

2^{ème} partie

=====

GAMME D'USINAGE

Pierre BOURDET (novembre 2003)

ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

61 avenue du Président Wilson

94235 CACHAN CEDEX

LA GAMME D'USINAGE

Ce polycopié est relatif au cours de l'option "Science de la production" de la maîtrise de technologie mécanique de Paris VI. Il s'adresse à des étudiants n'ayant aucun pré-requis sur la production par enlèvement de matière. L'élaboration d'une gamme d'usinage étant essentiellement basée sur les "pré-requis" (expérience) du gammiste, l'objectif de ce cours se limite à acquérir une compréhension de la problématique liée à la conception de gamme de fabrication. L'approche par entités d'usinage est ici privilégiée. À l'issue du cours l'étudiant devra être capable, sur quelques exemples élémentaires, de mettre en œuvre une méthode structurée d'élaboration de gammes.

	page
CHAP. 1 : Problématique de la génération d'une gamme	
11 Contexte technico-économique	1
12 Rôle d'une gamme et définitions	1
13. Démarche de conception d'une gamme : l'entité d'usinage	4
14 Élaboration d'une gamme	5
CHAP. 2 : Processus de réalisation d'une entité d'usinage	
21 Entité et outils :	9
CHAP. 3 : Structure des Machines Outils	
31 Structures avec liaisons en série	14
32 Structure avec liaisons en parallèles	17
CHAP. 4 : Les montages d'usinages	
41 Fonctions d'un montage d'usinage	18
42 Typologie des montages d'usinage	18
43 Modèle isostatique	21
44 Modèle de simulation avec prise ne compte des défauts	26

Bibliographie

P. BOURDET, A. CLEMENT

Optimalisation des montages d'usinage. Contrat de Recherche *D.R.M.E. 1972/811*

P. BOURDET, J.P. LEROY, L. MATHIEU

Systeme modulaire pour le montage des pièces, Brevet Aérospatiale Chatillon, N° d'enregistrement 86.02634.

E. LEFUR, F. VILLENEUVE, P. BOURDET

Génération automatique de processus d'usinage, *Mécanique Matériaux Electricité*, n°418, Déc. 86

L. MATHIEU, P. BOURDET, F. LE MAITRE

Tool automatic choice : a step to elaborate automatically process planning, *Annals of the CIRP*, Vol. 36, *Manufacturing Technology*, Janv. 1987

B. ANSELMETTI, P. BOURDET

Gamme automatique : une nouvelle approche, la phase automatique, 1er Symposium Franco-Yougoslave sur les nouvelles technologies- DUBROVNIK, Avril 1987

P. BOURDET, F. VILLENEUVE (éditeurs)

Gamme automatique en usinage, Ouvrage collectif, édition HERMES, nov.90, N° ISBN 2-86601-225-0

P. BOURDET

Introduction générale à la conception automatique de gammes d'usinage, *Gamme Automatique en Usinage*, 21-22 Nov. 1990 - Groupe GAMA - HERMES, N° ISBN 2-86601-255-0

A. BERNARD, P. BOURDET

Features, a new approach to improve productivity in the realisation of forming die prints, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.24, Déc.90

B. ANSELMETTI, P. BOURDET

Formalisation de l'expertise en fabrication, Actes de Conférences - Séminaire résidentiel : "Intégration des fonctions Conception et Fabrication" - MICADO, 7 et 8 Avril 1992

11. CONTEXTE TECHNICO-ECONOMIQUE :

L'élaboration d'une gamme est liée au contexte technico-économique de l'entreprise. L'objectif est de produire des pièces au meilleur **coût**, répondant à des caractéristiques de **qualité** précises, dans un **délat** maîtrisé et dans un **environnement technique** de production donnée.

L'évolution la plus significative de ces dernières années est la forte réduction du délai entre la décision de concevoir un nouveau produit et sa mise sur le marché. Par exemple dans le domaine de l'automobile, le délai est passé de 5 ans à 18 mois, et dans la construction de moteur d'avion de 12 ans à 5 ans. Cette nouvelle donnée a révolutionné l'organisation des "métiers" de l'entreprise et de ses sous-traitants. L'organisation séquentielle classique Bureau d'études, Bureau de méthodes, et mise au point en production ne permet plus de répondre au délai du marché. Les conceptions du produit et de son processus de réalisation sont désormais menées simultanément sur un même lieu. L'organisation "en plateau" regroupe tous les métiers autour des concepteurs d'un projet. Les capacités des moyens de production sont prises en compte très tôt dans le processus de conception, ce qui permet de réduire, voir de supprimer, les délais de mise au point en anticipant la nécessité de mettre en place des plans de surveillances en production.

C'est dans ce nouveau contexte, que moyens de production et façon de produire ont évolué. La réduction des délais ne permet plus, en grande série, de concevoir et de réaliser des équipements spécifiques à chaque nouvelle production. La mise en place de l'UGV et des machines "agiles" permet, sur des machines "standards", une productivité compatible avec les cadences de la grande série, tout en apportant l'adaptabilité des centres d'usinage. Par exemple, dans le cas de l'utilisation de machines spéciales de type transfert - flexible, il était impératif de fixer définitivement les dimensions des entraxes des alésages avant de lancer en fabrication la tête multibroches de la machine spécifique. Dans le cas actuel des machines agiles, cette même décision pourra être prise beaucoup plus tardivement, voir juste quelques jours avant la mise en production des pièces.

Dans ce cours, nous nous plaçons dans le cas de gammes d'usinage réalisées sur des machines à commande numériques de type centre d'usinage, en effet ces machines sont désormais largement utilisées depuis la production unitaire jusqu'à la production en très grandes séries. La programmation de ces machines, réalisée par des outils de CFAO sera développée dans un cours spécifique. Nous développerons plus particulièrement l'analyse de la démarche de conception d'une gamme, tout en privilégiant les aspects technologiques basés sur une approche par entités d'usinage et de posage. La gestion des ressources et le respect des cadences ne seront pas pris en compte.

12. ROLE D'UNE GAMME ET DEFINITION

121. Rôle d'une gamme d'usinage

Une gamme de fabrication peut prendre de nombreuses formes en fonction de son rôle dans l'organisation et dans le plan de charge des ateliers.

En travail unitaire, type réalisation de prototypes ou de quelques pièces non renouvelables, seul l'ordonnancement en phases sera privilégié. La gamme sera réalisée par un "homme de l'art" qui par son expérience sera capable de la décomposer en phases et d'allouer à chaque phase, un temps de réalisation. Par suite chaque intervenant dans le processus sera un professionnel hautement qualifié, qui prendra toutes les décisions techniques nécessaires pour mener à bien dans le délai imparti, la réalisation. La gamme a ici un

double rôle, celui d'effectuer rapidement un devis et celui d'établir le plan de charge de l'atelier. Les ressources seront des MOCN équipées d'outillages normalisés, standardisés et disponibles.

En petites (100 pièces) et moyennes séries (1 000 pièces) renouvelables. La fabrication périodique des pièces justifie une gamme plus élaborée, la gamme sera conçue et mise au point pour la première série de pièces, elle sera ensuite reprise et exécutée, sans modification, pour toutes les séries suivantes. Les documents du donneur d'ordre seront : un dessin tolérancé de la pièce finie, un délai et le plus souvent un type de brut. L'exécution des pièces sera effectuée par du personnel moyennement qualifié. Les ressources seront comme précédemment, celles qui sont disponibles dans l'entreprise au moment du lancement en fabrication. Si la capacité de production de l'atelier est insuffisante, les investissements se feront dans des outillages et des MOCN standard (non spécifiques) c'est-à-dire réutilisables pour d'autres productions.

En grande série continue, la cadence de production est l'un des facteurs essentiels de la gamme. Plusieurs types de pièces pourront être produits simultanément sur les mêmes machines (atelier flexible adapté à une quantité de pièces produites stable). La gamme est ici très détaillée, chaque opération est finement analysée, plusieurs variantes de gamme sont proposés, ce qui permet ensuite d'optimiser la charge de l'atelier de production en fonction de la demande du marché. L'investissement en moyens de production et outillages est important, il est adapté aux pièces produites. La typologie de l'atelier et sa logistique sont les facteurs déterminant pour le respect des délais et du taux de charge de l'atelier. La structure en "atelier capacitaire" permet d'accorder l'atelier de production à la demande du marché (variabilité de la production par suppression ou rajout de machines).

Gamme	Type de fabrication	Machines	Outillages	Gamme	Délais
Niveau de détail de la gamme ↓	<u>Unitaire</u> ou quelques pièces non renouvelables	MOCN	Outils normalisés Porte pièces standard (mandrin, étau, etc.) et montages modulaires	Ordonnancement en phases non détaillées. Son but est de faire un plan de charge de l'atelier, et des études de coût	Délai de livraison de la première pièce ↓
	<u>Petite série</u> (100 pièces max.) et <u>Moyenne série</u> (1000 pièces max.) <u>renouvelables</u>	MOCN Centres d'usinage équipés de palettes Système flexibles de fabrication (FMS)	Outils normalisés et spéciaux simples Porte pièces standard et montages modulaires réutilisables	Chaque sous phase est détaillée sur des MOCN standard. Les montages d'usinage sont donnés uniquement par leur schéma cinématique	
	<u>Grande série par lots renouvelables</u>	Centres d'usinages organisés en cellule Systèmes flexibles de fabrication (FMS)	Outils normalisés et spéciaux Montages d'usinage standard non réutilisables. Automatisation simple	Chaque sous-phase est détaillée sur des MOCN prédéfinis Les montages d'usinage sont dessinés, automatisés	
	<u>Grande série continue</u>	Atelier Capacitaire entièrement automatisé. Centres d'usinages Agiles adaptés au processus. Forte automatisation	Outils et Montages d'usinage spécifiques Le temps de cycle est le facteur déterminant	Finement détaillée. Les machines et des outillages sont adaptés à la pièce à produire. Recherche d'opérations d'égale durée. Plans de surveillance prévus	

122. Quelques définitions

À chaque étape du processus de réalisation d'une pièce, il est possible de distinguer :

- les surfaces dites de références qui sont mises en position par le montage d'usinage,
- les surfaces usinées par des outils,
- les autres surfaces qui ne subissent aucune transformation et qui peuvent participer au bridage de la pièce.

Au cours de son processus de fabrication, la pièce prend successivement différentes formes géométriques pour passer d'un état "brut" à un état "fini". Une gamme d'usinage donnera l'ordonnancement de tous ces états, poste de travail après poste de travail.

L'expertise du "gammiste" peut-être formalisée en donnant les définitions suivantes :

Opération d'usinage : l'opération d'usinage est le travail d'un outil qui produit une et une seule forme géométrique (figure 1).

