position angulaire dans le tour. ils ont pour capteurs des codeurs incrémentaux semi-absolus

- des systèmes, qui mesurent la position effective du mobile. ils ont pour capteurs des régies incrémentales, plus chère cette technologie a tendance à se développer sur des machines de production qui doivent avoir des asservissements précis;
- La commande d'axe permet d'asservir en position et en vitesse le déplacement des éléments mobiles de la machine outil.

I.3.3. La broche

La broche crée le mouvement de coupe nécessaire à l'usinage. Elle assure donc la mise en rotation de la pièce ou de l'outil. Ces deux cas posent des contraintes fonctionnelles différentes.

Cinématiquement, la broche est en liaison pivot avec le bâti ou un chariot. Dynamiquement, elle doit être très rigide, et stable thermiquement de façon à garantir la position relative de l'outil par rapport à la pièce durant l'usinage.

L'augmentation des vitesses de coupe impose une augmentation des fréquences de rotation et des couples admissibles au niveau des broches.

En fraisage, on cherche actuellement à ce que le couple (Fréquence de rotation – puissance) peut atteindre ($50\ 000\ \text{tr.mn}^{-1}$ _ $50\ \text{kW}$). Industriellement, on utilise des broches atteignant ($25\ 000\ \text{tr.mn}^{-1}$ _ $30\ \text{kW}$). A ces fréquences de rotation, les effets dynamiques sont importants et l'équilibrage des parties tournantes est vital.

Les hautes fréquences de rotation imposent des modifications technologiques. La liaison pivot est, le plus souvent assurée par des roulements à billes (85 % du marché 1996). Les roulements métalliques ont tendance à laisser la place aux roulements dits hybrides, dont les billes sont en céramique.

D'autres technologies sont mises en oeuvre, comme les paliers à air (8 %), les paliers hydrostatiques et hydrodynamiques (5 %), et les paliers magnétiques (2 %), [AUFFRET 96].

De point de vue de la motorisation, on cherche à obtenir des broches capables de fournir un couple important à bas régime (ébauche), et pouvant atteindre des grandes vitesses de rotation. Les électro-broches ont aussi fait leur apparition car elles suppriment les problèmes de la liaison entre le moteur et la broche.

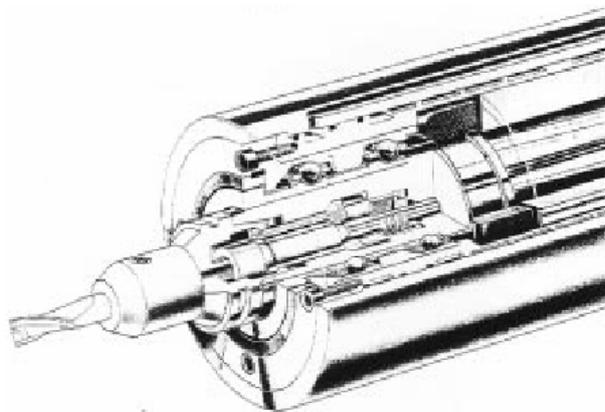


Figure I.3: La broche d'une fraiseuse à grande vitesse (document Précise)

I.3.4. Le directeur de commande numérique

La commande numérique assure l'asservissement en position et en vitesse des déplacements des pièces mobiles.

C'est purement de la commande d'axe, avec un traitement numérique pour élaborer les consignes de commande en temps réel en fonction des paramètres de la trajectoire et de l'état de la chaîne d'action [NF ISO 4342].

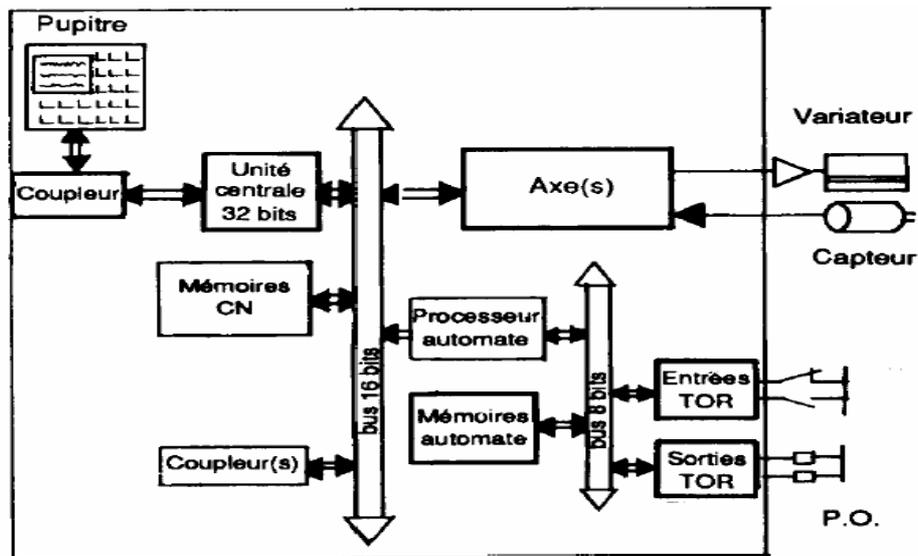


Figure I.4 : commande numérique standard (document num)

1.3.5. Les porte-outils

Les porte-outils ont pour fonction d'assurer la liaison entre l'outil et la machine. Suivant le mode d'usinage, ils supportent des sollicitations dynamiques différentes.

Dans le cadre du fraisage, les porte-outils assurent la liaison au moyen d'un cône normalisé. L'augmentation des fréquences de rotation impose des contraintes dynamiques plus importantes. A grande vitesse, le contact entre les parties male et femelle de la liaison n'est plus assuré. Pour y remédier on assure un effort de tirage important sur le cône, ce qui a tendance à modifier la position de l'extrémité de l'outil.

De nouveaux attachements sont normalisés en Allemagne, ce sont des attachements du type cône - face, dénommé HSK [NF E 60-023]. Le cône male est creux, ce qui permet une meilleure déformation par l'effet de la force centrifuge.

De plus l'appui plan est prépondérant et autorise des efforts de serrage plus importants. Au dessus de 30 000 tr/mn, il est nécessaire d'équilibrer les parties

tournantes, et d'ajuster parfaitement les outils dans les porte-outils.

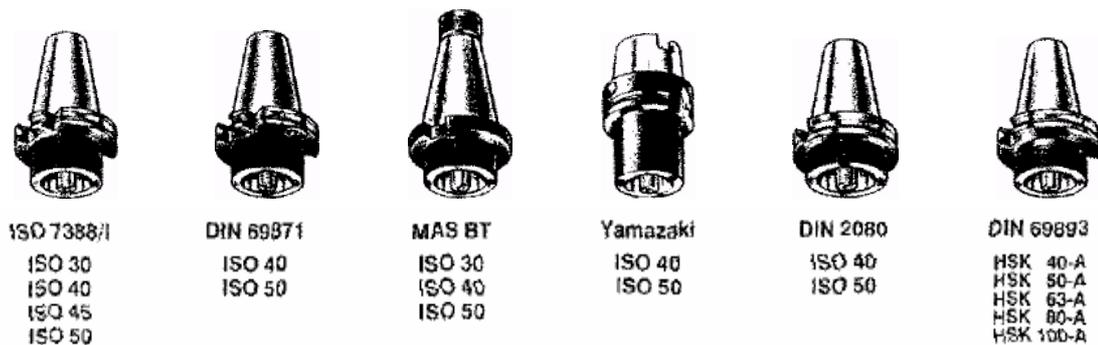


Figure I.5 : différents types d'attache-ments utilisés en fraisage, [SANDVIK 94]

I.4. Etude morphologique d'une machine-outil à commande numérique

L'étude morphologique d'une machine-outil a pour but de classer les machines suivant les axes de déplacement possibles. Ainsi on peut, par synthèse ou par expérience, définir la cinématique minimale d'une machine permettant d'obtenir une surface donnée.

I.4.1. Définition normalisée des axes numériques d'une MOCN

La norme [NF ISO 841] définit un système de coordonnées et désigne les divers mouvements de manière à ce qu'un programmeur puisse décrire les opérations d'usinage indépendamment de la cinématique de la machine. On considère toujours les mouvements de l'outil par rapport à la pièce tenue pour fixe.

Le système normal de coordonnées X, Y, Z est un système cartésien rectangulaire de sens direct, lié à une pièce placée sur la machine, et ayant des arêtes parallèles aux glissières principales de la machine.

Le sens positif du mouvement d'un chariot de la machine est celui qui provoque un accroissement sur la pièce dans la coordonnée correspondante.

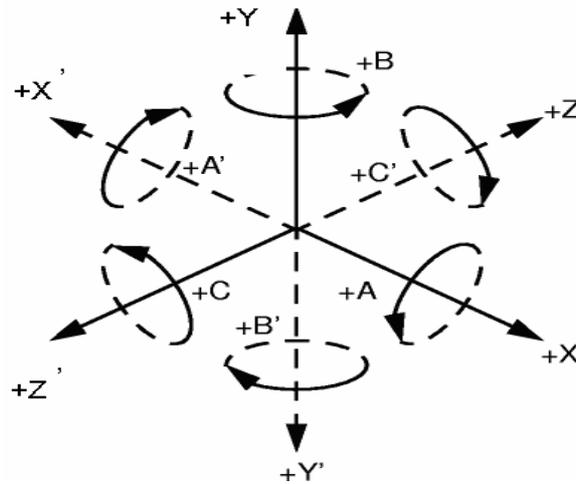


Figure I.6 : Système normalisé de coordonnées

L'axe Z du mouvement est l'axe du système normal parallèle à l'axe de la broche principale. Dans le cas d'une machine ayant des mouvements de rotation (cas du 5 axes), on choisit l'axe parallèle à une des positions que peut occuper la broche. L'axe X est perpendiculaire à l'axe Z. Sur les machines comportant des pièces en rotation l'axe X est radial. [NF ISO 841]

Sur les machines ayant des outils tournants, deux cas sont à étudier:

- Si l'axe Z est horizontal, le sens X positif est dirigé vers la droite lorsqu'on regarde de la broche principale vers la pièce.
- Si l'axe Z est vertical, le sens X positif est dirigé vers la droite, lorsqu'on regarde de la broche principale vers le montant de la machine.

L'axe Y forme avec les axes X et Z un trièdre de sens direct.

A ces translations, on associe des angles A, B, C définissant des mouvements de rotation effectués respectivement autour d'axes parallèles à X, Y et Z.

Les valeurs positives sont comptées de façon qu'une vis à pas droit, tournant, dans le sens positif, avance respectivement en suivant les directions +X, +Y, et +Z.

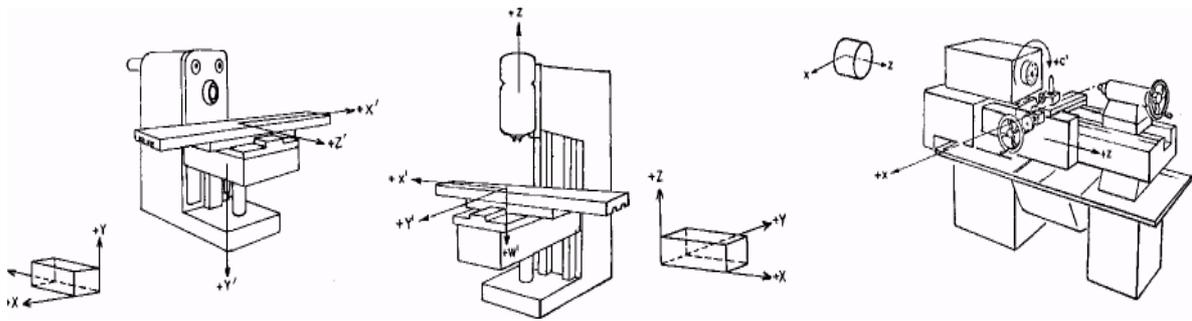


Figure I.7 : Définition des axes sur différentes machines

I.4.2. Classification des machines-outils à commande numérique

Le classement des machines est nécessaire car il aide au choix de machines, lors de l'étude de gammes de fabrication. Traditionnellement, on a classé les machines en fonction des formes, de surfaces à réaliser: (cylindriques / parallélépipédiques), (tournage/fraisage). Cette classification est remise en cause, car la commande numérique et l'adaptation des structures de machine cassent le lien entre les deux couples.

On classe maintenant les machines-outils par le nombre de mouvements élémentaires qu'elles peuvent mettre en oeuvre lors du déplacement de l'outil par rapport à la pièce. Seuls les axes sont comptés. La mise en oeuvre simultanée de plusieurs outils entraîne l'augmentation du nombre d'axes.

Nombre d'axes	mouvements	désignation du type d'usinage et des opérations possibles
3	X, Y, Z	fraisage : surfaçage, perçage, fraisage de poches, de rainures et de surfaces gauches. L'axe outil reste parallèle à une direction fixe par rapport à la pièce.
4	X, Y, Z, B X, Y, Z, C	fraisage : surfaçage, perçage, fraisage de poches, de rainures et de surfaces gauches. L'axe outil reste contenu dans un plan fixe par rapport à la pièce.
5	X, Y, Z, A, C X, Y, Z, B, C X, Y, Z, A, B,	fraisage de formes gauches : fraisage avec le flanc de l'outil, fraisage avec dépinçage, perçage en toutes directions.

Tableau I.1: Classification des machines-outils

En fraisage, la broche est plutôt un demi axe, car on cherche à asservir sa vitesse de rotation à la vitesse d'avance de l'outil pour assurer des interpolations hélicoïdales (taraudage) ou de façon à garantir l'avance par dent de l'outil.

Les machines à 5 axes du type (X, Y, Z, A, C) sont privilégiées dans le cadre de l'usinage de pièces de dimensions importantes, bien qu'elles perdent en rigidité au niveau de la tête de la machine.

I.4.3. Classification basée sur la structure cinématique

À partir des axes de rotation (R) et de Translation (T) ; quatre groupes principaux peuvent être distingués : (1) trois axes de (T) et deux axes de (R) ; (2) deux axes de (T) et trois axes de (R) ; (3) un axe de (T) et quatre axes de (R) et (4) cinq axes de (R).

Presque toutes les machines-outils à cinq axes existantes sont dans le groupe (1). Seulement des exemples limités des machines-outils à cinq axes sont dans le groupe (2) destinés à l'usinage des turbines par exemple. Les groupes (3) et (4) sont employés dans la conception des robots habituellement avec plus de degrés de liberté supplémentaires. Les cinq axes peuvent être distribuées entre la pièce et l'outil dans plusieurs combinaisons.

Une première classification peut être faite basé sur le nombre d'axes portant la pièce et l'outil dans leurs glissières et l'ordre de chaque axe dans la chaîne cinématique.

Une deuxième classification peut être basée sur les axes de rotation de telle sorte qu'il sont attribuées à la pièce ou à l'outil .

Les cinq degrés de liberté dans une machine basée sur les coordonnées cartésiennes sont :

Trois mouvements de translation X, Y, Z (en général représenté comme TTT) et deux mouvements de rotation AB, AC ou BC (en général représenté comme RR). La combinaison de trois axes de rotation (RRR) et de deux axes linéaires (TT) est rare. Si un axe guide la pièce en translation ou en rotation, le mouvement se munies du signe prime.

La machine à cinq axes dans la figure. **I.8** peut être caractérisée par $X' Y' A' B' Z$; les axes $XYAB$ portent la pièce et l'axe Z porte l'outil.

La figure. **I.9** montre une machine du type $XYZ A' B'$, les trois axes linéaires guident l'outil et les deux axes de rotation guident la pièce.

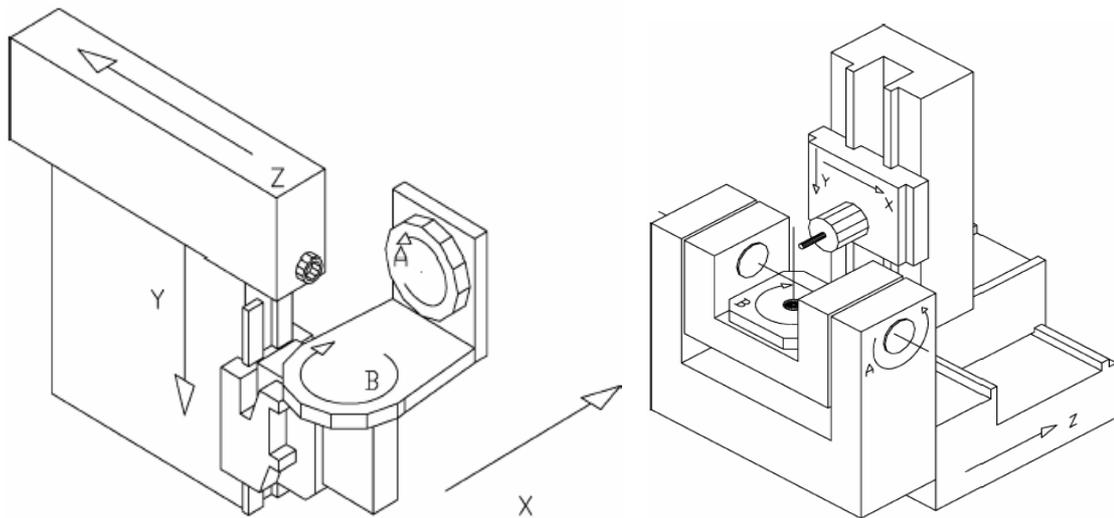


Figure I.8 : Une machine $X' Y' A' B' Z$

Figure I.9: Une machine $XYZ A' B'$

I.4.3.2. Classification basée sur l'ordre des axes portant la pièce et l'outil

Théoriquement le nombre de configurations possibles est tout à fait grand si l'ordre des axes dans les deux chaînes cinématiques portant l'outil et la pièce est compté comme configuration différente, inclus les combinaisons avec deux axes linéaires et trois axes de rotation.

Un axe portant l'outil et quatre axes portants la pièce peuvent être combinés dans une machine à cinq axes comme suit :

Pour chaque axe portant l'outil parmi les possibilités suivantes X, Y, Z, A, B, C les autres quatre axes portants la pièce peut être choisi parmi les cinq axes restants. Ainsi le nombre de combinaisons de quatre axes sur cinq avec considérer la permutation différente en tant qu'autre configuration est $5 \times 4! = 120$ combinaisons pour chaque choix de l'axe de l'outil (1 sur 6 ou 6 possibilités).

Théoriquement le nombre de combinaisons possibles de machines à cinq axes avec un axe portant l'outil est : $6 \times 120 = 720$ combinaisons.