Par exemple, un perçage simple au foret, une passe de surfaçage une passe de semie-finition sont des opérations d'usinage.

Séquence d'usinage : La séquence d'usinage est une suite ordonnée **ininterrompible** d'opérations d'usinage (figure 2).

Par exemple un cycle d'ébauche en tournage, un perçage avec déburrages sont des séquences d'usinage.

Processus d'usinage : un processus d'usinage est une suite ordonnée **interruptible** de séquences d'usinage.(figure 3).

Il représente l'enchaînement des séquences d'usinage conduisant à la réalisation d'une forme géométrique connue du fabricant. L'ordre des séquences d'usinage d'un processus est impératif, par exemple une séquence d'ébauche doit se placer avant une séquence de finition. Il est possible d'imbriquer des séquences d'usinage appartenant à différents processus d'usinage.

Sous-phase d'usinage : une sous-phase d'usinage est un processus d'usinage réalisé sans démontage de la pièce, ni transfert du couple "pièce-porte-pièce" d'une broche de machine à une autre.

À la sous-phase d'usinage est attachée un repère unique de mise en position des surfaces de référence de la pièce qui reste commun à l'ensemble des surfaces usinées dans la sous-phase.

Phase d'usinage : une phase d'usinage est une succession de sous-phases réalisées sur une même cellule ou un même îlot de fabrication.

À la phase est attachée une notion de trajet de la pièce (ou du lot de pièces) dans un atelier organisés en îlots (ou blocs) de fabrication (par exemple îlot tournage, îlot fraisage, îlot traitement thermique etc...), la pièce passera ainsi d'îlots de fabrication en îlots de fabrication.

Gamme d'usinage : ce terme très général regroupe l'ensemble des informations, plus ou moins détaillées, relatives à la réalisation d'une pièce.

13. DEMARCHE DE CONCEPTION D'UNE GAMME : L'ENTITE D'USINAGE

131. L'entité d'usinage

L'entité d'usinage est l'expression d'une démarche fondamentale rencontrée dans toute génération de gamme. Elle permet de structurer une logique de conception du processus d'usinage d'une pièce. En effet, l'expert peut difficilement déterminer directement l'ordonnancement de toutes les opérations d'usinage ; il "reconnaît" au préalable des groupements de formes géométriques, que nous appelons entités d'usinage.

L'entité d'usinage est choisie en respectant deux conditions :

- une condition d'existence du processus d'usinage :

Défini par un expert ou par tout autre moyen, le processus d'usinage de l'entité existe et ne sera plus remis en cause par le système de génération de gamme d'usinage.

L'expert tiendra compte de toutes les variantes d'usinage possibles, et devra en conséquence judicieusement paramétrer l'entité d'usinage (état géométrique initial, dimensions significatives, matériaux, état de surface etc...). À chaque jeu de valeurs des différents paramètres de l'entité correspondra un processus d'usinage de l'entité. Ce dernier est également dépendant de la base de données des caractéristiques des outils de coupe, des montages d'usinage, et des machines-outils.

- une condition d'indépendance entre les processus d'usinage :

Tout processus d'usinage d'une entité d'usinage doit être exécutable indépendamment des processus d'usinage des autres entités. Il ne doit pas exister de contraintes d'usinage imposant une relation d'ordre d'exécution entre les entités.

Ainsi, une pièce étant constituée d'entités d'usinage, toute combinaison des processus d'usinage des différentes entités d'usinage, et par suite, toute imbrication de séquences d'usinage est techniquement réalisable et constitue du seul point de vue de l'usinage, un processus possible de la pièce.

On remarque que les paramètres d'une entité d'usinage peuvent prendre un jeu de valeurs en fonction de l'ordonnancement général des processus. Par exemple un trou percé en pleine matière sera réalisé par des séquences d'usinage différentes suivant l'état initial de la face d'attaque du trou : un état "brut" de fonderie nécessitera la réalisation d'un trou de centre, un état fraisé (obtenu par surfaçage) admettra un perçage direct du trou. Si les processus d'usinage restent dans tous les cas indépendants les uns des autres, le processus d'élaboration d'une entité peut n'être défini qu'après l'ordonnancement général des séquences d'usinage.

Aussi peut-être proposé la définition suivante de l'entité d'usinage :

Une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu. Ce processus est quasi indépendant des processus des autres entités.
--

Conséquences :

- Une pièce ou un ensemble de pièces est considéré comme un assemblage d'entités d'usinage. Libéré de toute remise en cause de l'usinage des entités après ordonnancement de la gamme, l'ordonnancement général des séquences d'usinage est un problème d'optimisation sous contraintes multiples, qui prendra en compte tout critère autre que ceux qui sont liés à l'usinage, principalement les critères liés à la gestion temporelle des moyens de production et de leur logistique. Par exemple choisir le nombre de sous-phases (montage et démontage des pièces), le nombre de changements d'outils en fonction des temps de cycle de la cellule (temps du cycle d'échange d'outil et vitesse de déplacement à vide)...etc...

- Cette définition de l'entité permet de créer une nouvelle entité d'usinage (indépendante des autres entités d'usinage), par l'usinage ordonné d'une suite d'entités (figure 6). Les entités d'usinage composant la nouvelle entité d'usinage perdent leur indépendance et deviennent des séquences d'usinage auxquelles peuvent être adjointes des séquences d'usinage particulières, par exemple une rainure de circlips ou de joint torique dans un alésage.

- Le nombre d'entités d'usinage est lié à la capacité qu'a l'expert de formaliser son expertise. Il est plus simple de créer une nouvelle entité pour chaque cas particulier rencontré, plutôt que de remettre en cause la formalisation déjà exprimée. On assiste dans ce cas à une profusion d'entités d'usinage difficilement compatibles avec une bonne fiabilité du résultat obtenu. Une recherche systématique des différentes entités d'usinage de l'entreprise peut-être menée ; l'objectif est d'en limiter le nombre, de les prendre en compte dès la conception du produit, et de leur associer une génération automatique du processus d'usinage.

132. Ordonnement des séquences d'usinage :

Pour ordonner des séquences d'usinage il est nécessaire de les connaître, et inversement pour les connaître il est nécessaire d'en connaître l'ordonnement.

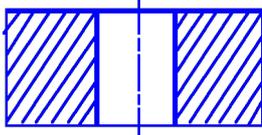
Prenons l'exemple de la réalisation de deux entités : une entité face plane et une entité trou. La face plane a un état initial brut de fonderie au sable, et le trou est percé en pleine matière.

Génération du processus d'usinage

État initial :



État final



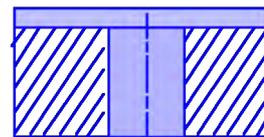
Première solution :

Usinage dans l'ordre : entité plan puis entité trou

Entité plan : Surfaçage ébauche

Surfaçage finition

Entité trou : Perçage du trou



Deuxième solution :

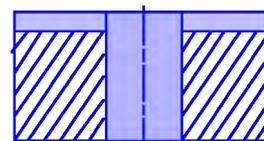
Usinage dans l'ordre : entité trou puis entité plan

Entité trou : Perçage d'un trou de centre

Perçage du trou

Entité plan : Surfaçage ébauche

Surfaçage finition



Cet exemple simple montre que les séquences d'usinage sont déterminées par leur ordonnancement, trois séquences dans la première solution et quatre dans la deuxième. La génération d'une gamme ne pourra donc être résolue que par une approche itérative, une gamme initiale proposant un premier ordonnancement sera ensuite progressivement affiné.

14. ELABORATION D'UNE GAMME

Plusieurs approches sont utilisées :

141. Classement par catégorie de problèmes techniques résolus :

Les problèmes liés à la génération des processus d'usinage peuvent être classés en sept catégories, chacune définissant une classe de problèmes techniques caractéristiques.

- tournage (contournage intérieur et extérieur)
- perçage - alésage (axe de l'outil confondu avec l'axe du trou)
- fraisage de surfaces canoniques simples obtenues par déplacement relatif de l'outil et de la pièce suivant un vecteur vitesse constant (surfaçage, rainurage etc...).
- usinage de poches à fond plan et de forme quelconque.
- fraisage de surfaces 3D obtenues par enveloppe d'un outil à bout torique, sphérique ou plan.
- rectification cylindrique et plane.
- procédés spéciaux comme le brochage etc...

142. Cas simple d'usinage répétitif d'une même entité.

Lorsque le problème à résoudre est spécialisé et répétitif, une solution simple existe. Par exemple la réalisation, sur centre d'usinage, d'outillages de presse à poinçonner, consiste à percer et à aléser des trous à axes parallèles dans une plaque métallique. Dans ce cas particulier, le bureau des méthodes conçoit les outillages par un simple placement d'entités "trou" parfaitement identifiées dans une base de données, la génération du processus d'usinage des outillages est maîtrisée par un simple algorithme. On fait cependant dans ce cas plusieurs hypothèses :

- Chaque entité trou de la base de donnée est imposée et le concepteur est de fait limité dans le choix dimensionnel des entités, ce qui impose de standardiser les outillages de presse.
- les outils de coupe prévus sont toujours disponibles dans le magasin outils du centre d'usinage,
- les conditions de coupe initialement choisies restent constantes.

Lorsque le problème posé est général, c'est-à-dire dans un contexte de production de pièces très variées, plusieurs approches sont possibles :

143. Approche T.G.A.O. (Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur) :

Cette approche consiste à rassembler dans un premier temps les gammes d'usinage les plus représentatives de la production de l'entreprise. Ces gammes sont établies par les experts de la production, elles servent dans un deuxième temps à élaborer un système de codage liant les caractéristiques significatives de la pièce aux processus d'usinage utilisés. Grâce au système de codage ainsi mis en place, l'élaboration d'une gamme d'usinage consiste à retrouver des pièces présentant des similitudes de formes avec la pièce à étudier, et à reprendre le processus d'usinage correspondant. Si aucune gamme n'existe dans la base de données, un expert code la nouvelle pièce et lui associe une nouvelle gamme. Ce système est bien adapté aux ateliers d'outillage qui traitent une très grande variété de pièces unitaires (Atelier Citroën Meudon). L'expérience montre que le nombre de gammes devient vite très important, et que la mise en place de la base de données peut prendre plusieurs années. Il est également nécessaire de codifier le langage technique au sein l'entreprise.

144. Approche par variantes :

Il s'agit de retrouver parmi les pièces répertoriées dans l'entreprise, une ou plusieurs pièces types qui "ressemblent" à la pièce à étudier. Une "gamme type" est alors générée, l'expert apporte ensuite les corrections nécessaires pour adapter la gamme à la pièce traitée. Cette

méthode nécessite la présence de l'expert. Seules les pièces et les gammes types sont conservées. Le système apporte essentiellement une aide efficace à la rédaction de la gamme d'usinage, comme le ferait un traitement texte.