La même analyse peut être faite pour toutes autres combinaisons. Avec **(t)** le nombre d'axes portants l'outil et **(w)** le nombre d'axes portants la pièce ($w+t=5$)

La formule générale de combinaisons est comme suit : **[Bohez 02]**

$$N_{comb} = \binom{6}{t} t! \binom{6-t}{w} w! \quad t \leq 3, t+w = 5 \quad (1)$$

$$N_{comb} = \binom{6}{w} w! \binom{6-w}{t} t! \quad t > 3, t+w = 5 \quad (2)$$

La valeur de cette équation est toujours égale à 6 ! Ou 720 quand $w+t=5$. Certaines de ces 720 combinaisons contiendront seulement deux axes linéaires.

Si seulement des machines à cinq axes avec trois axes linéaires sont considérées : seulement $3 \times 5! = 360$ combinaisons sont encore possibles.

Le groupe (Gt) de combinaisons est caractérisé par une valeur fixe de (t).

Cet ensemble est identique au groupe (G'w) caractérisé par une valeur fixe de (w) tel que $w=5-t$.

Citons des sous-groupes existant de machines à cinq axes :

- (1) Groupe G0/G'5 ; (2) Groupe G1/G'4 ; (3) Groupe G2/G'3 ;
(4) Groupe G3/G'2 ; (5) Groupe G4/G'1 ; (6) Groupe G5/G'0.

1. Machine G5/G'0

Tous les axes portent l'outil en mouvement, mais la pièce est fixe sur la table fixe **figure I.10**. ; La chaîne cinématique est XBYAZ (TRTRT) .

Cette machine est utilisée pour usiner les pièces volumineuses.

2. Machine G0/G'5

Tous les axes portent la pièce en mouvement, mais l'outil est fixé dans l'espace ; cette construction est employée pour des pièces très petites

3. Machine G4/G'1

Quatre axes portent l'outil et un axe porte la pièce ; Il y a principalement deux possibilités, l'axe portant la pièce peut être (R') ou (T').

4. Machine G1/G'4

Un axe porte l'outil et les quatre autres axes portent la pièce ; Il y a principalement deux possibilités, la chaîne cinématique d'axe d'outil peut être (R) ou (T.) ; La **figure I.8** est un exemple de cette configuration.

5. Machine G3/G'2

Trois axes portent l'outil et deux axes portent la pièce. Il y a principalement trois possibilités, les axes portant les pièces peuvent être linéaire (T' T') ; de rotation (R' R') ou combinés (T' R'.) ; la **figure I.11** donne un exemple d'une machine avec l'outil porté par deux axes de rotation et un axe linéaire.

Cette machine permet l'usinage de pièces larges.

La configuration la plus connue est la pièce porté par les deux axes de rotation telles que celle donnée dans les figures : **I.9**, **I.12** et **I.14**.

6. Machine G2/G3'

Deux axes portent l'outil et trois axes portent la pièce. Il y a principalement trois possibilités, l'axe portant l'outil peut être linéaire (TT), de rotation (RR) ou combiné (TR). La **figure I.13** illustre cette combinaison.

La **figure I.14** montre la configuration à deux axes linéaires portant l'outil

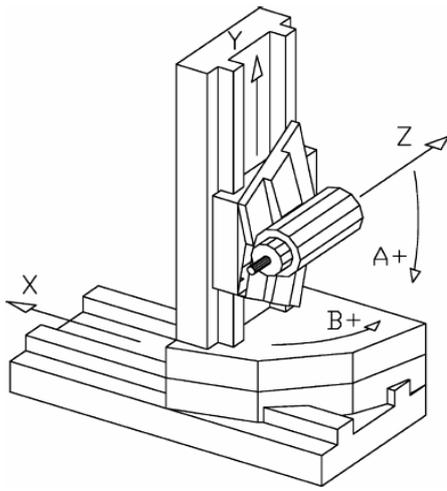


Figure I.10 Une machine XBYAZ

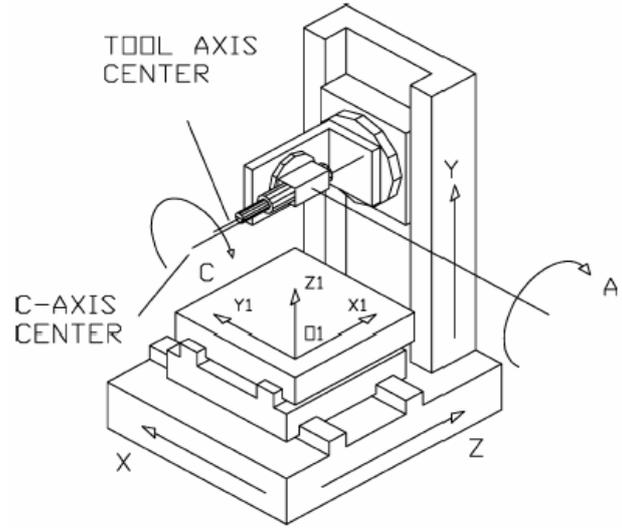


Figure I.11 Une machine X'Z'CA Y

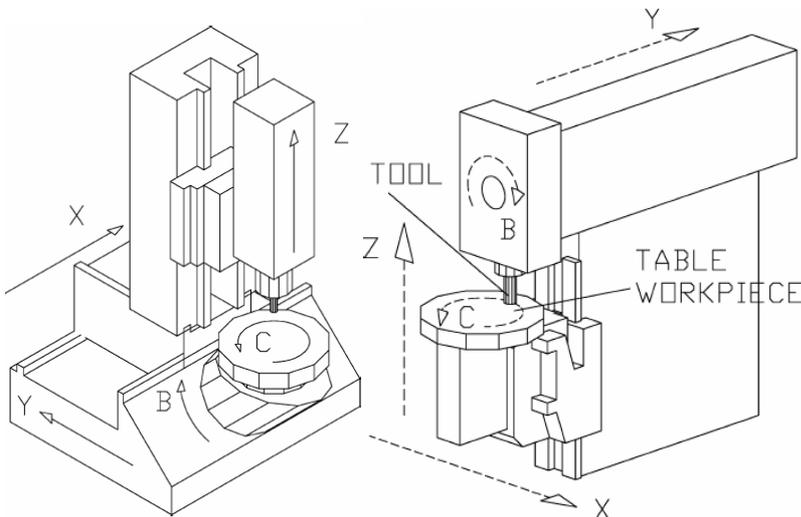


Figure I.12 Une machine
B' C' ZYX

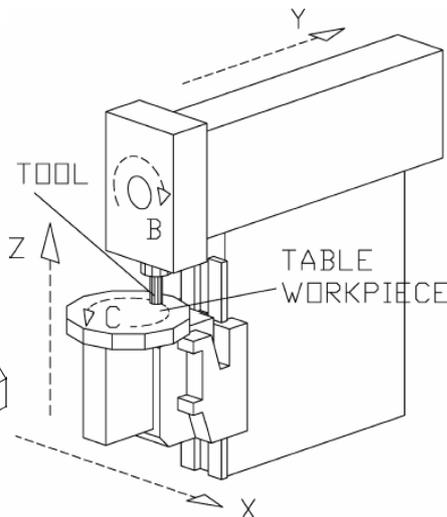


Figure I.13 Une machine
Z' X' C' B Y

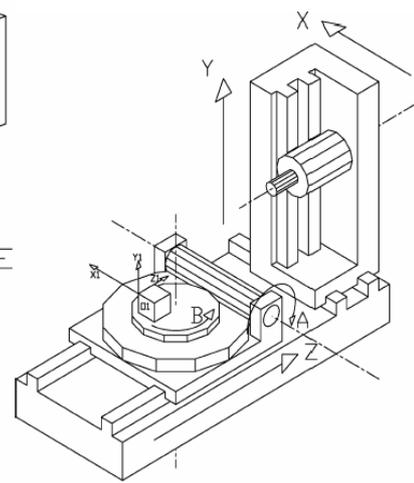


Figure I.14 Une machine
Z'A'B'YX

I.5. Choix d'une machine en fonction de l'usinage d'une pièce

Ce paragraphe n'est absolument pas la description d'une méthode exhaustive de choix de machine outils. Il vise simplement à attirer l'attention sur les problèmes que l'on peut rencontrer.

Lors de l'établissement de l'avant-projet de fabrication, on est amène à choisir le type de machine capable de réaliser la pièce. Il n'existe pas de méthode simple de choix de la machine. Le choix provient d'un processus de synthèse de l'analyse des mouvements possibles des différentes machines utilisables [Bohez 02].

En premier lieu on peut choisir entre la machine verticale ou horizontale

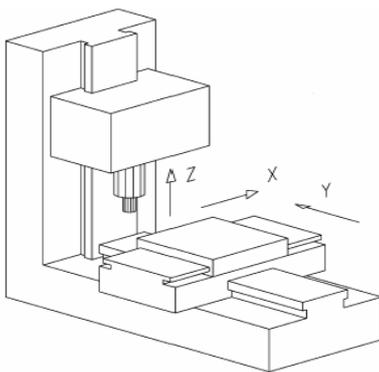


Figure I. 15: Une machine verticale

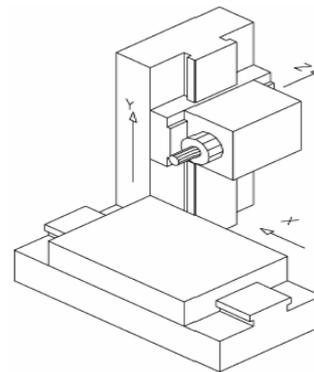


Figure I.16: Une machine horizontale

On peut cependant faire les remarques suivantes.

Au niveau morphologique, on distingue encore les deux types de pièces réalisables : prismatiques ou cylindriques. Pour l'instant, de manière générale, il est toujours plus productif d'usiner les cylindres sur un tour, et les formes prismatiques sur une fraiseuse. Les axes supplémentaires servent à finir les pièces sans démontage.

L'étude de la morphologie de la pièce peut consister à associer un polyèdre à

la pièce. A chaque entité à usiner, on associe une facette plane perpendiculaire à l'axe de l'outil usinant cette entité. Pour un perçage, c'est le plan perpendiculaire à l'axe du trou, pour un surfacage, c'est le plan surface, idem, pour un fond de poche, ou un contournage.

Si la cinématique d'une machine donnée permet de rendre cette facette perpendiculaire à l'axe de la broche, alors la machine est capable d'usiner l'entité.

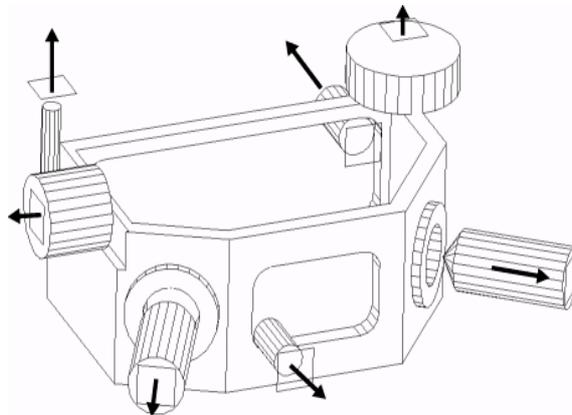


Figure I.17 : Exemple d'association de facettes à des entités d'usinage

En particulier, lorsque les entités retenues ont toutes une facette identique, une machine-outil à trois axes suffit. Si les facettes sont toutes perpendiculaires à un même plan, un centre à quatre axes suffit. Dans le cas contraire, on restreint le nombre d'entités à réaliser sans démontage, ou on a recours à une machine à cinq axes.

L'augmentation du nombre d'axes diminue le nombre de prises de pièce et de démontages nécessaires, et vice-versa. Pour usiner un polyèdre à n faces quelconque, une machine à trois axes a besoin de n prises de pièces, une machine à quatre axes d'au plus $n / 2$ prises, car si l'axe de rotation est perpendiculaire à l'arête commune à deux facettes, alors les deux facettes sont usinables sans démontage, et une machine à cinq axes de deux prises [Bohez 02] .

I.5.1. Exemple de pièce prismatique multi faces

La figure I.18 montre une pièce prismatique avec plusieurs trous et surfaces planes sous différents angles, Si une machine à cinq axes est utilisée la tête porte fraise doit être orienté relativement à la pièce dans n'importe quelle direction. Une fois la position correcte est atteinte, les trous ou les surfaces planes peuvent être usinés il est commode d'utiliser l'orientation et le mouvement de l'outil et de fixer les axes portant pièce tant que possible puisque la pièce est volumineuse.

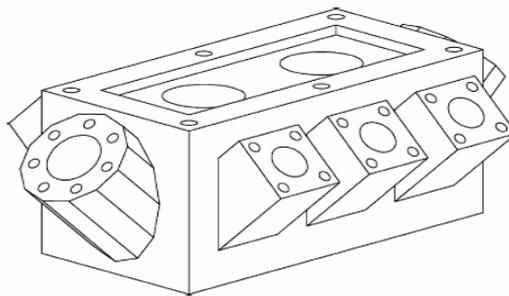


Figure I.18 Usinage d'un bloc moteur

I.5.2. Exemple de pièce de rotation de forme complexe :

La figure I.19 montre une pièce sous forme de turbine, il est recommandé d'utiliser la rotation de la table et de l'axe porte broche simultanément pendant l'usinage. **[Erik 97]**

La pièce est relativement légère il est recommandé de déplacer et d'orienter la pièce au lieu de l'outil.

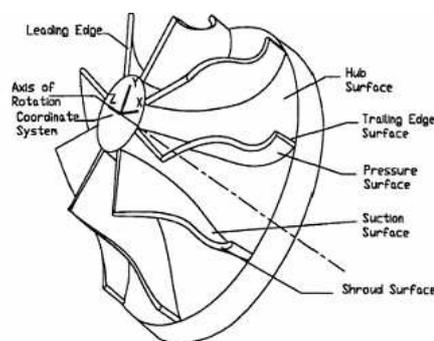


Figure I.19: Usinage d'une turbine

I.5.3. Exemple de pièce sphérique

La machine à cinq axes utilisée pour l'usinage d'un bijou (diamant) à la configuration convenable suivante : T' T' T' R' R ou R' R' T' T' T

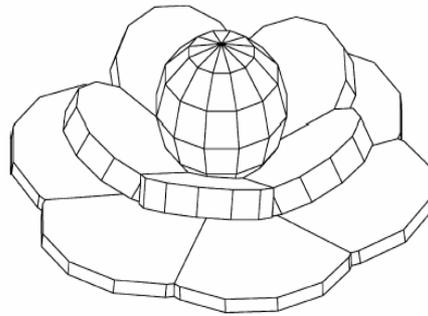


Figure I.20 : Usinage d'un bijou (diamant)

I.6. Influence de la CN sur la morphologie des centres d'usinage

Pour s'adapter à l'accroissement exceptionnel de productivité que permet la technologie CN, la constitution mécanique des MO a dû être totalement repensée.

I.6.1. Approvisionnement en outils

L'automatisation de la gestion des outils est un facteur déterminant de la productivité des MOCN. C'est pourquoi la majorité d'entre elles sont équipées de mécanismes de changement automatique de leurs outils qui apportent une très grande souplesse d'utilisation en permettant la réalisation d'opérations variées sans la présence d'un opérateur.

Un changeur automatique d'outils se compose d'une réserve d'outils (ou magasin) et d'un dispositif de transfert chargé de véhiculer l'outil du magasin vers le poste de travail de la machine et vice-versa, conformément aux instructions du programme d'usinage de la CN.

Il existe plusieurs sortes de magasins d'outils:

— circulaire (à disque ou à tambour) (figure I.21 et figure I.22);

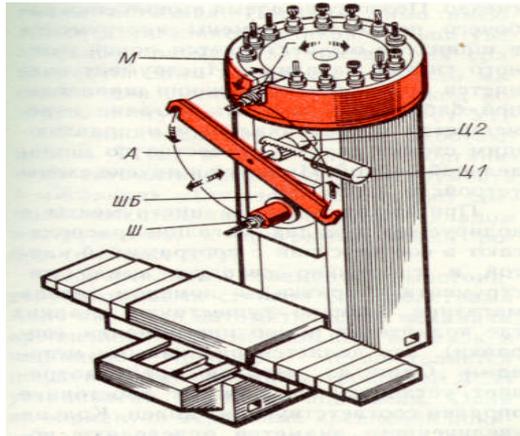


Figure I.21 Magasin d'outils à disque

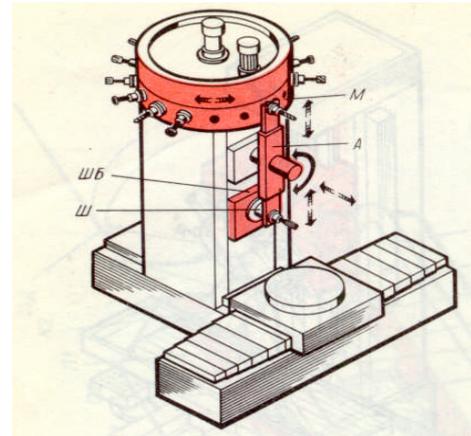


Figure I.22:Magasin d'outils à tambour

— à chaîne (simple, double ou triple) dont la capacité peu dépasser 100 outils (figure I.23); — à tête d'usinage (figure I.24);

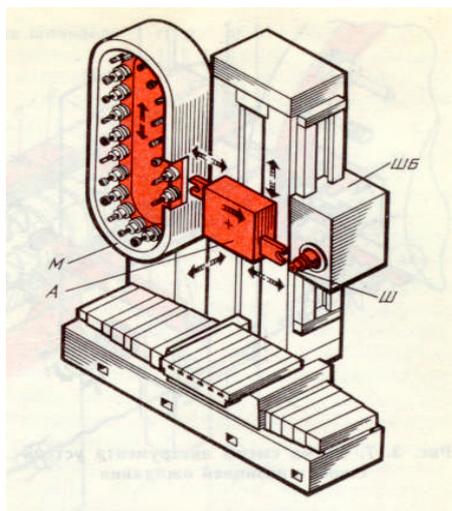


Figure I.23:Magasin d'outils à chaîne

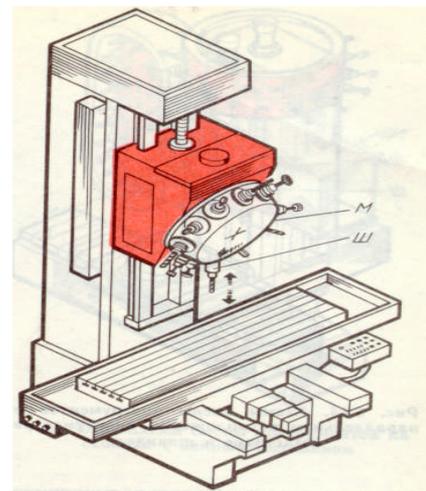


Figure I.24:Magasin d'outils revolver

La rotation du magasin peut s'effectuer dans un seul sens ou dans les deux, cette dernière solution permettant de sélectionner l'outil à changer par le chemin le plus court.

En fonction de la gestion d'outils adoptée sur la machine, l'outil peut être sélectionné dans un ordre séquentiel fixe ou aléatoire.

Dans ce cas, il est remplacé n'importe où dans le magasin, une codification étant prévue soit sur l'outil ou sur l'emplacement du magasin pour lever toute ambiguïté.

Le mécanisme de transfert se présente généralement sous la forme d'un bras pivotant qui enlève simultanément les outils de la broche de la machine et du magasin d'outils et les dépose en sens inverse après une rotation à 180°.

(Figure 1.25)

Le choix d'un changeur d'outils est lié à plusieurs facteurs :

- le temps de changement d'outil de copeau à copeau ;
- la possibilité d'extension du magasin d'outils ;
- la facilité de rechargement du magasin.

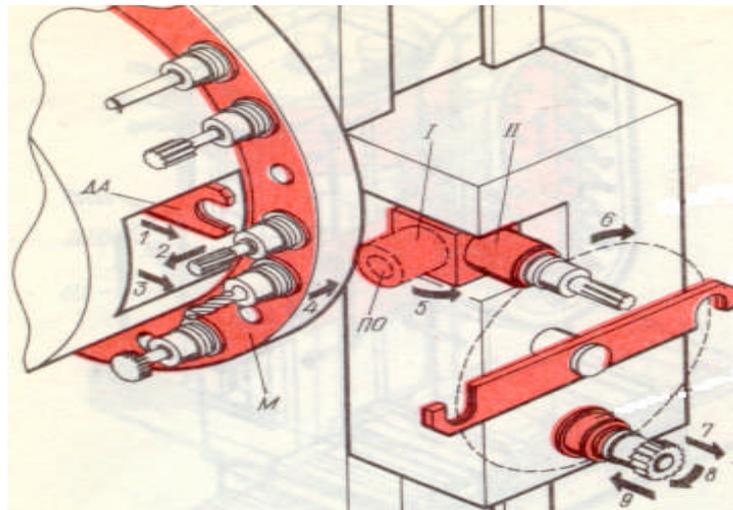


Figure I.25 : Magasin d'outils (mécanisme de transfert)

I.6.2. Approvisionnement en pièces

Les temps de montage et de démontage de la pièce revêtent souvent une importance non négligeable dans la productivité d'une MOCN.

Sur les machines à pièces tournantes, les solutions retenues sont les suivantes :

- bras manipulateurs situés à l'extérieur de la machine ;

- robots au sol pouvant desservir plusieurs machines ;
 - portiques conçus pour le transfert de pièces par la partie supérieure du poste de travail.
- de travail.

Sur les machines à outils tournants, les systèmes à palettes sont actuellement les équipements les plus répandus. Ils présentent l'avantage de monter et de démonter les pièces en temps masqué hors du poste de travail avant d'être transférées sur la table de la machine au moment opportun.

Il existe diverses configurations de palettiseurs, la plus simple étant constituée d'une table circulaire ou linéaire à deux emplacements placés à l'avant du poste de travail. Des solutions de systèmes à transfert linéaire ou par carrousel pouvant comporter un nombre élevé de palettes augmentent considérablement l'autonomie des machines. Figure I.26 ; figure I.27.

Ce type de configuration permet en outre une prolongation du temps productif en dehors des horaires normaux de travail, si des moyens appropriés de surveillance de l'usinage ont été prévus à cet effet.

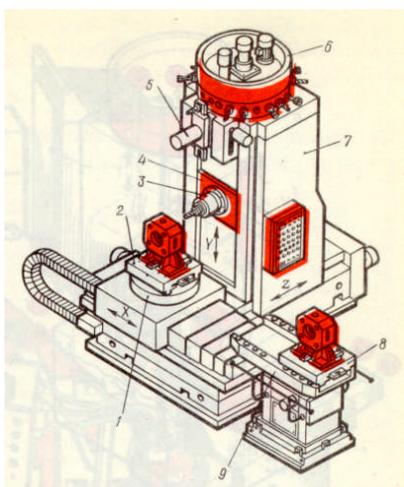


Figure I. 26 : Transfert linéaire

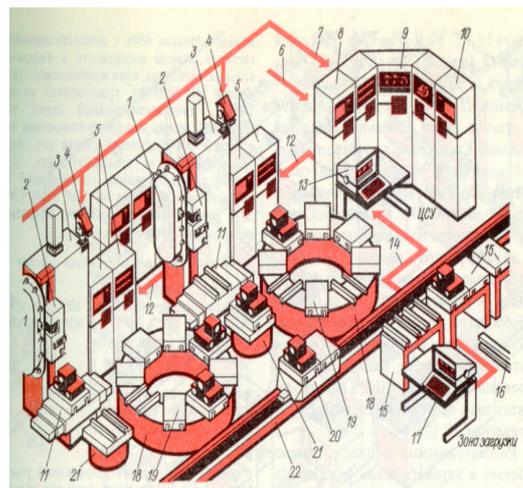


Figure I.27 : Transfert par carrousel

I.7. Exemple d'un Centre d'usinage à 5 axes simultanés type W-408B

Dans ce paragraphe nous appliquons les notions et définitions précédentes sur un centre d'usinage W-408B

I.7.1. Construction

Grâce à un bâti en fonte compartimenté et nervuré, le nouveau centre d'usinage à la barre garantit une grande rigidité statique et dynamique.

Il permet l'interpolation 5 axes simultanés avec une grande précision. Des pièces complexes, même à 6 faces, peuvent être usinées facilement à partir de barres ou en pièce à pièce, grâce à un dispositif de reprise pivotant, permettant l'usinage de la face arrière de la pièce (face de coupage).

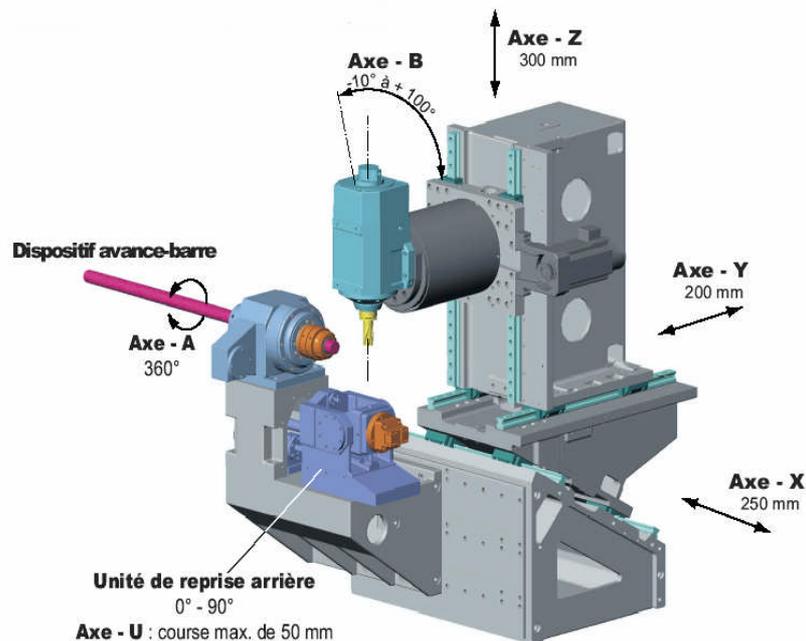


Figure I.28 : Centre d'usinage à 5 axes W-408B

I.7.2. Courses et conception des axes

X = 250 mm Y = 200 mm Z = 300 mm

A = 360° B = -10° à +100° (broche pivotante)

U = 50 mm (dispositif d'usinage en reprise)

I.7.3. Glissières et asservissement des axes

Un guidage très précis des axes X, Y et Z est assuré par des rails linéaires préchargés à recirculation de corps roulants de classe superprecision. **[Boyd 74]**

Le centre d'usinage présente une vitesse d'avance rapide de 30 m/min., l'entraînement des axes est assuré par des moteurs AC.

Les axes sont asservis en mesure directe par l'intermédiaire de régies de mesure de haute précision possédant une résolution de 0,001 mm

Le nouveau centre d'usinage type W-408B est équipé d'une broche permettant de répondre aux exigences d'usinage à grande vitesse. Il est muni d'une broche à moteur intégré de 30 000 min⁻¹, avec roulements céramique, d'un cône prise d'outil HSK-E40 et d'un système d'arrosage périphérique.

La puissance maxi de la broche de 10 kW peut être atteinte à 100 % , avec un couple de 4,2 Nm. Compacte, rigide, fiable lors de productions de longue durée, telles sont les qualités que présente la nouvelle broche pivotante du centre d'usinage W-408B.

Le mouvement angulaire de -10° a +100° de la broche permet l'exécution d'opérations d'usinage complexes sur la pièce. Le control de positionnement de l'axe B est réalisé par un codeur circulaire à bande de haute précision ayant une résolution de 0,001°.

Flexibilité, courts temps de changement d'outils et de mise en train sont les qualités marquantes du nouveau centre d'usinage 5 axes à la barre W-408B

Exemple: le diviseur de l'axe A peut être équipé de mandrins porte-pince haute précision à changement rapide et qui sont serrés dans le diviseur de l'axe A par bridage baïonnette hydraulique (avec serrage pince hydraulique).

Il est possible d'utiliser les pinces type F27 ou F35 sur les mandrins porte-

pince à changement rapide ainsi que les palettes de serrage Mecatool, ou Erowa.

Grâce au concept modulaire du dispositif de reprise arrière, plusieurs systèmes de serrage pièce tels que le système de serrage par étau Schunk ou par pince, selon demande spécifique, peuvent être proposés sur la machine W-408B.

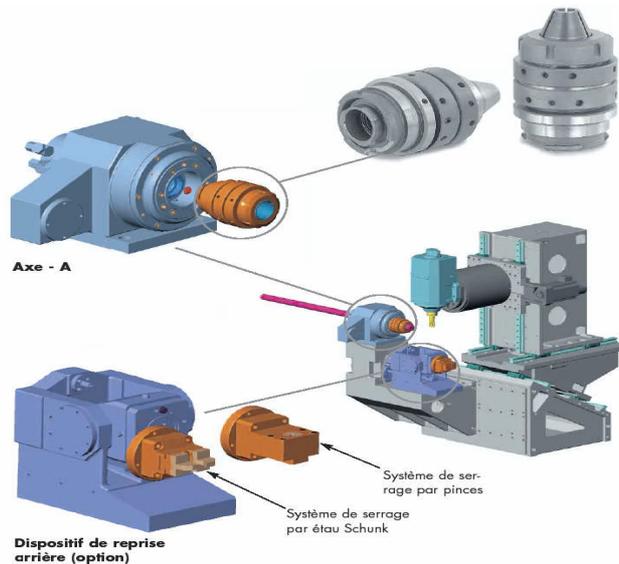


Figure I.29 : Dispositif de reprise arrière

I.7.4. Magasin et changeur d'outils

L'équipement standard du centre d'usinage 5 axes à la barre W-408B comprend un magasin d'outils à 24 positions.

Afin d'éviter toute intrusion de copeaux dans le magasin d'outils, ce dernier est protégé par un carénage mobile assurant l'étanchéité du magasin pendant l'usinage.

Le changement d'outils est effectué par un bras double très rapide, entraîné par un système à came à commande électrique permettant d'atteindre un temps copeaux /copeaux d'environ 3 secondes.

Le centre d'usinage W-408B peut également être équipé, en option, d'un système de mesure de longueur et diamètre de l'outil et d'un magasin d'outils HSK-E40 dont la capacité a été portée à 48 positions.



Figure I.30: Magasin d'outils

I.7.5. Chargeur de pièces (Automatisation-chargeur de palettes porte-pièces)

Afin d'automatiser le processus de chargement déchargement de pièces sur la machine, le centre d'usinage W-408S peut être équipé d'un nouveau système de palettisation. Celui-ci est composé d'un plateau circulaire indexable d'une capacité de 12 ou 24 palettes-pièces du type Mecatool GPS 70.

Un bras chargeur linéaire ayant une course de 1100 mm et une unité rotative double pince pneumatique assure la préhension des pièces et le transfert de celles-ci à la machine.



Figure I. 31: Bras chargeur linéaire

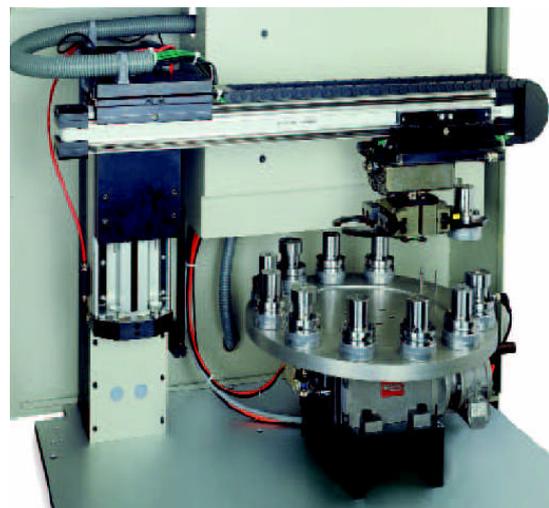


Figure I.32: Plateau circulaire indexable

I.8. Conclusion

Théoriquement il y a un grand nombre des manières dans lesquelles une machine à cinq axes peut être construite. Presque toutes les machines cartésiennes classiques à cinq axes appartiennent au groupe avec trois axes linéaires et deux axes de rotation ou trois axes de rotation et deux axes linéaires.

Ce groupe peut être subdivisé dans six sous-groupes chacun avec 720 exemples. Si seulement les exemples avec trois axes linéaires sont considérés il restent 360 exemples dans chaque groupe. Les exemples sont différenciés en basant sur l'ordre des axes de l'outil et de la pièce dans la chaîne cinématique portante.

Si seulement l'endroit des axes de rotation est considéré avec trois axes linéaires et deux axes de rotation, trois groupes peuvent être distingués. Dans le premier groupe les deux axes de rotation sont appliqués à la pièce. Dans le deuxième groupe les deux axes de rotation sont appliqués à l'outil.

Dans le troisième groupe il y a un axe de rotation dans chaque chaîne cinématique. Chaque groupe a toujours vingt exemples possibles.

Déterminer le meilleur exemple pour un domaine d'application spécifique est une issue complexe.

L'achat d'une machine à cinq axes doit être précédé par une étude profonde de la gamme de produits qui doivent être usinés.

Les pièces devraient être classifiées comme à cinq axes en déplacement ou à cinq axes en rotation ou à cinq axes combinés.

Les machines avec une table de rotation sont par exemple très bonnes pour produire les pièces de rotation tels que des turbines.

Un axe de rotation pour l'outil et un axe de rotation pour la pièce fourniront un plus grand facteur d'utilisation de zone de travail.

Les machines virtuelles récemment présentées ont en tant qu'un avantage principal, le potentiel d'une réponse dynamique plus élevée et haute rigidité. Le facteur d'utilisation de zone de travail est cependant beaucoup inférieur en comparaison de la machine classique à cinq axes.

La rigidité plus élevée de ces machines les rend très appropriées pour la conception des axes à grande vitesse [Huang 99] requis pour le fraisage à grande vitesse.

CHAPITRE II

CONCEPTION ASSISTEE PAR ORDINATEUR

II. Conception Assistée par Ordinateur

II.1. Introduction

Dans les années 70, les logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) n'étaient que des logiciels de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur). Ils ont évolué petit à petit grâce, d'une part à l'augmentation des performances du matériel informatique et d'autre part à la recherche dans le domaine du logiciel. Mais, aujourd'hui, ils ne sont pas encore véritablement des systèmes d'aide à la conception.

Ce chapitre tente de mettre en perspective l'utilisation des contraintes dans le processus de conception et en particulier dans le processus de la conception préliminaire pour qu'enfin ces logiciels soient des outils d'aide à la conception et à la création. Aussi, on se propose ici de faire une synthèse des différentes approches qui ont été, sont ou seront utilisées dans les logiciels de CAO pour la modélisation géométrique de l'objet physique à concevoir.

Dans la première section, nous présenterons le processus de conception d'un produit et les différentes étapes : cahier des charges (spécifications), conception conceptuelle (conceptual design), conception préliminaire (preliminary design), conception détaillée (detailed design). Les enjeux de la conception y seront montrés ainsi que l'importance du modèle géométrique 3D qui est le cœur des logiciels de CAO. Enfin, nous proposerons une représentation des connaissances basée sur un « modèle conceptuel d'objets sous contraintes ».

La deuxième section retrace l'évolution et les tendances de la modélisation géométrique au sein de ces logiciels de CAO. Avec l'augmentation des capacités

de calcul et de stockage des systèmes informatiques, nous avons assisté à l'incorporation progressive autour des modèles géométriques de plus en plus de connaissances non géométriques, liés au produit lui-même et de sa fabrication avec l'approche par features (par entités ou caractéristiques en français) et de méthodes de traitement automatiques et interactives pour aider le concepteur avec les approches paramétrique et variationnelle. Toutes ces approches peuvent se nommer « approches par contraintes ».

La troisième section sera une courte synthèse des différentes méthodes de résolution et de décomposition des systèmes de contraintes utilisées dans les logiciels de CAO ou qui sont en cours d'élaboration dans les équipes de recherche. En particulier, le concept de GCSP (Geometric Constraint Satisfaction Problems ou Problèmes de satisfaction de contraintes géométriques) y sera présenté.

II.2. Le processus de conception d'un produit

Un produit (ou objet produit) est fabriqué par l'homme par opposition à un objet naturel. Cet objet artificiel peut être très divers mais nous nous limiterons ici dans le cadre de la CAO à un objet 3D réel (produit mécanique : pièce mécanique, automobile, avion, mobilier, produit de design industriel : carrosserie de voiture, capot d'un produit électronique -téléphone, ordinateur...).

En bref, tout objet 3D qui nécessite ou a nécessité dans le passé avant la CAO un plan en 2D (dessin technique) pour sa réalisation. Dans les systèmes de CAO, qui étaient au départ des logiciels de DAO, le modèle 2D ou 3D est central.