145. Approche générative

Cette approche consiste à générer automatiquement le processus d'usinage d'une entité d'usinage pris sous sa forme la plus générale possible. Par exemple l'entité d'usinage " formes de révolution obtenues en tournage " permet à elle seule de décrire toute pièce de révolution. Le nombre infini de variétés de pièces traitées ne permet pas de faire appel à un archivage préalable de pièces ou de gammes connues et nécessite de créer systématiquement pour chaque pièce un processus d'usinage.

Le processus d'usinage obtenu est suffisamment précis pour permettre une mise en production immédiate. La génération du processus s'appuie sur des bases de données de coupe, d'outils, de portes-outils, de plaquettes, de portes-pièces et des caractéristiques machines-outils. Très documentées ces bases de données peuvent être mise à jour en temps réel. Cette méthode nécessite une formalisation scientifique de l'expertise, elle s'appuie sur de nombreuses expérimentations, et sur la mise en œuvre de modèles mathématiques capables de prendre en compte toutes les contraintes de la production. Les mécanismes de décision reconnus par l'ensemble des experts sont programmés sous forme d'algorithmes et les principaux choix de condition de coupe, d'outils, de trajectoire etc. sont optimisés. Des options de décision non fondamentales pour le bon déroulement du processus sont accessibles sous forme de règles ou de paramètres et permettent ainsi de personnaliser le système de génération automatique du processus.

Un tel système propose des solutions de processus conformes aux règles de l'art, prenant systématiquement en compte toutes les contraintes réelles de la production. La fiabilité des résultats est supérieure à celle obtenue par un gammiste.

Le processus de la pièce nécessite pour être généré une reconnaissance des entités d'usinage constituant la pièce. L'entité étant dans ce cas prise sous sa forme la plus générale (une seule entité d'usinage pour toutes les pièces de révolution), le problème de la reconnaissance des entités et de ses caractéristiques est essentiel, le lien avec la CAO est impératif. Industriellement plusieurs applications sont utilisées : LURPA-Tour (réalisé au LURPA par B. Anselmetti), Usiquick (projet Dassault aviation pour les pièces polyédriques réalisées sur centre d'usinage à 3, 4 ou 5 axes).

146. Approche générative par expertise.

La génération de la gamme d'usinage s'effectue en deux étapes distinctes : une génération de l'association entité-processus, une génération du processus de la pièce.

Cette approche permet de personnaliser et d'adapter les gammes d'usinage aux habitudes "métier" de l'atelier de production. L'expert définit naturellement, par expérience, les entités telles qu'elles lui apparaissent dans les fabrications. L'entité n'a pas ici le sens précis de l'entité d'usinage proposée précédemment, elle peut prendre toute forme géométrique et ne nécessite pas une obligation d'indépendance entre les processus d'usinage des différentes entités. L'expert associe à chaque entité un ou plusieurs processus d'usinage. La description des processus se fait sous forme de règles établies à partir de cas typiques d'usinage que l'expert connaît par expérience.

La difficulté de formaliser par règles un problème d'usinage amène l'expert à multiplier le nombre d'entités et par suite le nombre de règles. En effet, l'expérience montre que l'expert trouve toujours un cas particulier en contradiction avec les règles déjà préétablies. Il peut dans ce cas soit ajouter ou modifier des règles, avec le risque de modifier les résultats déjà acquis, soit de créer une nouvelle entité.

Les outils et les cycles d'usinage sont classés et associés par l'expert aux différentes entités. La fiabilité de l'usinage dépend donc uniquement de l'expérience de l'expert.

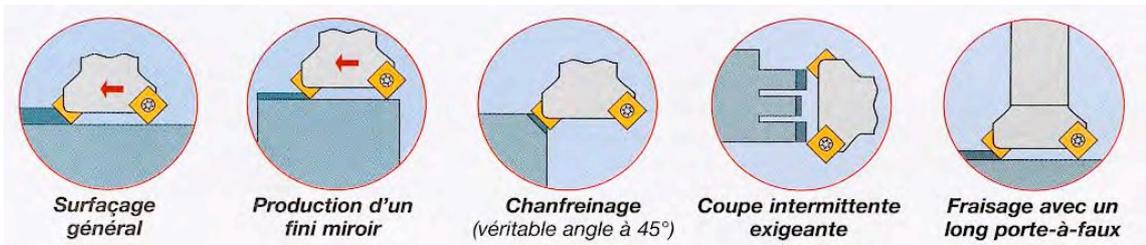
Dans cette approche, les entités sont essentiellement liées à des formes géométriques typiques, la reconnaissance des entités composant une pièce mécanique s'en trouve ainsi simplifiée. Des règles permettent ensuite de planifier l'ordre d'exécution des entités. Cette approche aboutit à une génération du processus d'usinage de la pièce. Ces systèmes sont programmés par des techniques d'Intelligence artificielle.

Chap 2 : PROCESSUS DE REALISATION D'UNE ENTITE D'USINAGE

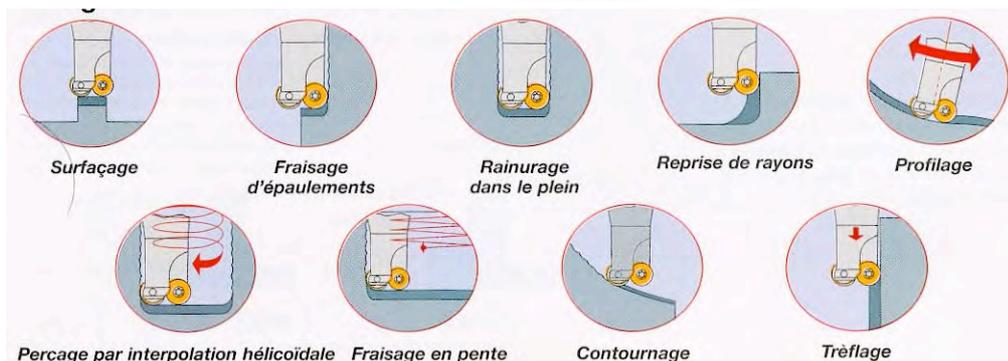
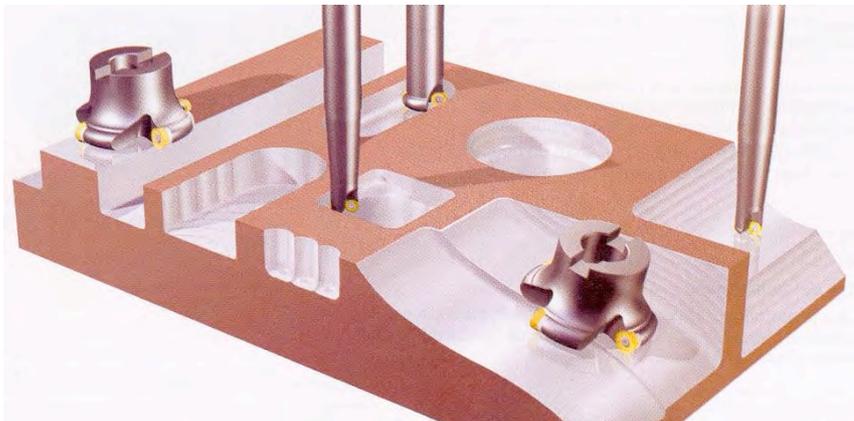
(chapitre provisoire)

21. ENTITE ET OUTILS:

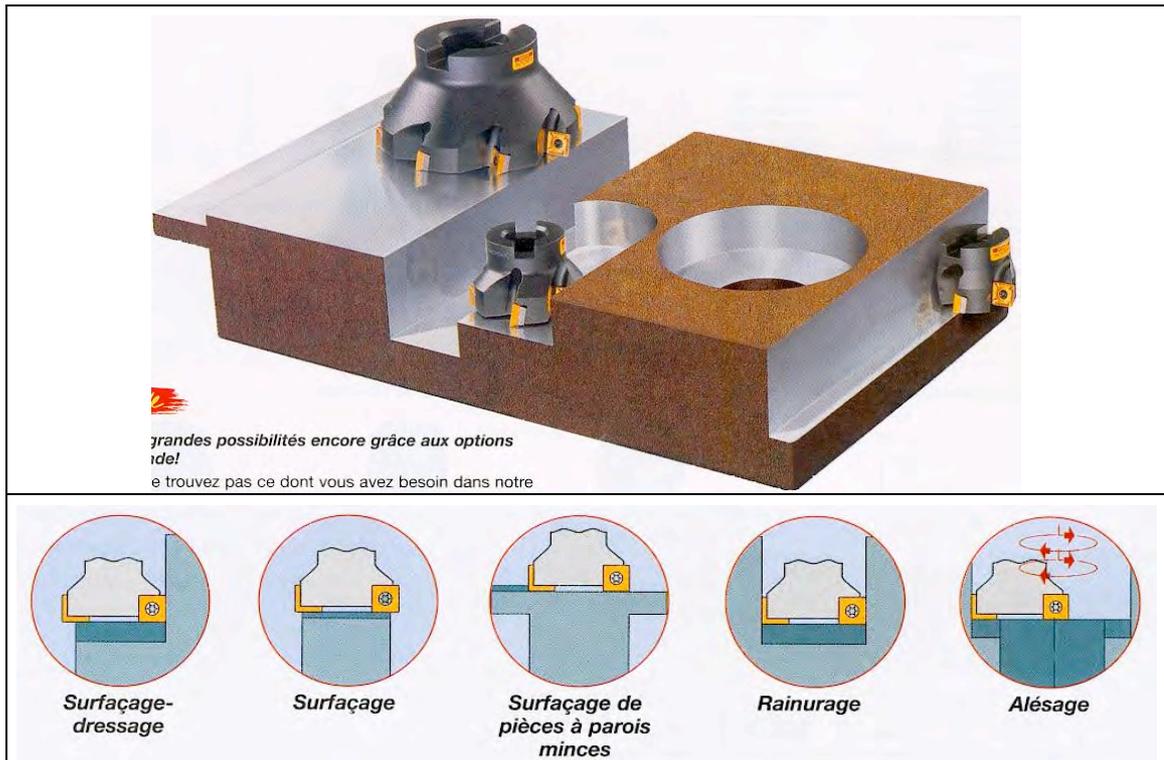
211. Fraises à surfacer (angle $\kappa r = 45^\circ$) :