Le processus de conception/réalisation est le passage de l'idée à l'objet. Plus l'objet à fabriquer est complexe, plus une méthodologie est nécessaire et plus les objets intermédiaires de conception, en particulier les plans, sont indispensables. On assiste ainsi à une rationalisation de la production qui permet de faire baisser le temps et le coût de la construction du produit.

II.2.1. Les 4 étapes du processus de conception

Nous distinguons là 4 grands niveaux d'abstraction.

L'étape du cahier des charges ou spécifications; pour un produit mécanique, c'est le cahier des charges fonctionnel (CDCF).

L'étape de la conception conceptuelle (conceptual design). Le développement de cette phase peut permettre une approche plus globale du processus de conception. Cette étape devient aujourd'hui, à notre avis, un important objet d'étude comme nous allons essayer de le montrer dans la suite.

L'étape de la conception préliminaire (preliminary design) qui débouche sur un Avant-projet Sommaire (APS) avec des plans à petite échelle.

L'étape de la conception détaillé (detailed design) qui est, elle, bien couverte par les logiciels de CAO actuels et qui se termine par des plans à grande échelle.

[Daniel et al. 1997]

Dans ce chapitre, nous nous focaliserons sur les étapes de la conception Conceptuelle et de la conception préliminaire. En partant d'une idée, le concepteur définit quelque chose de plus précis : le concept qui est souvent exprimé par un dessin 2D à main levée et un court texte descriptif.

C'est le processus de création du concept.

Pour une présentation détaillée du processus de conception, on peut se reporter à [Maculet 91].

II.2.2. Les enjeux de la conception d'un produit

Les enjeux aujourd'hui sont d'abord les délais, le coût et la qualité. Mettre sur le marché un produit au plus tôt pour être le premier devient un objectif majeur [Tollenaere et al. 98]. Le produit doit être à moindre coût et de bonne qualité. De plus, le cycle de vie d'un produit est de plus en plus court. L'innovation est constante pour renouveler l'offre sur le marché.

Pour accélérer le processus de conception/fabrication dans l'industrie mécanique, on :

- étend en aval le processus de conception aux processus de fabrication avec les concepts de « Design for Manufacturing » et de « Features »

- intègre dans la conception les différents métiers qui interviennent ensemble; ce sont l'ingénierie simultanée, concourante ou conception intégrée.

- remonte le plus en amont possible dans le processus de conception et d'intégrer la phase conceptuelle permettant ainsi une approche beaucoup plus globale.

II.2.3. Le modèle géométrique, coeur des logiciels de CAO

Le processus de conception d'un objet produit est un enrichissement au fur et à mesure de nombreux modèles de représentation des connaissances. En particulier, si on étudie l'élaboration de la forme d'un objet, nous pouvons distinguer le modèle conceptuel, le modèle topologique, le modèle

morphologique, le modèle géométrique et le modèle physique. On peut rassembler dans le modèle spatial les 3 modèles topologique, morphologique et géométrique.

Pour résumer, nous pouvons avancer que l'espace de conception d'un produit est composé par 3 axes principaux : la fonction, la forme et la matière. Le processus de conception est le chemin que parcourt le concepteur dans cet espace pour aboutir à l'objet à concevoir.

En CAO, le modèle est la représentation informatique de l'objet en cours de conception. C'est la maquette numérique, virtuelle de l'objet. Aujourd'hui, le modèle géométrique est le cœur d'un système de CAO. Et comme le montre Jean-Marc Brun cette place centrale permet d'établir la cohérence des modèles. Le « modèle produit » est constitué d'une juxtaposition de modèles spécifiques des différents points de vue. Par exemple, nous pouvons avoir en plus pour le calcul avec la méthode des éléments finis, un modèle géométrique simplifié de maillages.

Notons ici que le problème de cohérence est un problème fondamental. Soit il existe plusieurs modèles dont il faut maintenir la cohérence, soit il existe un seul modèle global dont on extrait différents points de vue. Dans ce cas, il est nécessaire d'assurer la cohérence entre les vues et de remonter les actions effectuées sur ces vues vers ce modèle unique. Après cette présentation rapide du processus de conception en CAO, approfondissons la modélisation conceptuelle qui lui est associée et introduisons la notion de contrainte.

II.2.4. La conception et le modèle conceptuel d'objets sous contraintes

La conception est un processus de satisfaction de contraintes :

L'espace de conception d'un objet artificiel est composé par 3 axes principaux :

La fonction, la forme et la matière. Cet espace est immergé dans un ensemble de contraintes que l'on peut nommer l'environnement ou le contexte du projet. L'imaginaire et la créativité du concepteur sont au départ sans limites, sans contraintes. D'où, les séances de « brain-storming ». L'espace des solutions est infini. Le concepteur part d'un bloc de marbre vierge. Mais « il faut se limiter » quand on passe dans la réalité des choses. Il faut respecter les contraintes de l'environnement. Au fur et à mesure, le concepteur intègre les contraintes du projet. Certaines contraintes peuvent être impératives, on doit les respecter d'une manière absolue. D'autres contraintes peuvent être plus ou moins respectées, elles sont non absolues. Les contraintes permettent de tailler dans le bloc de l'espace total. Elles représentent les limites et la marge de manœuvre du concepteur. Si au début de la conception, le problème est sous contraint, on arrive rapidement, par ajout successif de contraintes, à un problème sur contraint. Il faut donc alors retirer ou relâcher certaines contraintes. Cette boucle de conception/reconception s'arrête lorsque le concepteur estime qu'au niveau de l'avancement du projet (par exemple au niveau de l'avant-projet sommaire) le problème est bien-contraint.

Nous pouvons donc dire que la conception est un processus de satisfaction de contraintes car le problème de la conception est un problème ouvert, mal structuré.

Le mot Satisfaction provient de « satisficing » d'Herbert A. Simon [Simon 74]. Ce prix Nobel est l'un des fondateurs de l'intelligence artificielle qui au début travaillait sur la résolution de problèmes puis sur les sciences de la conception. Ce terme Satisfaction indique bien que dans le processus de conception on ne recherche pas la solution optimale mais une bonne solution, une solution acceptable satisfaisante.

II.3. Méthodes de résolution de contraintes en CAO

L'idée de travailler avec les contraintes est apparue dès le début de la modélisation géométrique en DAO avec Sutherland [Sutherland 63].

À l'heure actuelle, la modélisation par contraintes, en particulier avec le variationnel, aboutit à de grands systèmes d'équations. Pour aider le concepteur qui travaille en interactif, il faut que la résolution soit efficace.

Les systèmes d'équations utilisées en CAO sont quelconques : linéaires, non linéaires polynomiaux, algébriques ou transcendants, ce qui accroît la difficulté de la résolution.

Pour résoudre simultanément un grand système d'équations représentant des contraintes très interdépendantes, il est nécessaire de faire une décomposition en des sous-systèmes les plus indépendants possible, d'où le concept de PPSI (Plus Petit Système Indépendant) [Lesage 02]. Dans un problème industriel, le nombre d'équations et de variables se compte en centaines voir en milliers. Nous allons présenter différentes méthodes de résolution puis de décomposition que l'on a utilisées ou cherchées à utiliser en CAO.

II.3.1. Les méthodes formelles

Les méthodes formelles (ou symboliques) donnent des résultats exacts mais sont lentes (temps exponentiel). Elles sont nombreuses : la méthode des bases de Gröbner [Chou et al. 87], la méthode de Ritt-Wu, [Gao et al. 98], la méthode des résultants [Bondyfalat 00].

On a aussi des méthodes à base de règles géométriques [Lathan et al. 96] comme, par exemple les méthodes de construction formelle à la règle et au compas. Le logiciel de calcul formel Mapple a été utilisé [Nguyen et al. 96].

On peut classer parmi ces méthodes l'approche de Mathis [Mathis 97], [Dufour et al. 98].

Ces méthodes sont d'ailleurs utilisées dans la plupart des méthodes de décomposition géométriques à base de règles.

II.3.2. Les méthodes numériques itératives

Les méthodes numériques sont celles les plus employées car elles sont rapides (temps polynomial). Par contre elles ne sont pas exactes. Elles sont adaptées aux systèmes de grande taille de la CAO. Pour ces raisons, certaines de ces méthodes sont aujourd'hui utilisées dans des logiciels de CAO industriels.

Les méthodes classiques pour résoudre ces systèmes d'équations non linéaires sont itératives. Il est absolument nécessaire avant d'appliquer une des méthodes d'avoir une solution approchée de la solution cherchée. Ce n'est d'ailleurs pas un inconvénient en CAO puisque le concepteur part toujours d'une solution. A cette étape de la résolution, cette solution n'est pas encore assez contrainte ; le système est sous-contraint.

Le concepteur rajoute ensuite des contraintes.

[Sutherland 63] et [Borning 81] ont utilisé, entre autres, une technique d'approximation : une méthode de relaxation (minimisation de la somme des carrés des erreurs, c'est-à-dire les écarts entre la valeur désirée de la contrainte et la valeur calculée).

La méthode la plus employée est une méthode connue en Analyse numérique : la méthode de Newton-Raphson ou une variante [Lin et al. 81], [Light et al. 82], [Nelson 85]. Cette méthode a un inconvénient, elle converge mal. La méthode par homotopie (dite aussi méthode de continuation) [Michelucci et al. 94] [Lamure et al. 95] converge d'une manière plus continue, plus prévisible, moins chaotique que la méthode de Newton-Raphson. Ces méthodes sont plus ou moins compatibles avec les méthodes de décomposition.

Ces méthodes ne sont pas bien sûr complètes. On n'a pas toutes les solutions. Remarquons enfin que la résolution d'un système d'équation non linéaire peut être ramenée au calcul d'un minimum d'une fonction. Aussi voyons maintenant les méthodes d'optimisation.

II.3.3. Les méthodes numériques d'optimisation :

équations, inéquations et fonction objective

Pour résoudre un système d'équations ou/et d'inéquations avec une fonction objectif à optimiser (recherche du maximum ou du minimum) on peut utiliser des méthodes de programmation mathématique et d'optimisation combinatoire issus de la théorie des graphes et de la recherche opérationnelle [Gondran et al. 79]:

La programmation linéaire (par exemple la méthode du simplexe), optimisation non linéaire (gradient conjugué) avec contraintes, le recuit simulé, la méthode tabou, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones. En CAO, les multiplicateurs de Lagrange ont été utilisés ainsi que la méthode BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) [Ge et al. 99] ou le recuit simulé.

Par exemple, quand on a un système linéaire d'équations et/ou d'inéquations, on utilise un algorithme du simplexe ou une méthode dérivée du simplexe sur les rationnels (réels en précision infinie).

Dans les cas précédents, les variables sont continues (réelles). Cette condition est quasiment indispensable en CAO. Cependant, dans certains cas, on est obligé d'utiliser des méthodes d'optimisation avec des variables discrètes (entiers, booléennes, ...); on peut utiliser la programmation en nombres entiers, en particulier les méthodes par séparation et évaluation qui sont à l'origine des CSP que nous allons voir maintenant.

II.3. 4. Les méthodes CSP (Constraint Satisfaction Problems)

pour les GCSP (Geometric CSP) Les CSP discrets :

Les méthodes CSP sont des méthodes issues de la recherche opérationnelle et l'intelligence artificielle. Les premiers travaux datent de plus de vingt ans [Waltz 72], [Montanari 74], [Laurière 76], [Macworth 77]. Les CSP sont des contraintes quelconques entre des variables dont les domaines d'instanciation (ou de définition ou de valeurs) sont discrets et les problèmes traités sont combinatoires.

Un CSP est défini par un ensemble de n variables $V = \{V_1, \dots, V_n\}$

un ensemble de n domaines $D = \{D_1, \dots, D_n\}$ avec D_i ensemble fini des valeurs associées à V_i

un ensemble de m contraintes $= \{C_1, \dots, C_m\}$ avec C_i dépendant d'un sous-ensemble des n variables. On cherche une, des ou les valeurs par variable satisfaisant l'ensemble des contraintes. On est ici au niveau variable « niveau 0 ».

Ces méthodes CSP discrètes, de complexité exponentielle, sont basées sur l'énumération et le filtrage. Ce filtrage, appelé aussi propagation des contraintes, permet de réduire les domaines de définition des variables au fur et à mesure de la résolution. Mais il faut faire un compromis entre ce prétraitement et l'énumération. On se contente donc de faire une propagation locale, en général la cohérence d'arc : à chaque couple de variables en relation, on supprime les instances qui ne respectent pas cette contrainte.

La communauté CSP a développé des axes de recherche utiles au concepteur. Les CSP dynamiques permettent d'ajouter ou de retrancher une ou des contraintes. Cela permet une utilisation interactive de cet outil par le concepteur. Au début du processus de conception, le problème est comme on l'a vu sous-contraint. On peut donc renforcer ou rajouter des contraintes. Des algorithmes incrémentaux ont été développés. A un moment donné, le problème devient sur-contraint, il n'y a plus de solutions. On doit alors relâcher ou enlever une ou des contraintes pour revenir à un système sous-contraint. A la fin du processus de conception, on obtient un système bien contraint.

II.4. Application

II.4.1. Introduction

Dans cette application on tente de mettre en perspective l'utilisation des contraintes dans le processus de conception et en particulier d'appliquer les différentes approches qui sont décrits dans les paragraphes précédentes tel que les approches paramétrique et variationnelle, l'approche par features, l'approche déclarative et surtout la conception par satisfaction de contraintes.

Pour cela on a fait appel au fameux logiciel ayant des fonctionnalités très performantes qui est **Solidworks**.

II.4.2. Présentation de logiciel SolidWorks

Le logiciel SolidWorks est une application de conception mécanique qui tire partie de l'interface utilisateur graphique de Microsoft Windows.

Grâce à ce logiciel, les concepteurs peuvent esquisser rapidement une idée, expérimenter avec des fonctions et des cotes et produire des modèles et des mises en plan précis.

II.4.3. Performances majeurs du SolidWorks

SolidWorks adopte l'approche de modélisation 3D. Lorsque on fait la conception d'une pièce, on crée une entité 3D, de l'esquisse initiale jusqu'au modèle final.

A partir de cette entité 3D, nous pouvons créer des mises en plan 2D ou contraindre différents composants pour créer des assemblages 3D.

Nous pouvons aussi créer des mises en plan 2D d'assemblages 3D.

II.4.4. Intention de conception

L'intention de conception décrit la façon dont on souhaite faire réagir le modèle à tout changement qu'on souhaite y apporter.

L'intention de conception est avant tout une question de planification. L'approche adoptée pour créer le modèle détermine comment les changements y seront reflétés. Plus l'exécution de la conception respecte l'intention de conception, plus le modèle sera optimisé.

Plusieurs facteurs interviennent dans le processus de conception :

- _ Il est nécessaire de comprendre la finalité du modèle pour mieux le concevoir.

- _ Anticipez sur les exigences éventuelles pour réduire au minimum les efforts de reconception lorsque on modifie le modèle.

Le processus de conception passe par les étapes suivantes:

- Identification des besoins

- Conceptualisation du modèle sur la base des besoins identifiés

- Développement du modèle sur la base des concepts élaborés

- Analyse des résultats du développement du modèle

- Prototypage du modèle

- Construction du modèle

- Edition du modèle si nécessaire

II.4.5. Processus de conception appliqué

Une fois les besoins identifiés et les concepts appropriés élaborés, on peut développer le modèle en procédant comme suit:

II.4.5.1. Esquisses

La création d'un modèle commence par une esquisse. A partir de l'esquisse, on peut créer des fonctions. On peut combiner une ou plusieurs fonctions pour créer une pièce.

Ensuite, on peut combiner et contraindre les pièces appropriées pour créer un assemblage.

A partir des pièces ou des assemblages, on peut créer des mises en plan.

Une esquisse est un profil 2D ou une coupe transversale. Pour créer une esquisse 2D, on utilise un plan ou une face plane.

On se propose de faire la conception de la machine outil en partant de la broche et en plus particulier des dimensions normalisées de la broche.

Pour que notre démarche soit exacte et juste on ait fait appel aux dimensions normalisées extraites du guide de dessinateur industriel [CHEVALIER 04]. Les figures suivantes illustre cette idée.

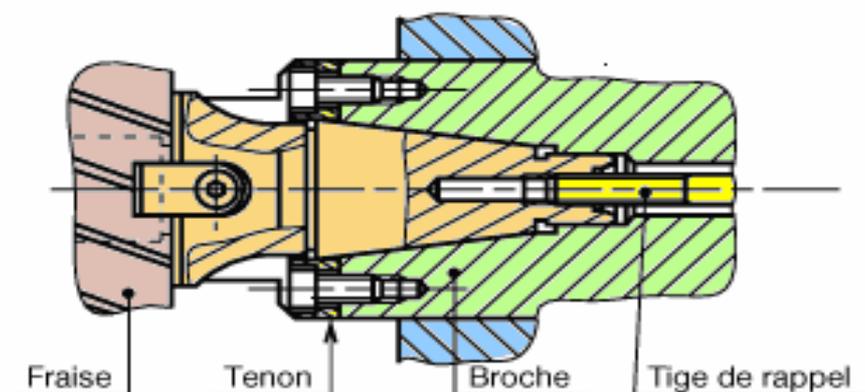


Figure II.1: les éléments de la broche

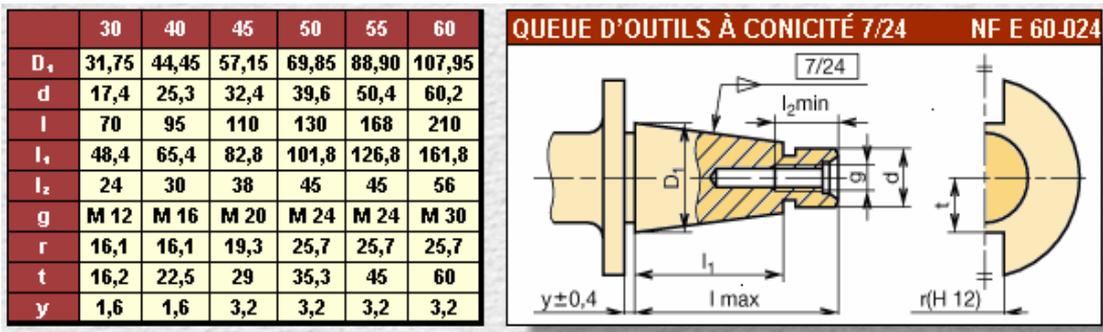


Figure II.2: Les dimensions normalisées de la queue d'outil

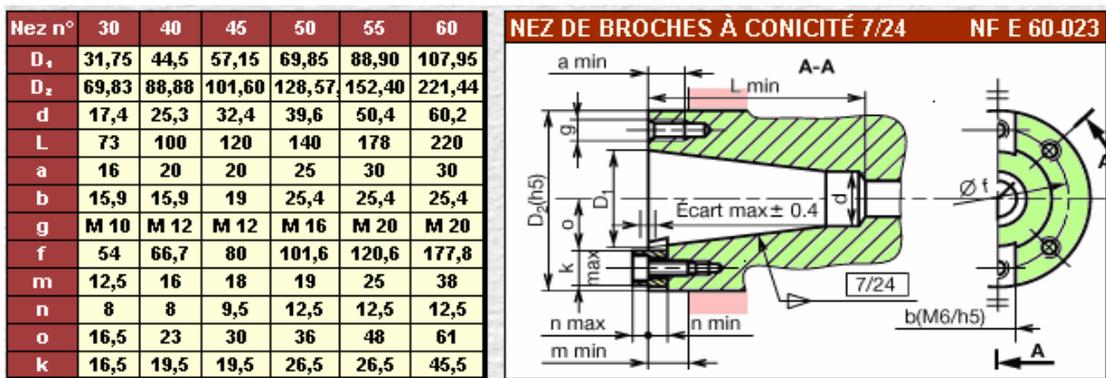


Figure II.3: Les dimensions normalisées du nez de la broche

On s'intéresse en premier temps à la configuration de la broche n° 50 (Figure II.2, Figure II.3) et ensuite on va généraliser la conception sur les autres configuration voire famille de pièces.

Il nous reste qu'à introduire ces données dans le logiciel Solidworks et obtenir les concepts suivants:



Figure II.4: Esquisse de la broche

II.4.5.2. Cotation

On peut spécifier des cotes et des relations géométriques entre les entités.

Les cotes définissent la longueur, le rayon, etc. Lorsque on modifie les cotes, la taille et la forme de la pièce changent.

On ajoute des dimensions à l'esquisse précédent on arrive à l'illustration suivante :

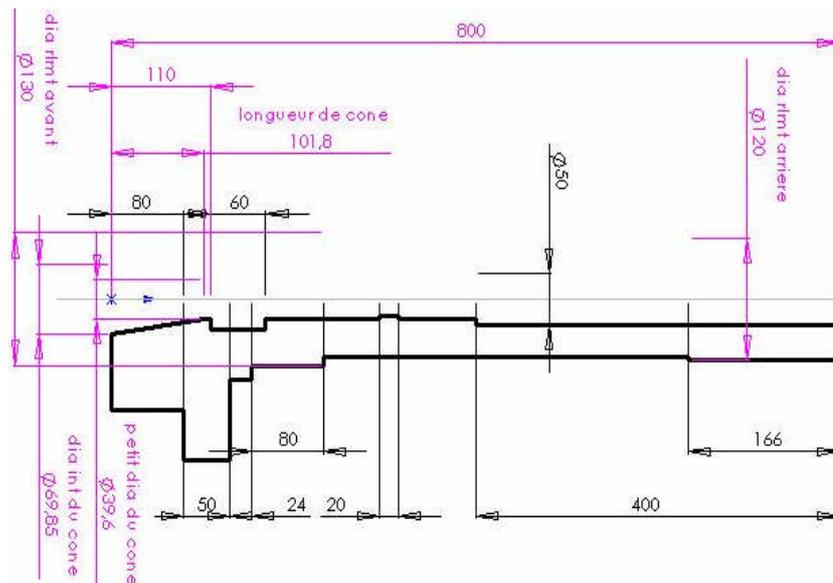


Figure II.5: cotation de la broche

Il est à noter que toutes les dimensions sont des variables, celles en rouge sont des dimensions liées qui peuvent être modifiées d'une configuration à une autre suivant notre besoin.

II.4.5.3. Fonctions

Une fois l'esquisse complétée, on peut créer un modèle 3D en utilisant des fonctions telles que l'extrusion et la révolution.

Certaines fonctions basées sur des esquisses présentent des formes particulières (bossages, enlèvements de matière, perçages, etc.).

D'autres, telles que les lissages et les balayages, utilisent un profil le long d'une trajectoire. D'autres encore sont des fonctions appliquées telles que les congés, les chanfreins et les coques. Toutes les pièces comprennent des fonctions basées sur des esquisses et la plupart comprennent des fonctions appliquées.

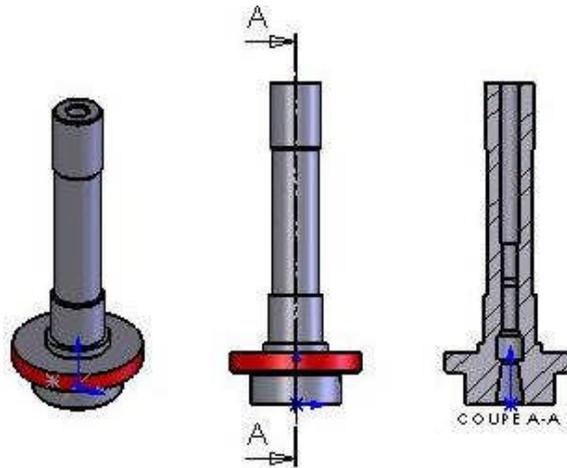


Figure II.6: fonction d'extrusion par rotation de la broche

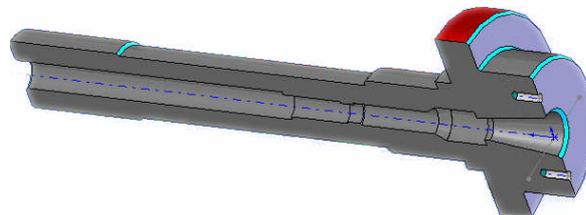


Figure II.7: Broche en coupe 3D

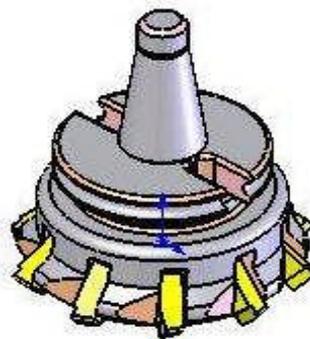


Figure II.8: conception de la fraise en 3D

II.4.5.4. Assemblages

On peut créer plusieurs pièces et les monter ensemble pour créer un assemblage.

On intègre des pièces dans un assemblage en utilisant des Contraintes qui sont des relations établissant des dépendances géométriques telles que (tangentes, Coïncidences, perpendicularités, Colinéarités etc.). Avec des outils tels que Déplacer le composant ou Faire pivoter le composant. On peut observer le fonctionnement des pièces dans un assemblage dans un contexte 3D.

Les contraintes positionnent avec précision les composants d'un assemblage les uns par rapport aux autres. Le positionnement des composants définit comment ces derniers se déplacent et pivotent les uns par rapport aux autres.

Le logiciel SolidWorks offre plusieurs outils d'assemblage qui permettent d'afficher, de tester et de mesurer les composants de l'assemblage lorsque on leur applique les contraintes. Notamment, ces outils nous permettent de: Montrer et cacher les composants, éclater l'assemblage, détecter les collisions entre les composants.

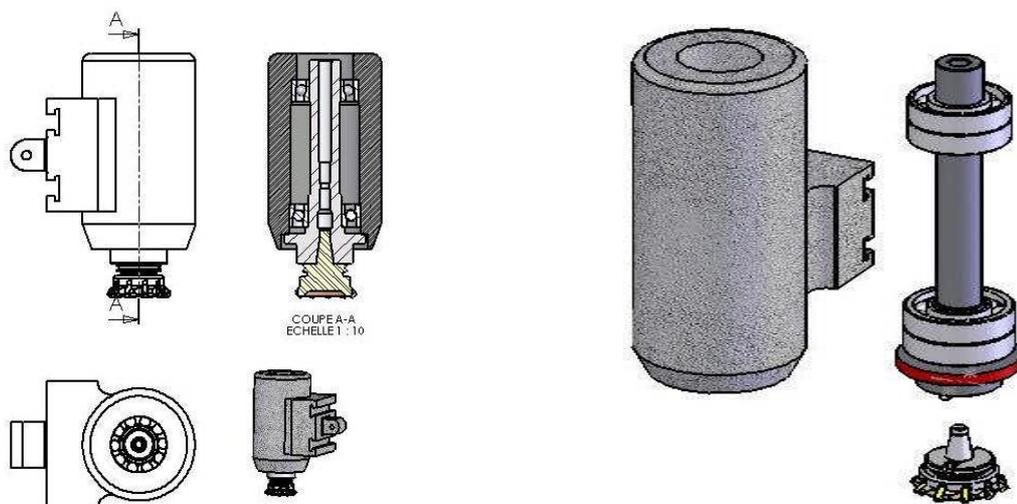


Figure II.9: Assemblage de la broche et sa forme éclaté

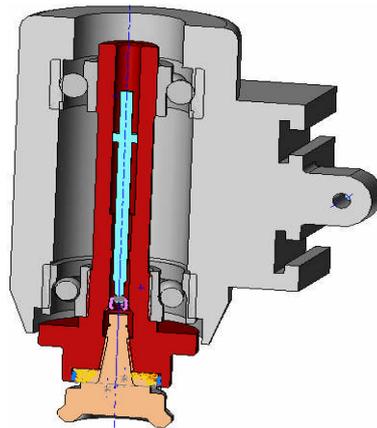


Figure II.10: Assemblage de la broche en coupe et en 3D

II.4.5.5. Mises en plan

Les mises en plan sont créées à partir de modèles de pièces ou d'assemblages.

Elles peuvent être affichées dans plusieurs vues: un ensemble de 3 vues standard, une vue isométrique (3D), etc. De plus, on peut y importer des cotes à partir du document de modèle, y ajouter des annotations telles que les symboles de cible de référence, etc.

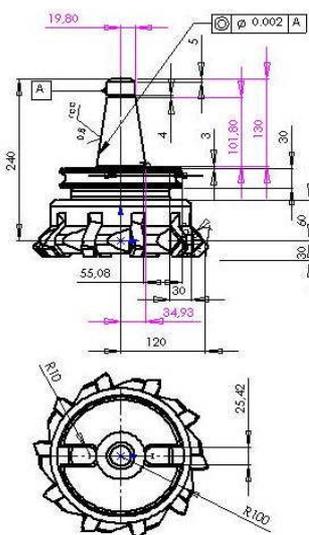


Figure II.11: Mise en plan de la Fraise

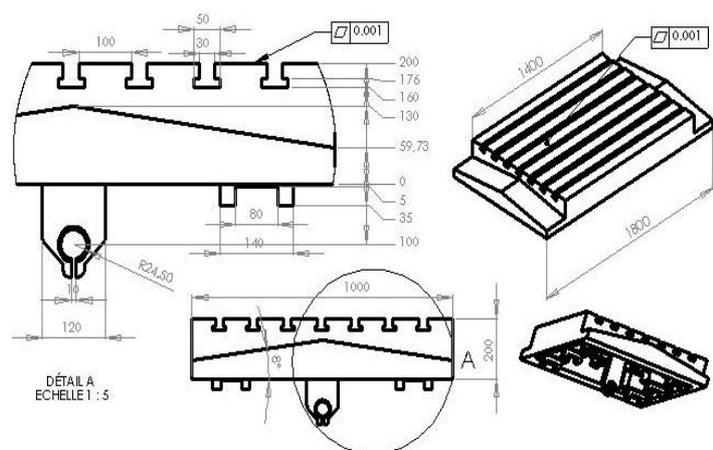


Figure II.12: Mise en plan de la Table

II.4.5.6. Familles de pièces

Les familles de pièces nous permettent de créer plusieurs configurations d'une même pièce en appliquant les valeurs saisies dans le tableau aux cotes de la pièce.

La famille de pièces suivante montre les paramètres utilisés pour créer les variantes normalisées de broche et porte fraise :

Famille de pièces pour la broche

	grand \varnothing de cône	petit \varnothing de cône	Longueur de cône	Longueur de cône	\varnothing de Rlmt inférieur	\varnothing Rlmt supérieur	longueur tot de Broche
ISO 30	31,75	17,4	48,4	73	120	110	600
ISO 40	44,45	25,3	65,4	100	120	110	640
ISO 45	57,15	32,4	82,8	120	120	110	700
ISO 50	69,85	39,6	101,8	140	130	120	960
ISO 55	88,9	50,4	126,8	178	150	140	1100
ISO 60	108	60,2	161,8	220	220	200	1200

Famille de pièces pour le porte fraise

	grand \varnothing de cône	petit \varnothing de cône	longueur de cône	longueur de cône
ISO 30	31,75/2	17,4/2	48,4	70
ISO 40	44,45/2	25,3/2	65,4	95
ISO 45	57,15/2	32,4/2	82,8	110
ISO 50	69,85/2	39,6/2	101,8	130
ISO 55	88,9/2	50,4/2	126,8	168
ISO 60	107,95/2	60,2/2	161,8	210

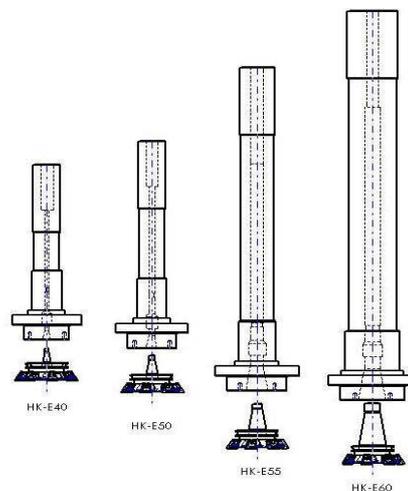


Figure II.13: Famille de pièces (Broche et Fraise)

Enfin on arrive à construire une Machine outil complète

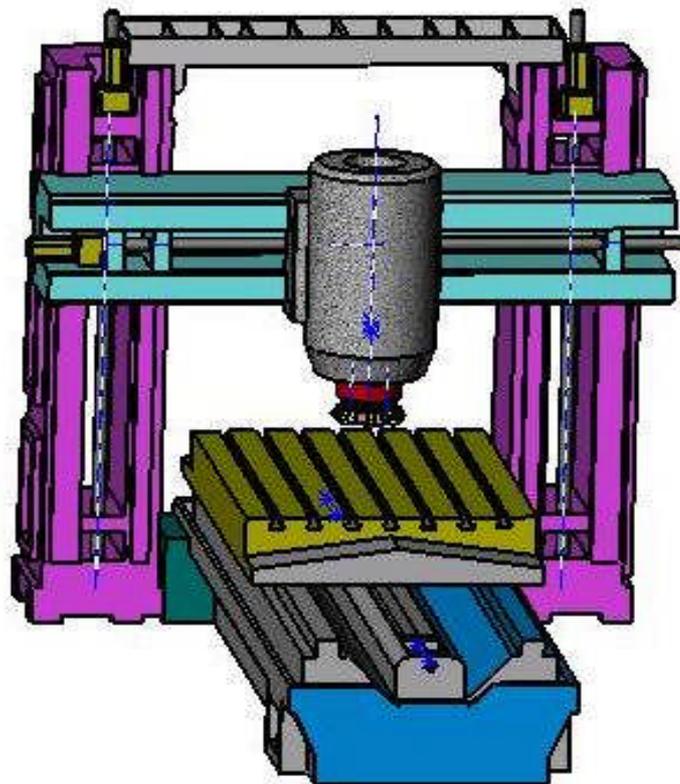


Figure II.14: Machine outil verticale a banc fixe

En suivant la même démarche de conception d'une machine à C.N (3 axes) on réalise la conception d'un centre d'usinage à 5 axes

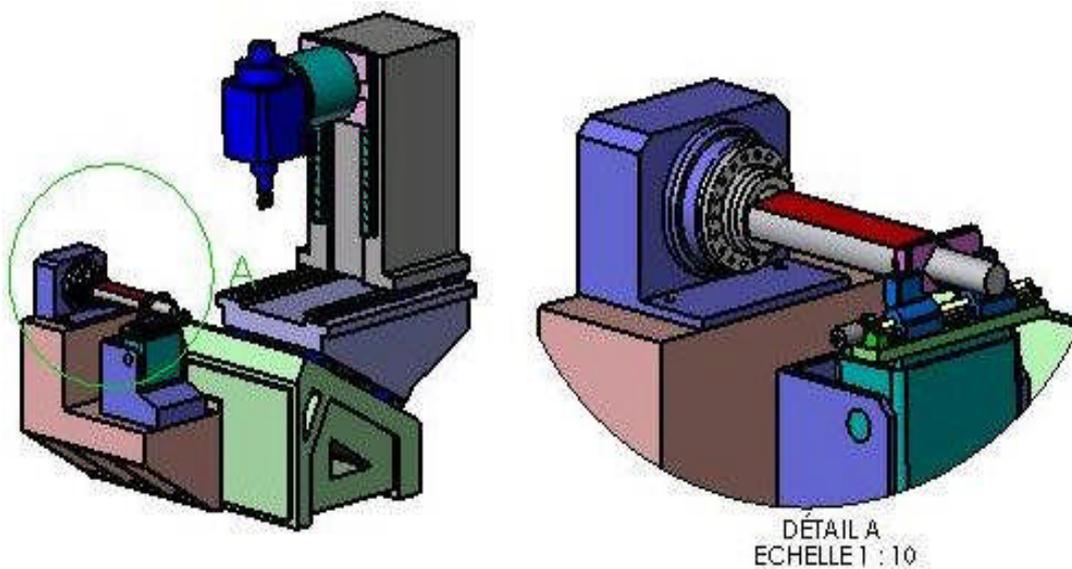


Figure II.15: Centre D'usinage à cinq axes

Ensuite un centre d'usinage avec palettisation de pièces

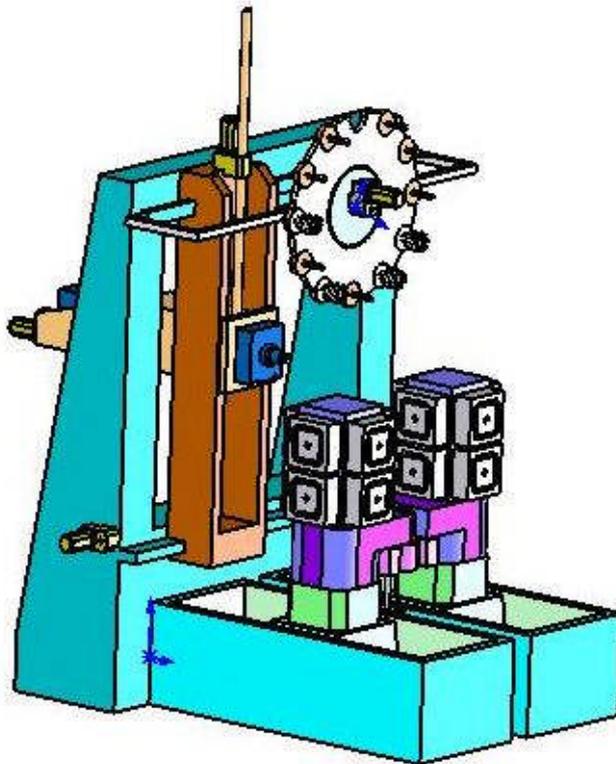


Figure II.16: Centre D'usinage DUPLEX avec palettisation de pièces

II.4.6. Conclusion

La conception d'un objet physique est vue dans ce chapitre d'abord comme un processus d'élaboration de contraintes sachant que toute propriété peut se traduire par des contraintes. La conception devient alors un processus de satisfaction de contraintes. Nous avons avancé aussi que ces contraintes s'expriment enfin par des contraintes géométriques. Nous avons suivi le fil de l'évolution des logiciels de CAO : du DAO vers une véritable aide à la conception. L'apport de ce chapitre est de montrer que le concept de contrainte est indispensable pour obtenir ce véritable outil de conception. Cette approche conceptuelle de la modélisation s'ouvre sur la représentation des connaissances étudiée ces 20 dernières années en intelligence artificielle et en sciences

cognitives. L'application la plus utilisée aujourd'hui en informatique est la représentation des connaissances par objets.