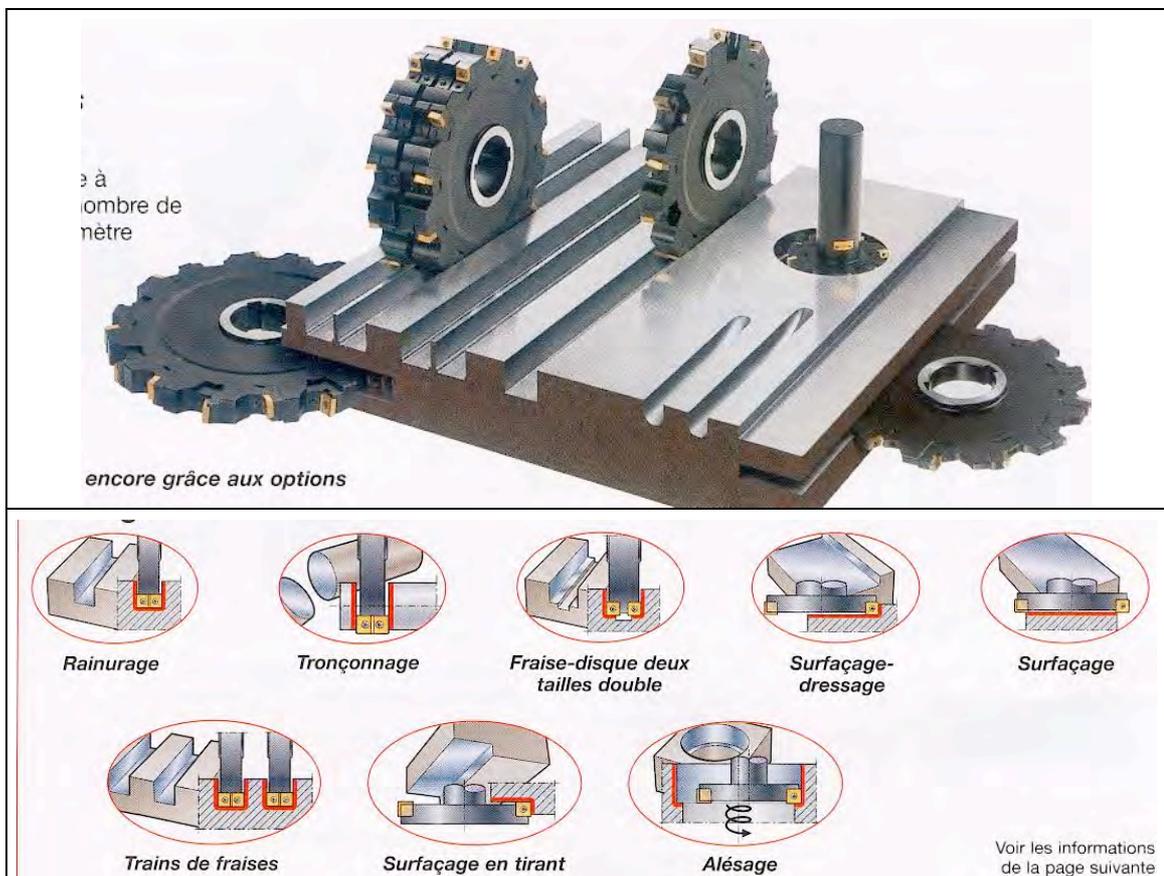
212. Outil torique :



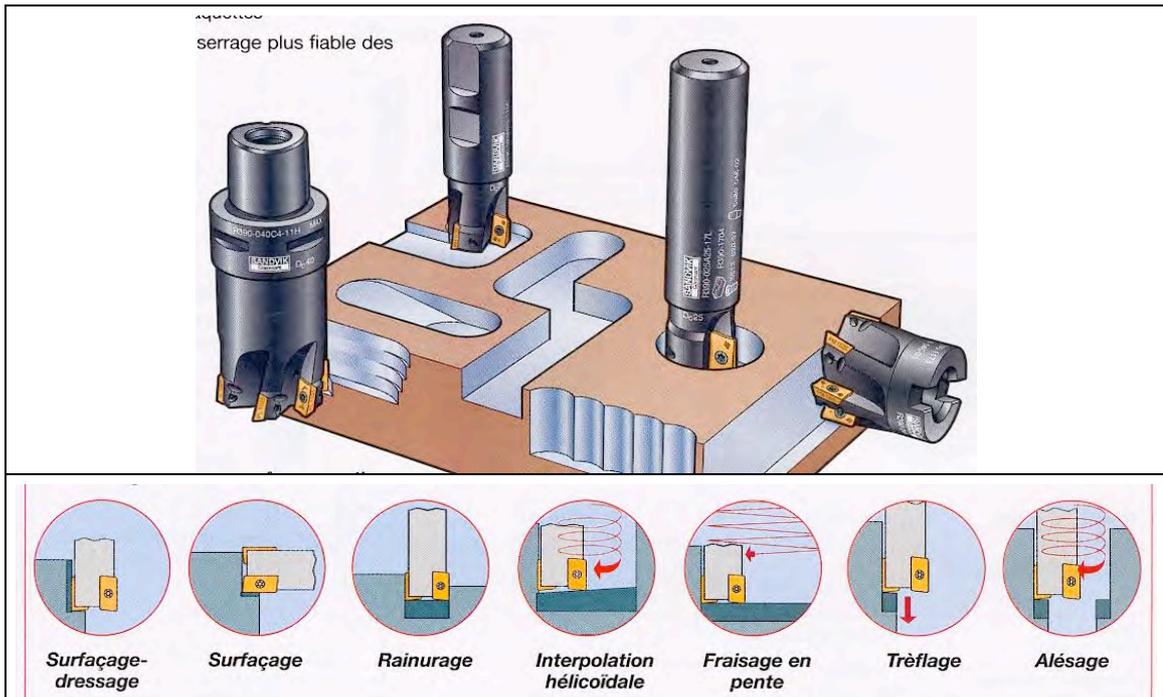
213. Fraise à surfacer et dresser (angle $\kappa r = 90^\circ$) 2 tailles :



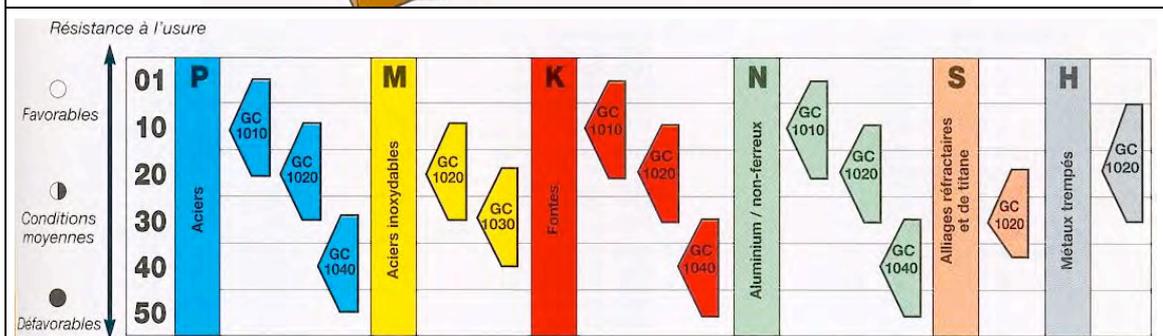
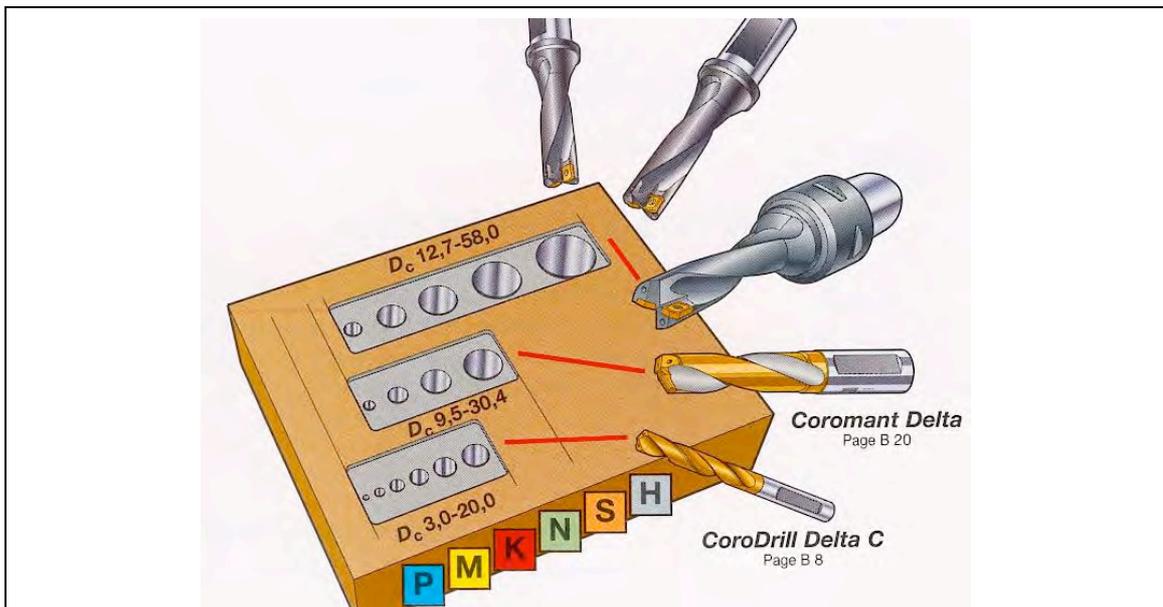
214. Fraise disque (3 tailles):



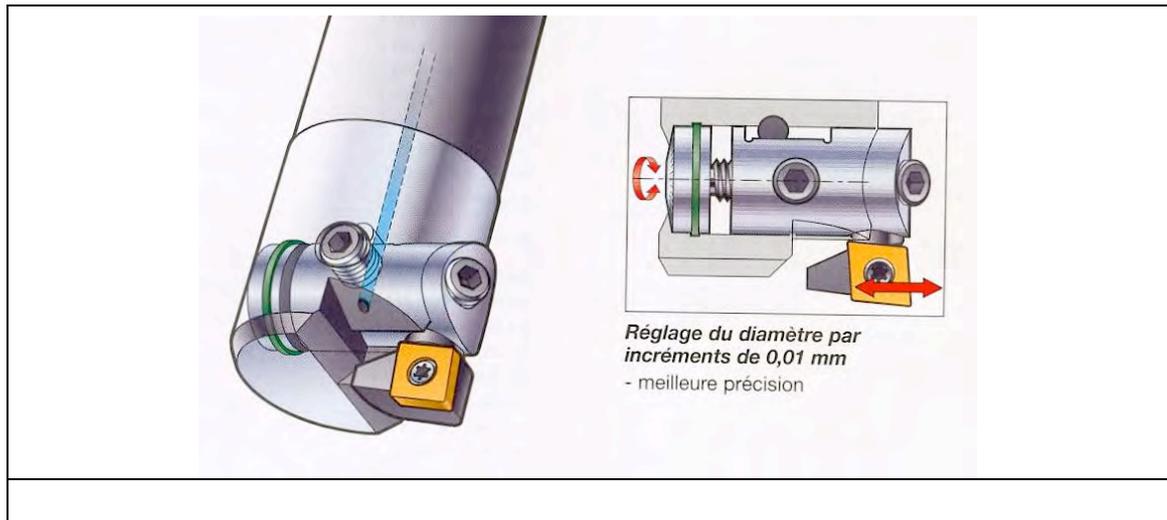
215. Fraise à rainurer (2 tailles):