Et ce type de représentation par objets s'est beaucoup plus développé à l'heure actuelle que les représentations s'exprimant directement en logique mathématique (logique des propositions, des prédicats ...).

La représentation des connaissances spatiales est étudiée depuis 10 ans [Jeansoulin 96],[Ligozat 93] alors que la représentation des connaissances temporelles depuis 20 ans. Les 13 relations temporelles ont été identifiées par Allen en 1981 [Allen 81] et les 8 relations spatiales (RCC-8) par [Maculelet 91] et par Randell, Cui et Cohn [(RCC) 92]. La description d'un cheminement ou d'un objet pour une implémentation informatique est l'un des enjeux de ce domaine. [Simon 74] n'avait-il pas écrit :

«... la représentation de l'espace et des objets dans l'espace sera un des thèmes centraux de la science de la conception » ?

CHAPITRE III

ETUDE STATIQUE DE LA MACHINE OUTIL

III. Etude statique de la machine outil

III.1. Théorie de rigidité de la machine outil

Les déformations de la pièce et de la machine dépendront évidemment de leur rigidité et en particulier de leur rigidité relative. Nous montrerons que la «qualité» d'un usinage dépend pour l'essentiel de la rigidité relative pièce/outil.

En effet, il est facile de voir que cette qualité est fonction de la rigidité des différents éléments de la machine, mis en série selon la figure III.1

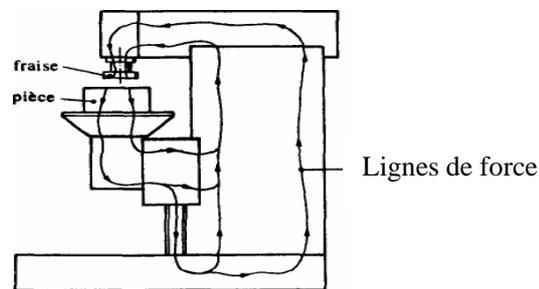


Figure III.1 : Rigidité relative pièce/outil (lignes des forces de coupe)

Le seul moyen d'arriver à une machine viable et de comportement prévisible était de faire en sorte que la rigidité de l'ensemble de la machine soit d'un ordre de grandeur (en tout cas au moins cinq fois) supérieur à celle de la broche au droit de l'outil. **[PRUVOT 93]**

Nous admettrons que la rigidité de l'ensemble de la structure est très grande par rapport à celle de la broche.

En d'autres termes, nous pouvons considérer la broche comme seul élément déformable de la machine; elle sera donc en première approximation seule responsable des incidences de la flexibilité sur les surfaces usinées.

III.2. Analyse algébrique

III.2.1. Modèle d'une broche

Les paliers de broche A et B sont modélisés par des appuis simples. La broche elle-même est une poutre élancée. Elle peut être à moment d'inertie constant ou variable sur la longueur.

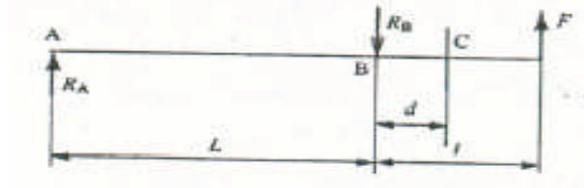


Figure III.2 : Modèle statique de la broche

III.3. Déformation de la broche sous l'effet des forces de coupe

III.3.1. Flèche due à la broche elle-même

Nous supposons d'abord (fig. III.3) que les paliers sont infiniment rigides.

La broche est chargée par une force F située à la distance l du palier avant.

Nous ne prendrons en compte que la flèche f_{tot1} due à la broche elle-même; f_{p0} est la flèche propre au porte-outil. Dans le cas du fraisage, la fraise à surfacer est de grand diamètre par rapport à la broche et sa flèche propre sera entièrement négligeable.

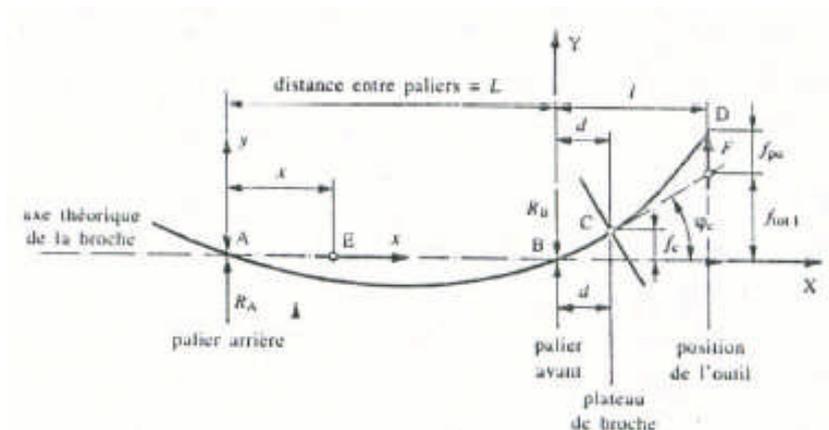


Figure III.3 : Déformation de la broche

Les réactions aux appuis sont:

$$R_A = \frac{Fl}{L} \quad , \quad R_B = \frac{-F(l+L)}{L} \quad \text{III.1}$$

Appliquons l'équation de la ligne élastique entre A et B. On trouve la rotation de la section B

$$\varphi_B = \frac{FlL}{3EI} \quad \text{III.2}$$

Appliquons l'équation de la ligne élastique entre B et C en supposant ce tronçon encastré en B (C, qui représente le plateau de broche, est à la distance d du palier avant B) on trouve :

$$f_c' = \frac{Fd^2}{2EI} \left(l - \frac{d}{3} \right) \quad , \quad \varphi_c' = \frac{F}{EI} \left(ld - \frac{d^2}{2} \right) \quad \text{III.3}$$

Nous pouvons alors calculer la flèche f_c , rotation φ_c , du plateau

$$\varphi_c = \varphi_B + \varphi_c' = \frac{F}{EI} \left(\frac{lL}{3} + ld - \frac{d^2}{2} \right) \quad \text{III.4}$$

$$f_c = f_c' + \varphi_B d = \frac{Fd^2}{2EI} \left(l - \frac{d}{3} \right) + \frac{FlL}{3EI} d \quad \text{III.5}$$

$$f_c = \frac{Fd}{EI} \left(\frac{ld}{2} - \frac{d^2}{6} + \frac{lL}{3} \right) \quad \text{III.6}$$

D'où nous pouvons tirer la flèche due à la broche au droit de l'outil :

$$f_{tot1} = f_c + \varphi_c (l-d) \quad \text{III.7}$$

$$f_{tot1} = \frac{F}{3EI} (d^3 + l^2L + 3l^2d - 3ld^2) \quad \text{III.8}$$

III.3.2. Déformation de cisaillement

Les broches de machines-outils sont, dans la plupart des cas, des poutres courtes. Les déformations de cisaillement peuvent alors ne plus être absolument négligeables par rapport aux déformations de flexion.

Là encore, nous ne tiendrons compte que des déformations de la broche, à l'exclusion de celles du porte-outil.

Pour simplifier le calcul, nous allons admettre que le cisaillement est limité à la partie de la broche qui se trouve entre les paliers.

La réaction du palier arrière étant $R_A = \frac{F.l}{L}$

La déformée de cisaillement sera donc une droite dont la pente sera :

$$\varphi'_B = \eta \frac{R_A}{S.G} \quad \varphi'_B = \eta \frac{F.l}{L.S.G} \quad \text{III.9}$$

Où η = facteur de section = 4/3 à 3 pour un cylindre,

G = module de glissement,

S = section de la broche,

D'où la flèche au droit de l'outil :

$$f'_1 = \varphi'_B.l \quad f'_1 = \eta \frac{F.l^2}{L.S.G} \quad \text{III.10}$$

III.3.3. Flèche due aux paliers

On considère la broche comme indéformable (fig. III.4).

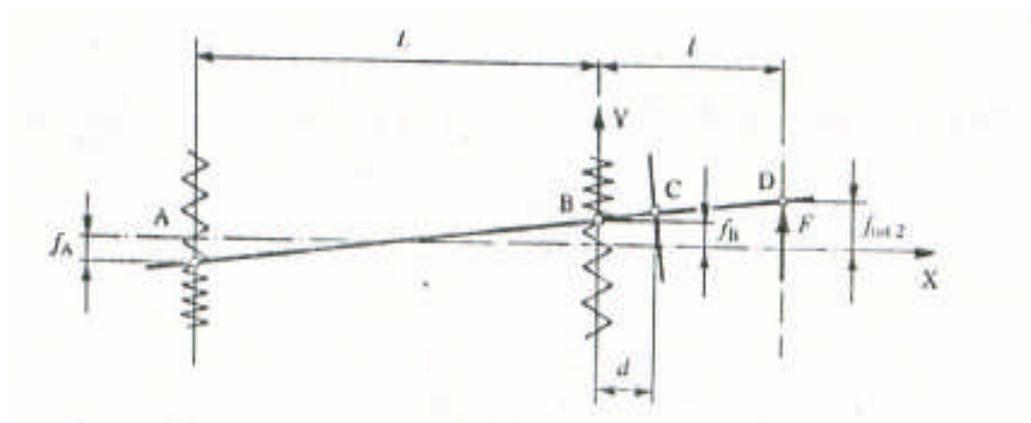


Figure III.4 : Flèche à l'outil due à la flexibilité des paliers

En appelant p la pente de la broche sous l'effet de la force F , et k_A et k_B , respectivement, les rigidités des paliers arrière et avant, on obtient :

$$p = \frac{F}{L^2} \left(\frac{L+l}{k_B} + \frac{l}{k_A} \right) \quad \text{III.11}$$

D'où

$$f_{tot2} = \frac{F}{L^2 k_A k_B} \left(k_A (L+l)^2 + l^2 k_B \right) \quad \text{III.12}$$

III.3.4. Flèche totale au droit de l'outil

On aura, puisque nous avons admis la superposition linéaire des déformations :

$$f_{tot} = f_{tot1} + f_1' + f_{tot2} \quad \text{III.13}$$

Ce qui s'écrit :

$$f_{tot} = F \left\{ \frac{1}{3EI} (d^3 + l^2 L + 3l^2 d - 3ld^2) + \frac{\eta l^2}{LGS} + \frac{1}{L^2 k_A k_B} (k_A (L+l)^2 + l^2 k_B) \right\} \quad \text{III.14}$$

Il en sera de même pour la rotation de section au point C. On aura :

$$\varphi_{ctot} = F \left\{ \frac{1}{6EI} (2lL + 6ld - 3d^2) + \frac{\eta}{LGS} + \frac{1}{L^2 k_A k_B} (k_A (L+l) + k_B l) \right\} \quad \text{III.15}$$

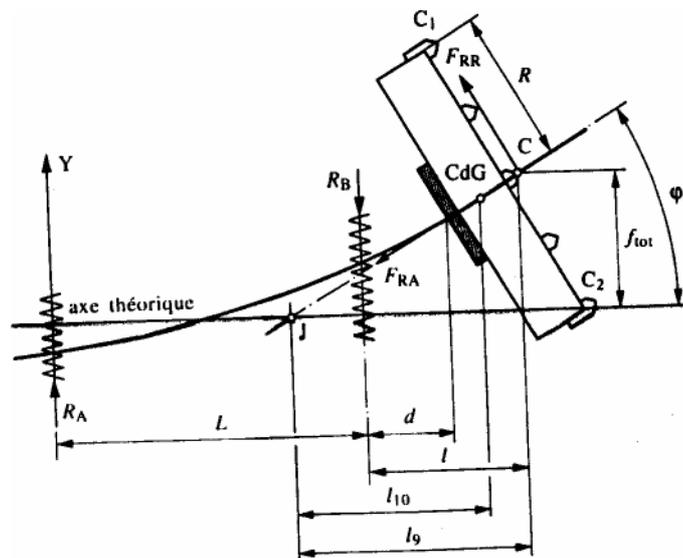


Figure III.5 : Flèche totale de la broche

La figure III.6 représente la vue de droite de l'ensemble.

La figure III.7 représente la décomposition de la force de coupe agissant sur une dent.

Nous admettrons que la résultante des forces de coupe se décompose en une force axiale F_{RA} et une force radiale F_{RR} , que l'on supposera perpendiculaire au déplacement de la fraise pendant l'usinage (fig. III.6). On voit donc que, du fait de la flexibilité axiale des paliers de broche (et aussi, pour une faible part, de la compression de la broche elle-même), F_{RA} engendrera un déplacement de la fraise suivant l'axe OX, alors que F_{RR} , du fait de la flexibilité radiale des paliers de broche et de la broche elle-même, fera avec l'axe théorique de broche un angle $\left[\frac{\pi}{2} - \varphi_c + p \right]$.

Tout cela peut se voir et se comprendre à partir de la figure III.5 que nous avons vue précédemment. On conçoit donc qu'une variation des forces de coupe engendre un défaut de planéité de la surface usinée.

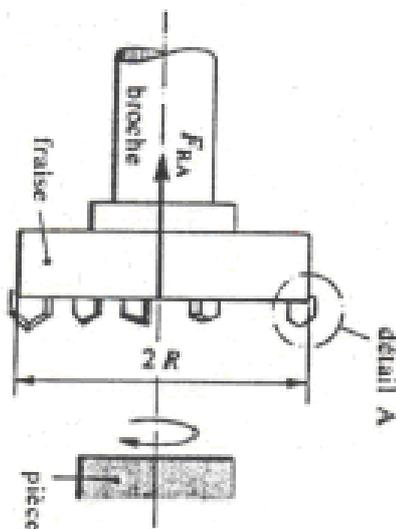


Figure III.6 : Fraisage de surfacage

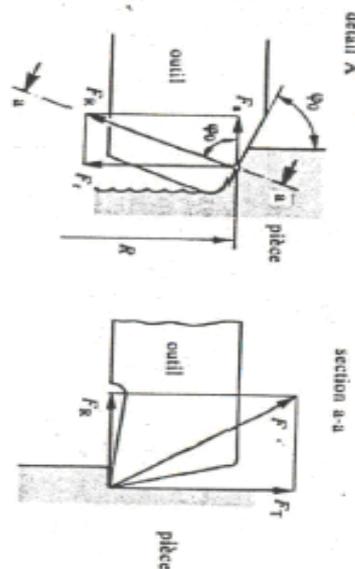


Figure III.7 : Les forces agissantes sur l'outil

III.3.5. Déplacement axial de la broche

F_{RA} étant la force axiale agissant sur la broche et k_{axial} la rigidité axiale du système de paliers, on aura le déplacement axial de la surface

$$\delta_{axial} = \frac{F_{RA}}{k_{axial}} \quad \text{III.16}$$

On admettra, en première approximation, que F_{RA} est égale à la force de répulsion totale de coupe (somme des forces de répulsion de chacune des dents) multiplié par le cosinus de l'angle d'attaque des dents φ_0 (fig. III.7).

III.3.6. Flexion de la broche

La cote notée $\delta_{angulaire}$ sur la figure III.8. Vaudra, à l'évidence :

$$\delta_{angulaire} = \varphi_{tot} \frac{L_0}{2} \quad \text{III.17}$$

Où L_0 est la largeur de la pièce fraisée.

On aura alors :

$$\delta_{angulaire} = F \frac{L_0}{2} \left\{ \frac{1}{6EI} (2lL + 6ld - 3d^2) + \frac{\eta}{LGS} + \frac{1}{L^2 k_A k_B} (k_A (L+l) + k_B l) \right\} \quad \text{III.18}$$

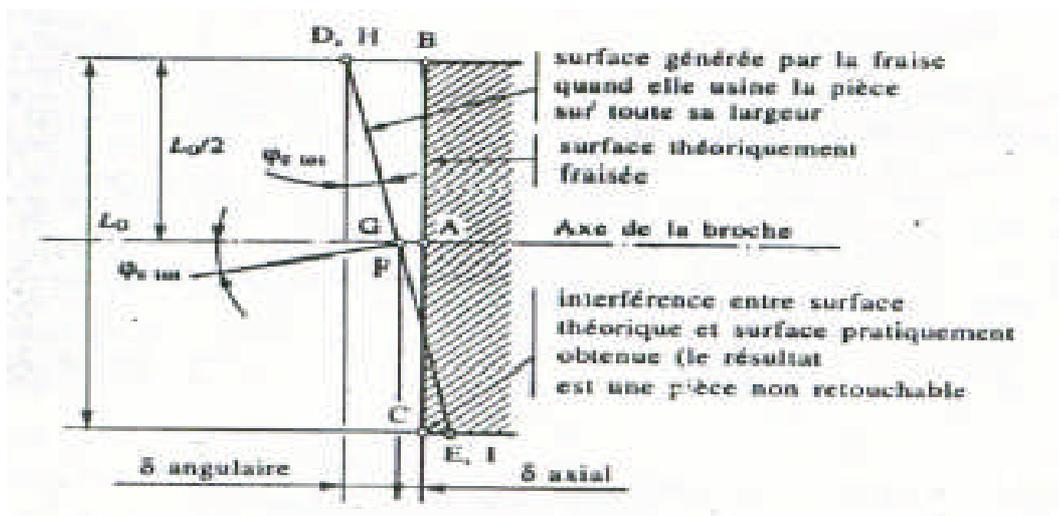


Figure III.8 : surface théorique et surface fraisée réelle

III.3.7. Défaut de planéité

L'angle φ_{ctot} étant très petit ($\cos \varphi_{\text{ctot}} = 1$), il est alors facile de voir que le défaut de planéité sera sensiblement $\delta_{\text{angulaire}}$.