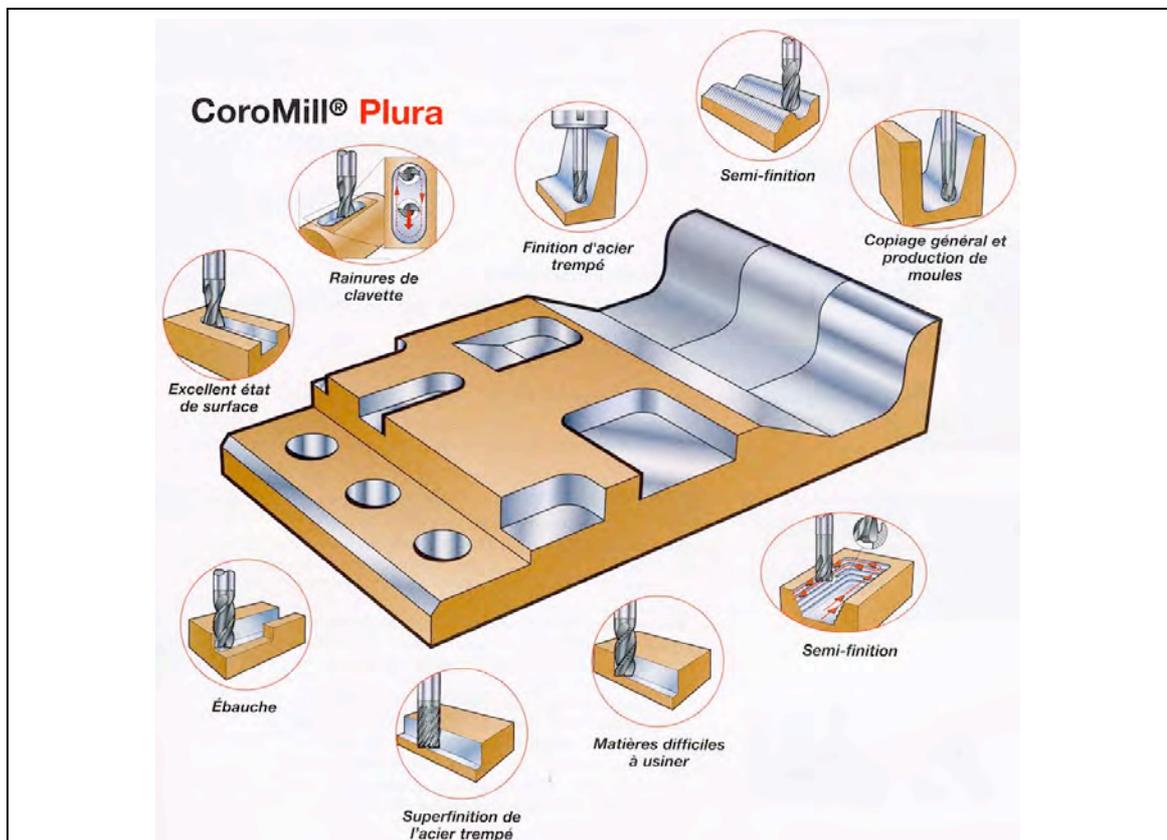
216. Perçage :



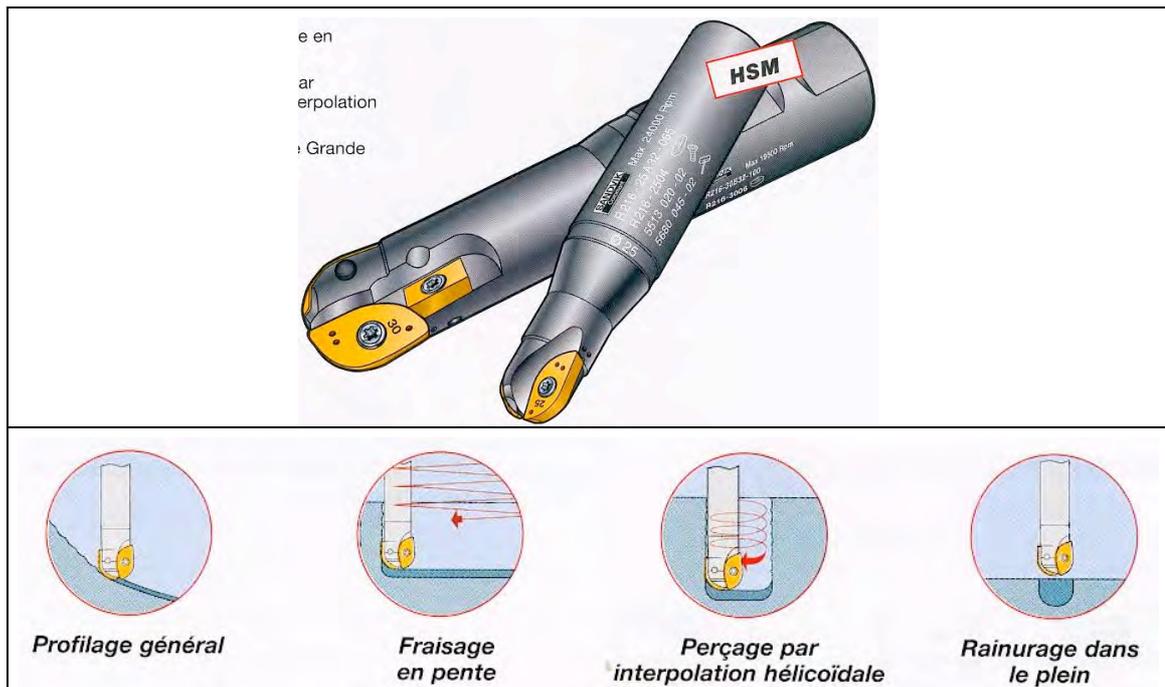
217. Alésage :



218. Outil pour UGV :



219. Outil pour UGV :



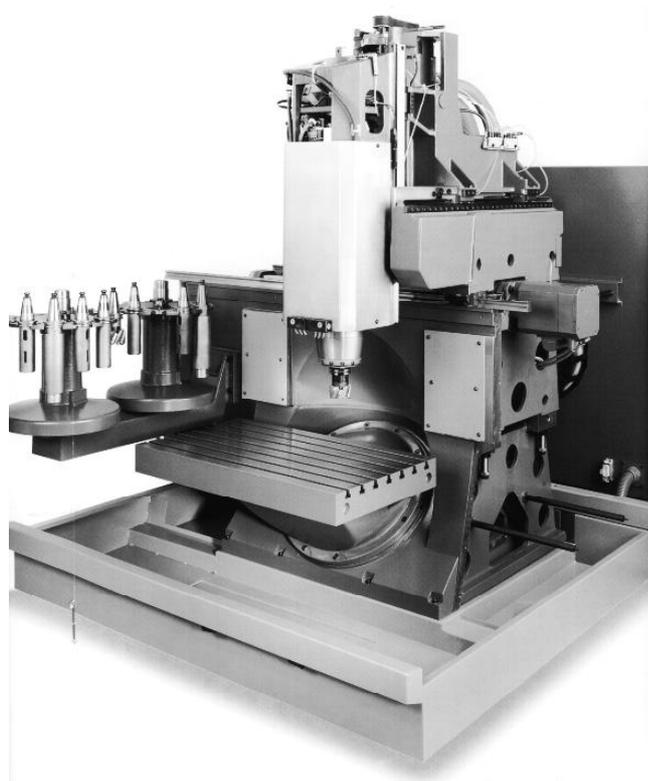
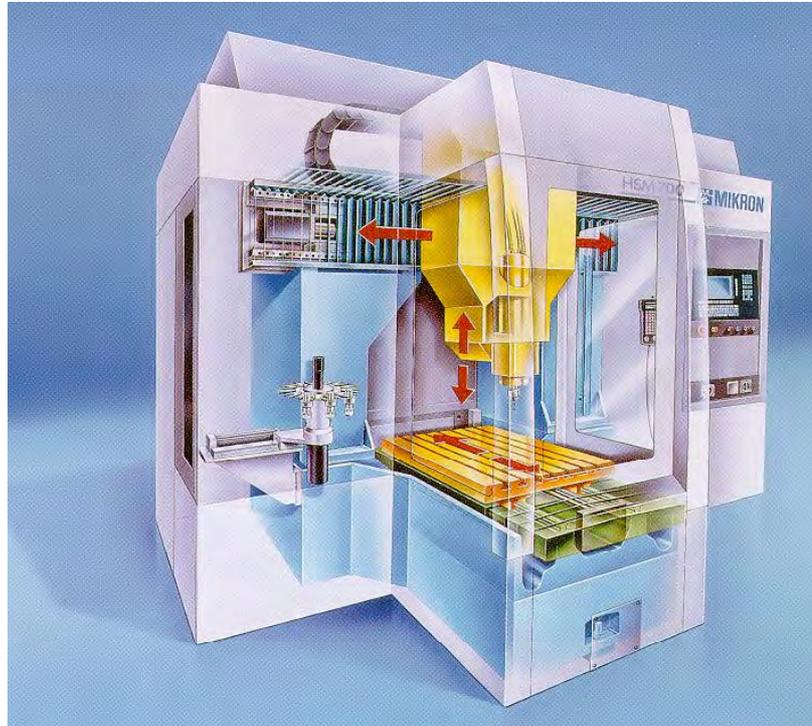
Chap 3 : STRUCTURE DES MACHINES OUTILS

=====

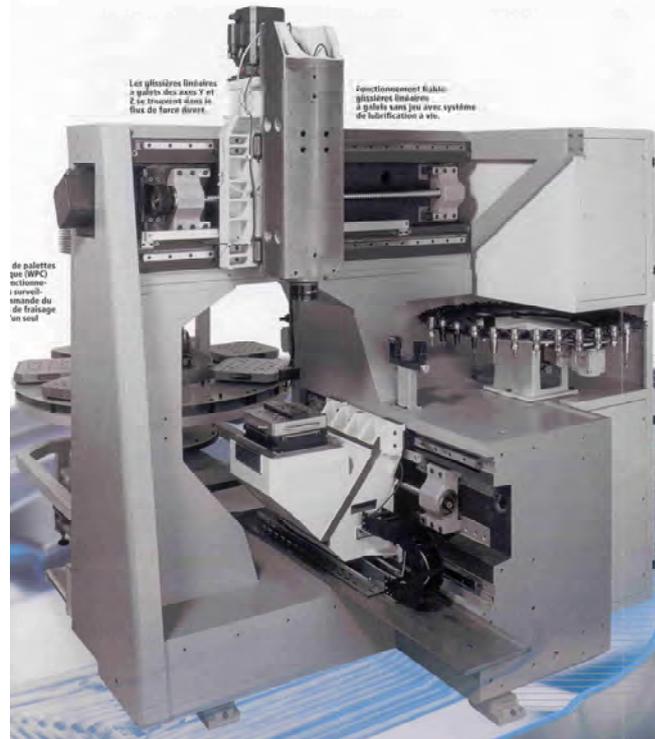
(chapitre provisoire)

31. STRUCTURE AVEC LIAISONS EN SERIE:

311. Centre d'usinage Trois axes (MOCN avec changeur d'outils) :



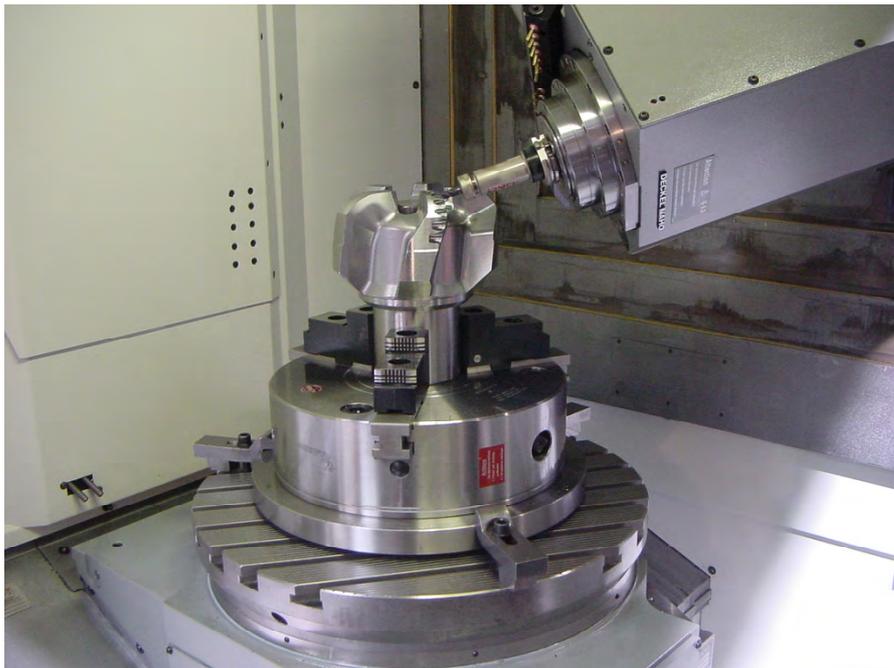
312. Cellule de Fraisage Trois axes (MOCN avec changeur d'outils et de pièces)



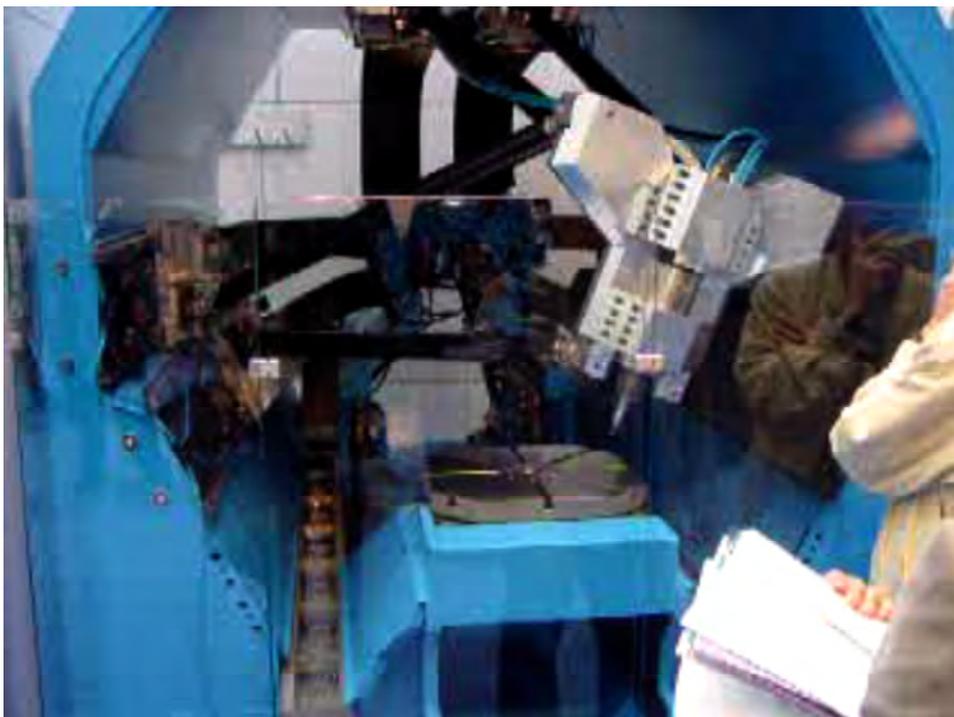
313. Centre d'usinage trois axes avec quatrième axe indexé en rotation



314. Centre de fraisage cinq axes



32. STRUCTURE AVEC LIAISONS EN PARALLELES:



Chap 4 : Montages d'usinage

41. FONCTIONS D'UN MONTAGE D'USINAGE :

Un montage d'usinage doit satisfaire trois fonctions principales :

- assurer une **mise en position des surfaces de références** de la pièce en minimisant les dispersions.
- **maintenir la pièce** en position sous les efforts de coupe.
- **positionner les outils** par rapport à la pièce.

42. TYPOLOGIE DES MONTAGES D'USINAGES

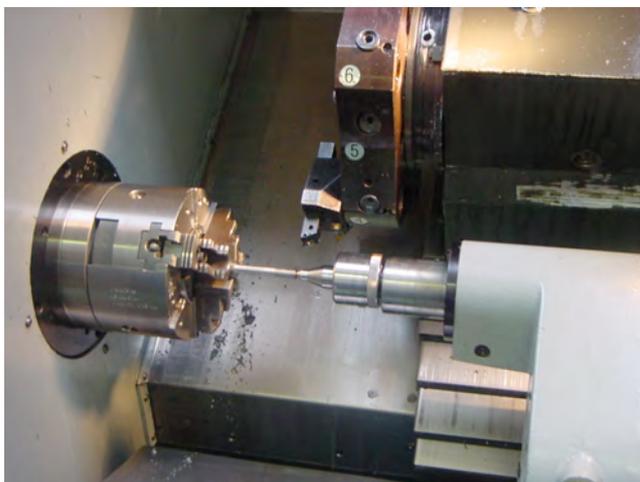
Selon que la pièce par sa fréquence de rotation assure ou non la vitesse de coupe, et selon que la morphologie générale des surfaces de référence soit ou non de révolution, on peut définir deux grandes catégories de montages d'usinage. Les montages adaptés au tournage et aux pièces de révolution (mandrin, pointes) et les montages adaptés au fraisage et aux pièces de forme générale polyédrique (montages modulaires, étaux etc..).

421. Exemples de montages adaptés au Tournage et aux pièces de révolution :

- "Montage en l'air" : mandrin à 3 mors concentriques sur centre de tournage



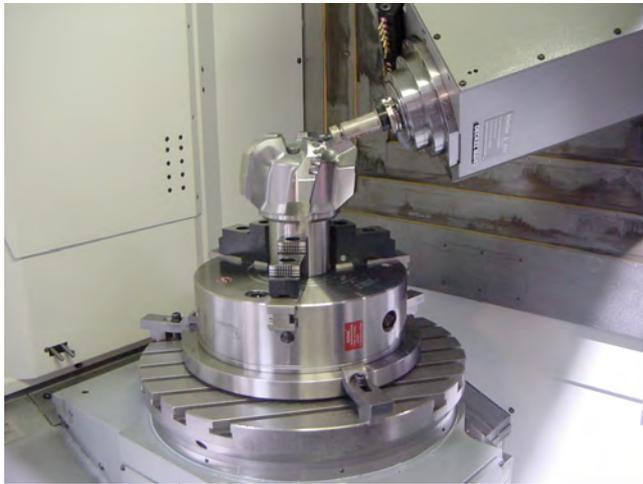
- "Montage mixte" sur tour à commande numérique



- "Montage entre pointes" sur tour à commande numérique

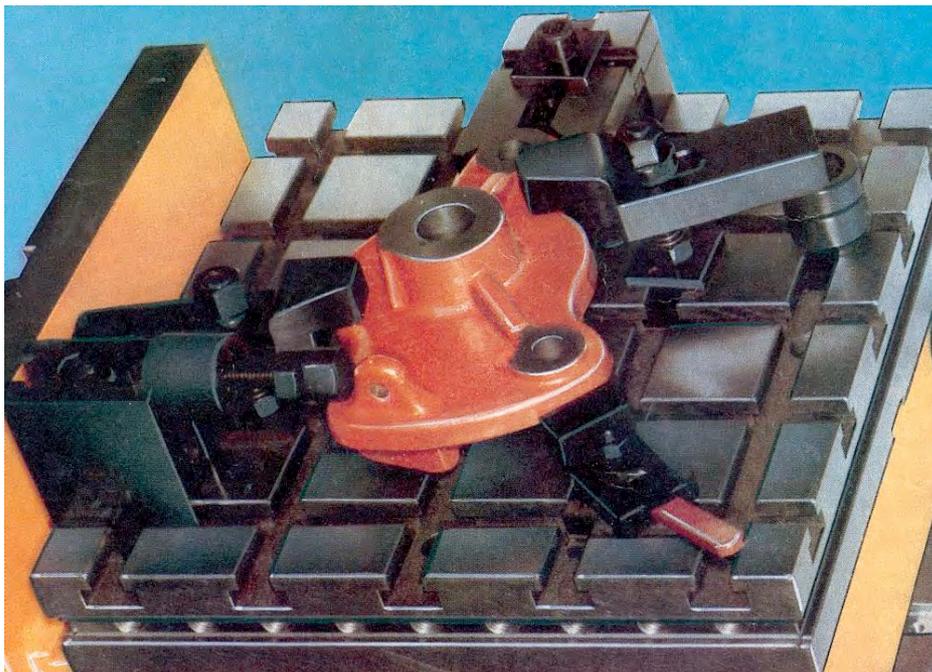


- Montage en mandrin à 3 mors concentriques, sur centre de fraisage à 5 axes.