En effet, l'écart de la surface fraisée par rapport à un plan moyen est bien

$$\frac{(\delta_{\text{angulaire}} + \delta_{\text{axial}}) + (\delta_{\text{angulaire}} - \delta_{\text{axial}})}{2} \quad \text{III.19}$$

$$\delta_{\text{planeité}} = \delta_{\text{angulaire}} \quad \text{III.20}$$

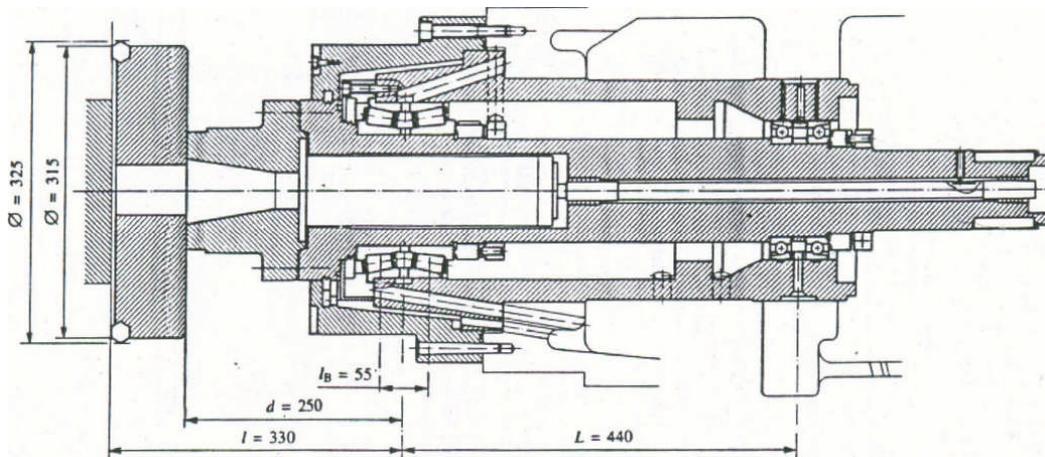


Figure III.9 : Broche DIXI

III.4. Longueur optimale d'une broche

Dans cette section on suppose que la broche n'existe pas et on va essayer de trouver la longueur optimale de la broche.

L'expression (III.14) de la flèche due à la broche s'écrit:

$$f_{\text{tot}} = F \left\{ \frac{1}{3EI} (d^3 + l^2 L + 3l^2 d - 3ld^2) + \frac{\eta l^2}{LGS} + \frac{1}{L^2 k_A k_B} (k_A (L+l)^2 + l^2 k_B l) \right\}$$

Nous allons admettre, dans un premier temps, que les choix technologiques principaux sont faits, en particulier celui des paliers. Pour une construction traditionnelle, il est clair qu'on n'a guère de liberté de manœuvre.

d ne dépend pratiquement que du type de roulement choisi et du procédé d'assemblage entre porte-outil et broche

E et G , modules d'élasticité du matériau composant la broche.

De nos jours, sans exception, toutes les broches sont faites en acier.

$$E=2.1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2, \quad G=8.108 \text{ N/m}^2$$

I , dans l'état actuel de nos connaissances, est entièrement défini par le diamètre intérieur des roulements et donc par D le diamètre de broche

$$I = \frac{\pi D^4}{64} .$$

k. Nous avons choisi, dès le départ, le type de palier utilisé. Nous ne pouvons donc plus jouer sur k dès que le diamètre de broche est choisi. $k=10^8 \text{ N/m}$

Au total, il apparaît que L seul, distance entre les paliers de la broche, peut être considéré comme une variable.

Facteur de section $\eta=2$

III.4.1. calcul analytique des inconnues

III.4.1.1. Calcul des efforts de coupe appliqués a la fraise usinant une pièce en ébauche

Données

On veut usiner en ébauche un acier de 60 daN/mm^2 de résistance ultime ;

On dispose d'une fraiseuse ayant une puissance de 30 kw

Fraise : le diamètre extérieur $D=250 \text{ mm}$;

Nombre de dents $z=10$ et l'Angle d'attaque $\varphi = 45^\circ$

Pièce à usiner : Largeur $l=200\text{mm}$, matière Acier $R=600\text{ daN/mm}^2$

Usinage : Profondeur de passe $h=6\text{mm}$, Avance par dent $a=0.7\text{ mm}$

Paramètres de coupe [PRUVOT 93]

$$\text{Nombre de dents en prise } n = ? \quad \alpha = 2\text{Arc sin} \frac{l}{D} = 106^\circ \Rightarrow n = \frac{z \alpha}{360} = 2.95 \approx 3 \text{ dents}$$

$$\text{Section de copeau par dent : } s = h.a = 6.0,7 = 4.2 \text{ mm}^2$$

$$\text{La pression spécifique tangentielle } K_t = 153.64 \text{ daN/mm}^2 = 1536.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{La pression spécifique de répulsion } K_R \text{ est } K_R = 75.58 \text{ daN/mm}^2 = 755.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Force tangentielle par dent } F_T = K_t \times S = 1536.4 \times 4.2 = \mathbf{6453 \text{ N}} \quad \text{III .22}$$

La Force tangentielle s'applique perpendiculairement aux surfaces d'attaque des dents en prise

$$\text{Force de répulsion par dent : } F_R = K_R \times S = 755.8 \times 4.2 = \mathbf{3174 \text{ N}} \quad \text{III .23}$$

Décomposition de Force de répulsion :

$$\text{Force axiale } F_{Ra}: F_{Ra} = F_R \times \cos \varphi = 3174 \times \cos 45 = 2244 \text{ N}$$

La Force axiale s'applique sur l'arrête tranchante parallèlement à l'axe de la fraise

$$\text{Force radiale } F_{Rr}: F_{Rr} = F_R \times \sin \varphi = 3174 \times \sin 45 = 2244 \text{ N}$$

La Force radiale s'applique sur l'arrête tranchante perpendiculairement à l'axe de la fraise

III.4.1.2 Calcul des efforts de coupe appliqués à la fraise usinant une pièce en finition

Par la même façon on calcul les efforts de coupe en finition

Données

Avance par dent $a=0.1\text{mm/dent}$, Profondeur de passe $h=0.5\text{ mm}$

$$\text{Section de copeau par dent } S = h \times a = 0.5 \times 0.1 = 0.05 \text{ mm}^2$$

Force tangentielle par dent

$$F_T = K_t \times S = 2646 \times 0.05 = 132.3 \text{ N} \quad \text{III.24}$$

Force de répulsion par dent

$$F_R = K_R \times S = 1763.5 \times 0.05 = 88.2 \text{ N} \quad \text{III.25}$$

Décomposition de Force de répulsion

$$\text{Force axiale : } F_{Ra} = F_R \times \cos \varphi = 88.2 \times \cos 45 = 62.35 \text{ N}$$

$$\text{Force radiale : } F_{Rr} = F_R \times \sin \varphi = 88.2 \times \sin 45 = 62.35 \text{ N}$$

III.4.2. calcul analytique de longueur optimale L

L'équation finale de la flèche total de la broche en fonction de sa longueur

(III.14) est :

$$f_{tot} = F \left\{ \frac{1}{3EI} (d^3 + l^2L + 3l^2d - 3ld^2) + \frac{\eta l^2}{LGS} + \frac{1}{L^2 k_A k_B} (k_A (L+l)^2 + l^2 k_B l) \right\}$$

La force tangentielle $F=6453 \text{ N}$ (d'après III.22).

Distance du plateau de broche au palier avant $d=0.250 \text{ m}$ (Pruvot 93)

Distance de l'outil au palier avant $l=0.330 \text{ m}$ (Pruvot 93)

Diamètre de la broche au niveau de palier $D=0.130 \text{ m}$ (d'après la Figure II.3)

$$\text{La section de la broche } S = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{mm}^2$$

Après la substitution on aura :

$$f(L) = 7.96 \times 10^{-5} L + \frac{1.32 \times 10^{-6}}{L} + \frac{6.45 \times 10^{-5}}{L^2} [(L+0.33)^2 + 0.1] + 2.59 \times 10^{-5}$$

Dérivons $f(L)$ par rapport à L , il vient :

$$\frac{d}{dL} f(L) = \frac{1}{L^3} [-1.29 \times 10^{-4} (L+0.33)^2 - 1.4 \times 10^{-5}] - \frac{1.32 \times 10^{-1}}{L} + \frac{1}{L^2} (1.29 \times 10^{-4} L + 4.26 \times 10^{-5}) + 7.96 \times 10^{-5}$$

Annulons la dérivée $\frac{d}{dL} f(L) = 0$

La solution analytique de l'équation est:

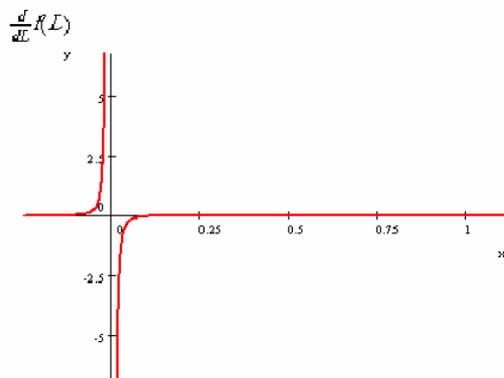
-0.47964 - 0.3718i , -0.47964+0.3718i , 0.959.29

On ne retiens ici que la solution réelle $L=0.95929 \text{ m} = \mathbf{959.29 \text{ mm}}$

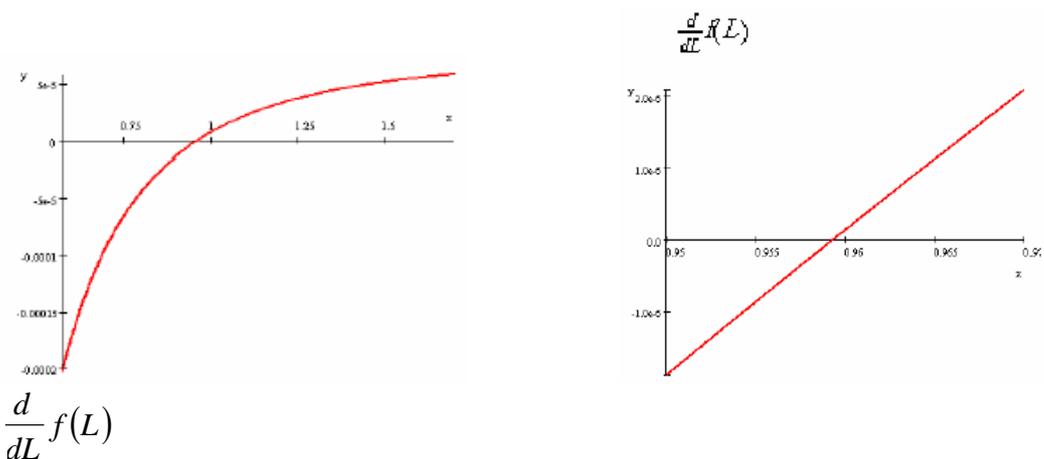
Donc la valeur optimale de la longueur L est 959.29 mm

Autrement on peut déduire la valeur de L graphiquement comme suit :

III.4.3. calcul graphique de longueur optimale L



On va focaliser sur la valeur minimale de la flèche pour obtenir la longueur optimum de la broche ensuite on va faire un zoom sur l'intersection on aura



On constate l'égalité des valeurs graphique et analytique

La valeur de **L** correspondante est donc la longueur optimale de la broche pour laquelle sa rigidité sera maximale.

III.6. Calcul de la broche par la méthode des éléments finis

III.6.1. Pourquoi faire des calculs?

Après avoir créé la pièce dans SolidWorks, il voudra peut-être répondre à des questions, telles que:

- Ma pièce va-t-elle résister?
- Va-t-elle beaucoup se déformer?
- Puis-je utiliser moins de matière sans pour autant diminuer la performance?

Sans outil de calcul, ces questions ne peuvent trouver des réponses qu'en effectuant des cycles de développement longs et coûteux.

Un cycle de développement de produit comprend généralement:

- La création du modèle dans le système de CAO SolidWorks.
- La fabrication d'un prototype.
- Le test du prototype dans les conditions d'utilisation.
- L'analyse des résultats des tests.
- La modification de la conception sur la base des enseignements des tests.

Ce processus continue jusqu'à ce qu'une solution acceptable soit trouvée.

Le calcul peut donc aider à :

- Réduire les coûts en testant les produits sur ordinateur plutôt que lors de tests réels longs et chers.

- Réduire le temps de développement en réduisant le nombre de cycles de développement.
- Optimiser les produits en simulant rapidement de nombreux designs et scénarios avant de prendre une décision finale, ce qui nous permet d'explorer plus de solutions potentielles.

III.6.2. Analyse statique

L'analyse statique, calcule les déplacements, les déformations et les contraintes dans une pièce faite en un matériau donné, sous l'action de chargements et de blocages. Un matériau cède lorsque les contraintes atteignent un certain niveau. COSMOSWorks utilise l'analyse statique linéaire, basée sur la méthode des éléments finis pour calculer les contraintes.

III.6.3. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) est une technique numérique fiable pour analyser les problèmes d'ingénierie. Elle remplace un problème extrêmement complexe par un grand nombre de problèmes simples. Elle consiste à diviser la géométrie complexe du modèle en petites entités appelées éléments.

D'une façon générale, les grandes phases d'un calcul sont les suivantes:

- Définition 3D de la géométrie de la pièce à étudier ;
- Introduire les forces de coupe qui se décomposent en une force tangentielle F_t et une force de répulsion F_r , appliquées sur chaque dent de la fraise.
- Opération de « maillage » de la pièce, en s'appuyant sur la géométrie réalisée auparavant; C'est l'opération qui consiste à diviser une structure

complexe en multiples parties simples : les éléments ;

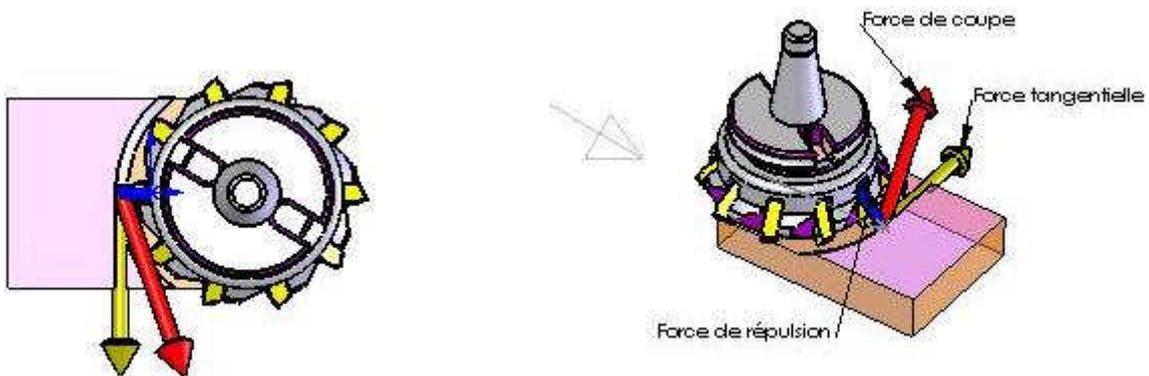
- Application des chargements : efforts extérieurs, pressions, déplacements imposés. En même temps, on applique les conditions limites ;
- Phase de calcul proprement dite ;
- Analyse des résultats de calcul, conduisant à la qualification de la pièce du point de vue théorique ou bien à une reprise de la géométrie de la pièce pour de nouveaux calculs.