422. Exemples de montages adaptés au Fraisage et aux pièces polyédriques :

- Montage d'usinage modulaire



Ce type de montage est constitué d'une plaque-support (ou équerre ou dé) sur laquelle il est possible de fixer différents composants standards réalisant la mise en position des surfaces de référence et le bridage de la pièce.

La préparation du montage se fait en dehors de la Machine Outil, l'ensemble du montage est ensuite positionné et fixé sur la table ou la palette de la MOCN.

L'immobilisation de la machine pour changement de production est ainsi minimisée. Une mesure de l'origine pièce par rapport à l'origine du montage est réalisée sur MMT ce qui permet de définir, hors machine-outil, le décalage de l'origine du programme de commande numérique.

La modularité des composants constituant un montage d'usinage permet de réduire les



coûts. Dans le cas de productions répétitives, les montages d'usines sont systématiquement recomposés à chaque lancement de production. L'ensemble des composants est ainsi commun à plusieurs montages d'usinage. Le temps de recomposition d'un montage est d'environ 30mn, l'opérateur possède dans ce cas une liste des composants nécessaires et une photographie du montage à recomposer.

Les figures suivantes extraites du catalogue Norelem montre des exemples de composants.

- exemples de composants permettant de réaliser des appuis



- Exemples de composants pour le bridages



43. MODELE "ISOSTATIQUE" DE POSITIONNEMENT DES SURFACES DE REFERENCES

431. Modèle isostatique

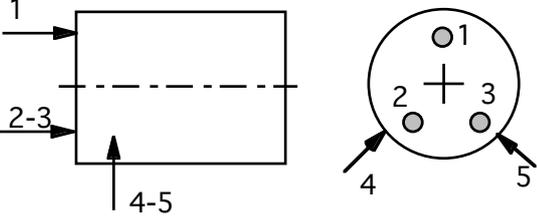
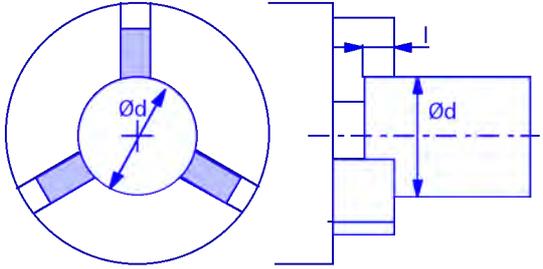
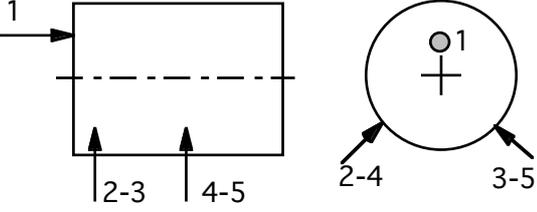
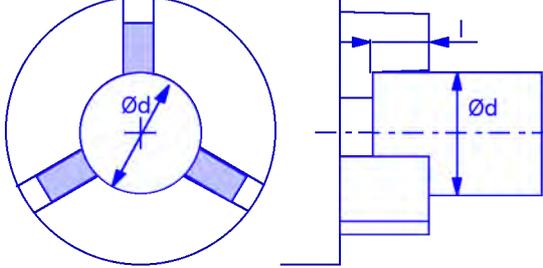
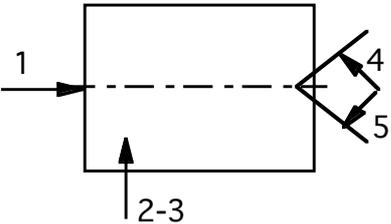
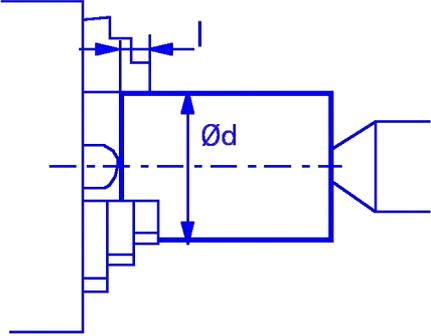
Ce modèle fait l'hypothèse que les surfaces de référence occupent une position unique. La liaison de mise en position des surfaces de référence est composée de plusieurs liaisons élémentaires en parallèles.

Chaque liaison élémentaire met en position l'une des surfaces de référence, chaque liaison est modélisée par les degrés de liberté qu'elle supprime. Exemples de montages d'usinage standards en tournage.

Type	Liaison (d° lib.)	Outillage	Liaisons cinématiques élémentaires	Liaisons en langage métier	degrés de liberté
Montage en l'air	Pivot (5)	Mandrin 3 mors à l'envers	Plane	Appui plan	3
			Linéaire annulaire	Centrage court	2
Montage en l'air	Pivot (5)	Mandrin 3 mors à l'endroit avec butée axiale	Pivot glissant Ponctuelle	Centrage long Appui ponctuel	4 1
Montage mixte	Pivot (5)	Mandrin 3 mors à l'endroit avec butée axiale et Contre pointe mobile	Linéaire annulaire	Centrage court	2
			Ponctuelle	Appui ponctuel	1
			Linéaire annulaire	Centrage court	2
Montage entre - pointes	Pivot (5)	Pointe fixe Contre-pointe mobile	Sphérique	Rotule	3
			Linéaire annulaire	Centrage court	2

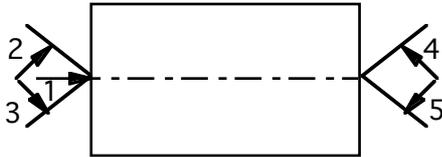
Chaque degré de liberté supprimé sera schématisé soit par une flèche attachée à la surface de référence, soit par une flèche qui relie un cadre indiquant le nombre de degrés de liberté supprimés à la surface de référence correspondante (NF E 04-013).

432. Exemple en tournage ou pour des pièces de révolution

<p><u>Montage en l'air :</u> Modélisation cinématique : une liaison plane et une liaison linéaire annulaire</p> 	<p><u>Expérimentalement</u> la pièce reprend la même position (appui plan prépondérant) si : $l/d < 0,2$</p>  <p>Dans ce cas, c'est l'appui plan qui oriente la pièce. Le défaut de coaxialité au droit des mors sera fonction du défaut d'orientation de la surface cylindrique par rapport à la face plane.</p>
<p><u>Montage en l'air :</u> Modélisation cinématique : une liaison pivot glissant et une liaison ponctuelle</p> 	<p><u>Expérimentalement</u> la pièce reprend la même position (centrage long prépondérant) si : $l/d > 0,6$</p>  <p>Dans ce cas, au droit des mors, on obtient les défauts de coaxialité suivant : avec des mors dur 0,15 mm et avec des mors doux 0,03mm</p>
<p><u>Montage mixte :</u> Modélisation cinématique : le mandrin est modélisé par une liaison linéaire annulaire et une liaison ponctuelle, la contre pointe par une liaison linéaire annulaire</p> 	<p><u>Expérimentalement</u> la pièce reprend la même position si : $l/d < 0,2$ (centrage court et contact ponctuel)</p>  <p>Dans ce cas, au droit des mors, on obtient les défauts de coaxialité suivant : avec des mors dur 0,15 mm et avec des mors doux 0,03mm, le réglage du centrage de la contre pointe avec l'axe de rotation du tour et la qualité du trou de centre sont nécessaires pour assurer la cylindricité des surfaces cylindriques usinées.</p>

Montage entre pointes :

Modélisation cinématique : la pointe tournante est modélisé par une liaison sphérique et la contre pointe par une liaison linéaire annulaire



Expérimentalement

La qualité des cylindres usinés dépend directement de l'alignement de la pointe et de la contre pointe avec l'axe de rotation du tour (défaut de conicité). La réalisation des 2 trous de centre de la pièce doit être soignée. En effet un défaut d'alignement des axes de ces deux centres provoque une variation périodique du comportement, sous efforts de coupe, des deux liaisons sphérique et linéaire

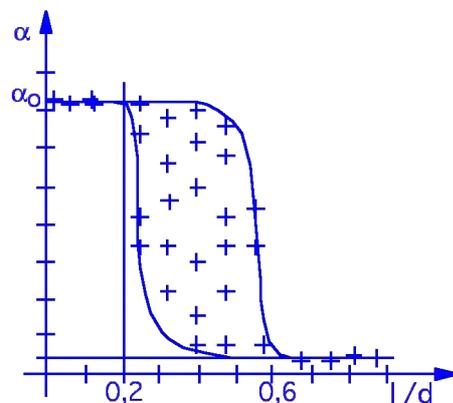
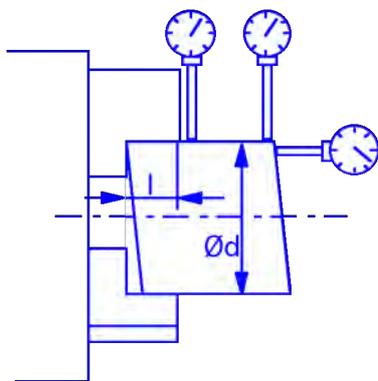
annulaire qui provoquent un défaut de cylindricité des cylindres usinés. L'entraînement en rotation est assuré le plus souvent par une pointe à picots, la dispersion axiale de mise en position est alors fonction de la variation de l'effort exercé par la contre-pointe et de la qualité géométrique de l'extrémité de la pièce. Il est nécessaire de contrôler l'effort axial exercé par la contre-pointe pour garantir un couple transmissible. Ce montage est essentiellement prévu pour réaliser des surfaces cylindriques coaxiales à l'axe des centres de la pièce, sans positionnement axial précis.

433. Mesure des écarts dans le cas d'un montage en l'air.

Le montage expérimental suivant permet de définir le comportement géométrique de la liaison entre le mandrin et la pièce. Les pièces tests utilisées sont des cylindres de qualité métrologique (sans défaut de cylindricité significatif) limités chacun par deux faces parallèles (sans défauts de forme et de parallélisme significatifs) inclinées d'un angle $\alpha_s = 10^\circ$ par rapport à l'axe du cylindre.

Les pièces tests réalisées permettent de faire varier le rapport l/d ou l est la longueur des mors en contact avec la partie cylindrique de la pièce et d le diamètre de la pièce.

Suite à de nombreux montages et démontage de chaque pièce test dans des conditions normales d'utilisation du mandrin; en reportant graphiquement les valeurs des angles α mesurés entre l'axe du cylindre et l'axe de rotation du tour, de façon générale on met en évidence deux bornes caractéristiques du comportement de la liaison. La liaison plane est prépondérante pour un rapport $l/d < 0,2$, et la liaison pivot glissant est prépondérante pour $l/d > 0,6$. Entre ses deux bornes, la mise en position de la pièce test est incertaine et doit être évitée, en effet dans ce cas il faut, à l'aide d'une massette et d'un comparateur, effectuer un ajustement "manuel" de la liaison prépondérante désirée.