III.6.4. Calcul des déplacements sur la broche sollicité

On rappelle qu'on a appliqué sur chaque dent de la fraise en travail :

Une Force tangentielle par dent : $F_T = 6453 \text{ N}$ III .22

Une Force de répulsion par dent : $F_R = 3174 \text{ N}$ III .23



Pour confirmer l'optimisation de choix et de calculs des dimensions de la broche on a fait appelle à un logiciel qui utilise la modélisation par élément finis qui est **CosmosWorks** , dont on a introduit les données pour obtenir les résultats suivants de contraintes et de déformations de la broche sous forme d'un rapport:

1. Matériaux

No.	Nom de la pièce	Matériaux	Masse	volumique
1	bague120	AISI 1020	42,9113 kg	0,00543181 m ³
2	bague130	AISI 1020	76,3171 kg	0,0096604 m ³
3	broche	AISI 1020	144,638 kg	0,0183087 m ³
4	chariot porte broche	AISI 1020	1301,36 kg	0,164729 m ³
5	fraise à surfacer	AISI 1020	28,67 kg	0,00362912 m ³

Tableau III.1. Matériaux

2. Informations sur les chargements et les déplacements imposés

Force 1 <fraise à surfacer>	sur 3 Faces appliquer une force normale 6453 N avec une distribution uniforme
Force 2 <fraise à surfacer>	sur 3 Arêtes appliquer force -3174 N Normal au plan selon le plan de référence sélectionné Arête< 1 > avec une distribution uniforme

Tableau III.2. Les chargements et les déplacements imposés

3. Propriété d'étude

Informations sur le maillage	
Type de maillage:	Maillage volumique
Taille de l'élément:	50,59 mm
Tolérance:	2,5295 mm
Nombre d'éléments:	195956
Nombre de noeuds:	287842

Tableau III.3. Propriété d'étude

4. Contraintes

Type	Max	Emplacement
contrainte de von Mises	3,57495e+008N/m ² Noeud: 245969	(-81,5542 mm,-762,388 mm, 459,064 mm)

Tableau III.4. Contraintes

5. Déformations

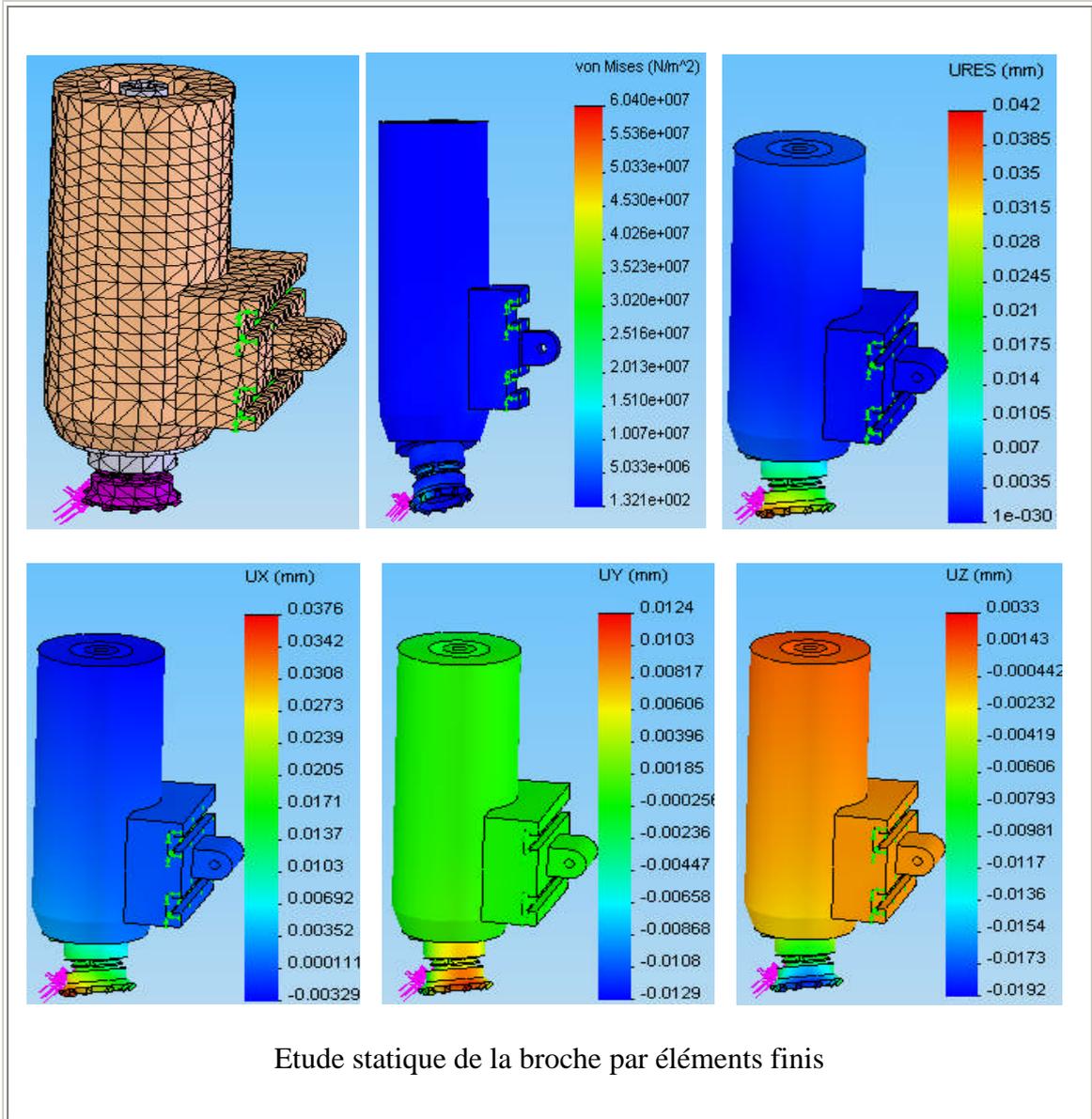
Type	Max	Emplacement
ESTRN: Déformation équivalente	0,000380475 Elément: 186615	(68,3055 mm,-761,628 mm, 464,765 mm)

Tableau III.5. Déformations

6. Déplacements

Type de déplacement	Max	Emplacement
UX: Déplacement Suivant l'axe X	0.0375593 mm Noeud: 16314	(-11.4363 mm,-578.969 mm, 470.693 mm)
UY: Déplacement Suivant l'axe Y	0.0123817 mm Noeud: 16343	(124.207 mm,-561.388 mm, 327.792 mm)
UZ: Déplacement Suivant l'axe Z	0.00330349 mm Noeud: 4099	(-158.522 mm,-319 mm, 348.688 mm)
URES: Déplacement résultant	0.041975 mm Noeud: 16311	(69.0133 mm,-561.388 mm, 468.175 mm)

Tableau III.6. Déplacements



III.7. Conclusion

On voit donc que du fait de la flexibilité axiale des paliers de broche (et aussi, pour une faible part, de la compression de la broche elle-même),

Fa engendrera un déplacement de la fraise suivant l'axe OX alors que F_r , de fait de la flexibilité radiale des paliers de broche et de la broche elle-même, fera avec l'axe théorique de broche un angle δ .

Dans ces travaux PRUVOT [PRUVOT 93] a fait le calcul de la rigidité de la broche, il a déduit que le défaut de planéité de la broche d'une fraiseuse existante DEXI 400 ; est de l'ordre de 0.137 mm en ébauche .

Dans le paragraphe **III.3.4**. On a essayé d'exploiter l'équation générale de rigidité **III.14** et après la résolution on est arrivé à trouver la longueur optimale de la broche qui est 959 mm; cette valeur de longueur de la broche lui confère un défaut de planéité égal à 0.037 mm.

Ce qui revient à déduire que cette valeur est minimal en comparaison avec la valeur calculée par PRUVOT. [PRUVOT 93]

En finition on obtient le résultat suivant :

Le déplacement maximal de la fraise pendant l'usinage à la finition est:

$$U_{res} = 0.0008 \text{ mm}$$

On constate que cette valeur est très satisfaisante

Alors les dimensions choisit de la broche sont optimales.

Conclusion générale

La conception des machines-outils est devenue un critère de qualité d'une importance capitale pour les recherches scientifiques.

Le travail effectué dans le cadre de cette thèse a d'abord mis en évidence que la conception assisté par ordinateur et le calcul par éléments finis; des contraintes et des déformations en différents points de la structure à permis de mettre en œuvre de nouvelles méthodes qui permet, grâce à des logiciels récents et accrues (Solidworks2004, CosmosWorks), de faire la conception, de calculer, de modifier, et de recalculer jusqu'à obtenir les valeurs optimales satisfaisantes.

En nous basant sur la C.A.O, nous avons focalisé nos travaux sur l'amélioration de la forme de la surface usinée (planéité), donc minimiser la tolérance géométrique de forme de cette surface.

Nous avons clairement établi que l'obtention de surfaces d'une grande qualité géométrique reste très liée au comportement dimensionnel de la broche de la machine étudiée.

La caractérisation de ces surfaces de grande qualité n'aurait pas été possible sans l'association de la méthode de conception numérique et la méthode de calcul par éléments finis en utilisant l'outil C.A.O.

Cette technique a, de nos jours, investi l'ensemble des bureaux d'études, car c'est en grande partie grâce à cette approche qu'il a été possible d'étudier, par le calcul, des pièces à structure complexe telles que la broche.

Avec ce mode de résolution, il est possible d'aborder des problèmes aussi variés que l'élasticité, la thermique, les vibrations, l'hydrodynamique, etc.

Les valeurs des défauts de planéité sont représentées par les déplacements U_x due au force tangentielle, illustrés sur le tableau des résultats des déplacements ; elles sont minimales ($U_x = 0.037$ mm), ce qui revient à déduire que le choix des dimensions de la broche et le porte fraise est optimal.

Le déplacement minimal au niveau des dents de la fraise donc la rigidité de la broche devienne maximale ce qui est l'objectif de notre étude.

Faisons une dernière remarque.

La méthode d'étude que nous proposons paraît parmi les meilleures capables de nous conduire à l'étude de la machine optimale. Celle-ci sera alors nécessairement la meilleure solution possible en notre état de connaissance. A niveau de performances spécifié, elle sera en tout cas la moins chère, la plus fiable, etc.

Bibliographie

- [Abdel-Malek 99] K. Abdel-Malek, S. Othman, Multiple sweeping using the Denavit-Hartenberg representation method, *Computer Aided Design* 31 (1999) 567–583.
- [ADEPA 89] Adepa - Technoguide E - Le guide de la commande d'axe - ADEPA - 1989
- [Allen 81] Allen J.F., A general model of action and time, TR 97, University of Rochester, Departement of Computer Science, 1981.
- [AUFFRET 96] Auffret (A) - Electro-broches et attachements pour Fraisage à Grande Vitesse - Journées de l'usinage 1996, CETIM Senlis - 4 décembre 1996
- [Baughman 70] J.A. Baughman, Multi-axis machining with APT, in: W.H.P. Leslie (Ed.), *Numerical Control User's Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1970, pp. 271–298.
- [Bezier 72] P. Be´zier, *Numerical Control Mathematics and Applications*, Wiley, New York, 1972.
- [Bezier 72] P. Be´zier, *Numerical Control Mathematics and Applications*, Wiley, New York, 1972.
- [Bohez 97] E.L.J. Bohez, T. Mahasan, An expert system for diagnosing CNC machines: a case study, *Computers in Industry* 32 (1997) 233–248.
- [Bohez 02] E.L.J. Bohez, Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 505–520
- [Bohez 89] E.L.J. Bohez, Computer aided dynamic design of rotating shafts, *Computers in Industry* 13 (1) (1989).
- [Bondyfalat 00] D. Bondyfalat, Interaction entre symbolique et num´erique: application à la vision artificielle, Thèse de doctorat en informatique, Université de Nice Sophia Antipolis, 2000.
- [Borning 81] A. Borning, The programming language aspects of thinglab, a constraint oriented simulation laboratory, *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 3: 353-387, octobre 1981.
- [Boyd 74] B.K. Boyd, Five-axis machining, in: *Machine Design*, May 16 1974, pp. 134–138.
- [Chevalier 04] Chevalier.A. "Guide de dessinateur industriel", Hachette, , 2004.
- [Chen 93] L.-L. Chen, S.-Y. Chou, Separating and intersecting spherical polygons: computing machinability on three-, four, and five-axis numerically controlled machines, *ACM Transactions on Graphics* 12 (4) (1993) 305–326.
- [Choi 97] B.K. Choi, D.H. Kim, R.B. Jerard, C-space approach to tool-path generation for die and mold machining, *Computer Aided Design* 29 (9) (1997) 657–669.
- [Chou et al. 87] S. C. Chou, W. F. Schelster and J. G. Yang, Characteristic Sets and Gröbner Bases in Geometry Theorem Proving, *Proceedings of the workshop on Computer Aided Geometry Reasoning*, pp. 29–56, INRIA, France, 1987.

- [Daniel et al. 97] Daniel Marc, Rossignol Vincent, L'approche déclarative de la modélisation des courbes, Revue de CFAO et d'informatique graphique, Vol. 12, n°5, 1997, pp.497-512.
- [Dufour et al. 98] J.F. Dufourd, P. Mathis and P. Schreck, Geometric Construction by assembling solved subfigures, Artificial Intelligence, 99(1): 73-119, 1998.
- [Erik 97] L.J. Erik, S.D. Bohez, R. Senadhera, K. Pole, J.R. Duflou, T. Tar, A geometric modeling and five-axis machining algorithm for centrifugal impellers, Journal of Manufacturing Systems 16 (16) (1997).
- [Gao et al. 98] X-S. Gao, S-C. Chou, Solving geometric constraint systems. II. A symbolic approach and decision if Rc-constructibility, Computer-Aided Design, vol. 30, no. 2, pp. 115-122, 1998.
- [Ge et al. 99] J-X. Ge, S-C. Chou, X-S. Gao, Geometric constraint satisfaction using optimization methods, Computer-Aided Design, vol. 31, no. 14, pp. 867–879, 1999.
- [Gondran et al. 79] Gondran M., Minoux M., Graphes et algorithmes, Eyrolles, Paris 1979.
- [Grimaldi 94] R.P. Grimaldi, Discrete and Combinatorial Mathematics: An Applied Introduction, (3rd ed), Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.
- [Held 91] M. Held, On the Computational Geometry of Pocket Machining, Springer, Berlin, 1991.
- [Huang 99] T. Huang, J. Wang, D.J. Whitehouse, Closed form solution to workspace of hexapod-based virtual axis machine tools, Transactions of ASME 121 (March) (1999).
- [Jeansoulin 96] R. Jeansoulin, Relations spatiales et temporelles-Construction et Composition, seminaire LIM, décembre 1996.
- [Lamure et al. 95] H. Lamure, D. Michelucci, Solving geometric constraints by homotopy, Proceedings of the third Symposium on Solid Modeling and Applications, éditions ACM Press, pp. 263–269, 1995.
- [Latham et al. 96] R. Latham, A. Middleditch, Connectivity analysis : a tool for processing geometric constraints, Computer-Aided Design, vol. 28, no. 11, pp. 917–928, 1996.
- [Laurière 76] LAURIERE J.L. "Un langage et un programme pour résoudre et énoncer des problèmes combinatoires : ALICE", Thèse d'Etat, Université Paris 6, 1976.
- [Light et al. 82] R. A. Light, D. C. Gossard, Modification of geometric models through variational geometry, Computer-Aided Design, vol. 14, no. 4, pp. 209–214, 1982.
- [Ligozat 93] , G. Ligozat, Models for Qualitative Spatial Reasoning, Proceedings of the IJCAI'93 Workshop, Chambéry, France, 1993.
- [Lin et al. 81] V. C. Lin, D. C. Gossard, R. A. Light. Variational Geometry in Computer Aided Design, ACM Computer Graphics, vol. 15, no. 3, pp. 171–177, 1981.
- [LONGEOT 85] Longeot (H), Jourdan (L) - Fabrication Industrielle - Dunod - octobre 1985
- [Luggen 91] W.W. Luggen, Flexible Manufacturing Cells and Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.

- [Mackworth 77] Mackworth A.K., "Consistency in networks of relations", Artificial Intelligence 8, 1, 1977, pp.99- 118.
- [Maculet 91] Maculet R., « IA et CAO en architecture : représentation des connaissances spatiales et raisonnement spatial avec contraintes », Thèse de Doctorat, Université Paris 6, décembre 1991.
- [Maculet 92] Maculet R., de la conception topologique à la conception géométrique, 01 Design'92, 25-27 janvier 1992.
- [Mathis 97] P. Mathis, Constructions géométriques sous contraintes en modélisation à base topologique, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1997.
- [MERY 96] Mery (B), Charpentier (F) - Machines-outils à commande numérique - Polycopié de cours IUFM de Créteil, Centre Scientifique et Technologique, site de Cachan - 1996
- [MERY 97] Méry (B) - Machines à commande numérique - Hermès - Avril 1997
- [Montanari 74] MONTANARI U. "Networks of constraints: fundamental properties and applications to picture processing", Information Science 7, 1974, pp.95-132.
- [Michelucci & Lamure 94] D.Michelucci et H. Lamure, Résolution de contraintes géométriques par homotopie, in Actes de AFIG 1994.
- [Nelson 85] G. Nelson, Juno, a constraint-based graphic system, in ACM Siggraph Conference Proceeding, 1985.
- [NF Z 68-037] AFNOR - Commande numérique des machines, format de programme et description des mots adresses, partie 3 : codage des fonctions auxiliaires M (classe 1 à 9) - norme AFNOR NF Z 68-036 - octobre 1988
- [NF ISO 841] ISO - Nomenclature des axes et des mouvements, pour la commande numérique des machines - norme ISO 841, équivalent norme AFNOR NF Z 68-020 - décembre 1968
- [NF ISO 4342] ISO - Commande numérique des machines, données d'entrée des processeurs CN, langage de référence de base pour programme de pièce - norme ISO 4342, norme AFNOR NF Z 68-040 - octobre 1988
- [NF ISO 6983-1] ISO - Commande numérique des machines, format de programme et description des mots adresses, partie 1 : format de données pour les équipements de commande de mise en position, de déplacement linéaire et de contournage - norme ISO 6983-1, norme AFNOR NF Z 68-035 - octobre 1988
- [NF E 60-023] AFNOR - Cônes d'emmanchement, nez de broches à conicité 7 / 24 pour changement manuel d'outil - norme AFNOR NF E 60-023 - Mai 1985
- [NF Z 68-036] AFNOR - Commande numérique des machines, format de programme et description des mots adresses, partie 2 : codage et mise à jour des fonctions préparatoires G et des fonctions auxiliaires universelles M - norme AFNOR NF Z 68-036 - octobre 1988

- [Nguyen et al. 96] C. Nguyen, J-C. Lafon, Constraint-based design of exact parameterised 3D solids, Proceedings of the CSG-96, Set-theoretic Solid Modelling Techniques and Applications, éditions Information Geometers Ltd, Winchester, UK, pp. 49–63, 1996.
- [Pritschow 97] G. Pritschow, K.-H. Wurst, Systematic design of hexapods and other parallel link systems, Annals of the CIRP 46 (1) (1997).
- [PRUVOT 93] Pruvot (F) - Conception et calcul des machines -outils vol1 - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes - 1993
- [Randell et al. 92] Randell D.A., Cui Z. and Cohn A.G., A spatial logic based on regions and connection, Proceedings 3 rd International Conference on Knowledge Representation and Reasoning, Morgan Kaufmann, San Mateo, pp. 165-176.
- [SAN DVIK 94] Sandvik Coromant - Catalogue outils rotatifs - société Sandvik Coromant - 1994
- [Simon 74] Simon H.A. "La science des systèmes, science de l'artificiel", l'Epi Editeur, Paris 1974.
- [Sim 70] R.M. Sim, Postprocessors, in: W.H.P. Leslie (Ed.), Numerical Control User's Handbook McGraw-Hill, New York, 1970, pp. 299–344.
- [Stewart 66] D. Stewart, A platform with six degrees of freedom, The Institution of Mechanical Engineers, Proceedings 1965–1966, Vol. 180 Part 1, No. 15, pp. 371–386.
- [Sutherland 63] I.E. Sutherland, Sketchpad : A man-machine graphical communication system, Proceedings of the IFIP Spring Joint Computer Conference, pp. 329–346, 1963.
- [Tollenaere et al. 98] sous la direction de Tollenaere Michel, « Conception de produits mécaniques », Hermès, 1998
- [VIVES FOS 93] Vives-fos (R) - Etude d'électro-broches à reluctance variable pour l'usinage à grande vitesse - Thèse de doctorat, CNAM - 3 mai 1993
- [Waltz 72] Waltz D., Generating semantic descriptions from drawings of scenes with shadows, MIT, Massachusetts (1972).