434. Représentations symboliques d'un montage d'usinage

Deux niveaux de représentation symbolique sont utilisés :

- une représentation des degrés de liberté supprimés par la liaison de mise en position des surfaces de référence et,
- une représentation des éléments technologiques d'appui (mise en position des surfaces de références) et de maintien (bridage).

4341. représentation des degrés de liberté supprimés :

Chaque liaison est représentée par les degrés de liberté supprimés.

1^{ère} symbolisation : Une seule flèche par degré de liberté supprimé. Chaque flèche est numérotée de 1 à n, où n correspond au nombre total de degrés supprimé par l'ensemble des liaisons ($n \leq 6$). Bien que les flèches soient judicieusement placées sur les surfaces de référence pour représenter les "normales de repérage minimales" de la surface, les flèches ne représentent pas les points d'appui physiques du montage réalisé. Par exemple une liaison plane, réalisée par trois appuis locaux ou par une surface continue rectifiée sera représentée par trois flèches; de la même façon un mandrin à trois mors concentrique, malgré l'existence de trois zones de contact sera représenté par deux flèches à 90°.

Première symbolisation	Deuxième symbolisation

2^{ème} symbolisation : Une flèche par liaison élémentaire, attachée à un cadre indiquant le nombre de degrés de liberté supprimés par chaque liaison.

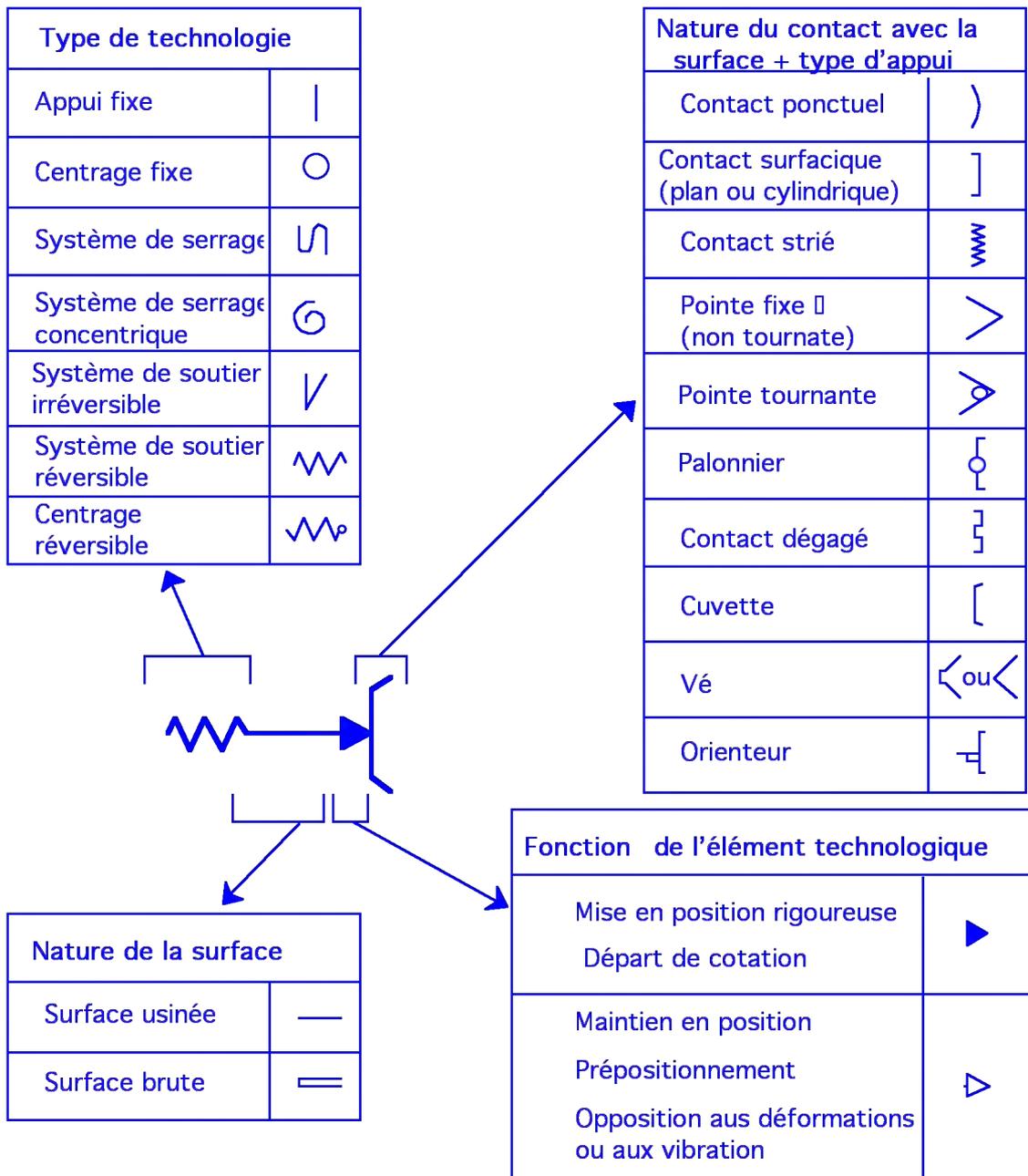
Remarque : Dans les deux symbolisations, seuls les degrés liberté supprimés sont représentés, le maintien en position n'est pas représenté par le symbole de la solution technologique (§ suivant).

4342. Représentation des solutions technologiques

La norme NF E 04-013 définit la symbolisation des solutions technologiques de prises de pièces, c'est-à-dire la symbolisation des éléments d'appui des surfaces de référence et des éléments de maintien en position. Cette symbolisation ne doit pas figurer sur les documents portant la symbolisation des degrés de liberté supprimés.

Le tableau suivant présente succinctement le principe d'établissement des symboles, pour plus de détail se reporter à la norme NF E 04-013 (16 pages)

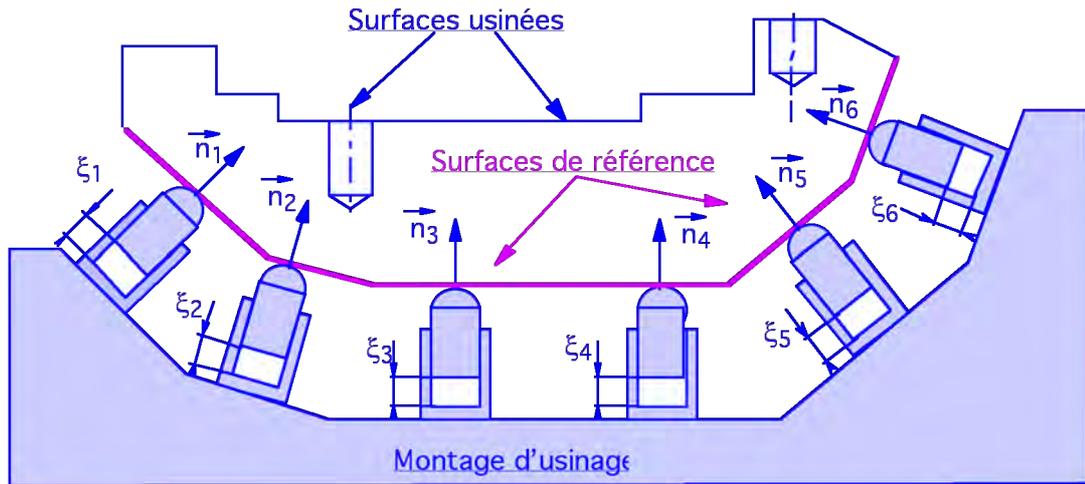
Chaque symbole est construit à l'aide de quatre symboles élémentaires permettant de préciser : le type de technologie, la nature de la surface, la fonction de l'élément et la nature du contact et/ou le type d'appui.



44. MODELE "ISOSTATIQUE" AVEC PRISE EN COMPTE DES DEFAUTS

441. Modèle proposé

On peut considérer le montage d'usinage comme un amplificateur de défauts. En effet, les écarts de mise en position des surfaces de référence par rapport à une position idéale sont dus à la variation de position des points de contact entre les appuis et les surfaces de la pièce. On peut donc considérer que la position de chaque contact varie d'un écart ξ_i suivant la normale au contact. À chaque ensemble de six écarts ξ_i $\{i=1\dots 6\}$, correspond un écart de position du repère attaché aux surfaces de référence, cet écart peut-être exprimé par un torseur de petits déplacements.



La mise en équation est immédiate.

Dans un repère $\{O; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}\}$ associé à la position idéale de la pièce dans le montage d'usinage (tous les $\xi_i = 0$), le petit déplacement des surfaces de référence, qui est du à un ensemble de valeurs prises par chaque ξ_i , est défini au point O par le torseur :

$$T_o \left| \begin{array}{l} \vec{R} \\ \left\{ \begin{array}{l} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{array} \right\} \\ \vec{D}_o \end{array} \right\{ \begin{array}{l} u \\ v \\ w \end{array} \right.$$

Si I_i est le point de position idéale d'un contact, le déplacement du point de contact suivant la normale \vec{n}_i est :

$$(\vec{D}_{I_i}) \cdot \vec{n}_i = \xi_i$$

Soit : $(\vec{D}_o + I_i \vec{O} \wedge \vec{R}) \cdot \vec{n}_i = \xi_i$

Et $\vec{D}_o \cdot \vec{n}_i + (O \vec{I}_i \wedge \vec{n}_i) \cdot \vec{R} = \xi_i$

On obtient un système de 6 équations linéaires à 6 inconnues qui en posant :

$$\vec{n}_i = a_i \vec{x} + b_i \vec{y} + c_i \vec{z}$$

et $O \vec{I}_i \wedge \vec{n}_i = l_i \vec{x} + m_i \vec{y} + n_i \vec{z}$

peut-être mis sous de la forme :

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & l_1 & m_1 & n_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & l_2 & m_2 & n_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & l_3 & m_3 & n_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & l_4 & m_4 & n_4 \\ a_5 & b_5 & c_5 & l_5 & m_5 & n_5 \\ a_6 & b_6 & c_6 & l_6 & m_6 & n_6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{pmatrix}$$

Si le déterminant de la matrice est différent de zéro, le système est isostatique et la mise en position est de rang 6 (les 6 degrés de liberté sont éliminés).

Si le déterminant de la matrice est nul, la mise en position de la pièce possède au moins un degré de liberté. En cherchant le rang de la matrice on définit ainsi le rang de la mise en position et par suite le nombre de degrés de liberté supprimés.

442. Exemples de simulation d'un montage d'usinage :

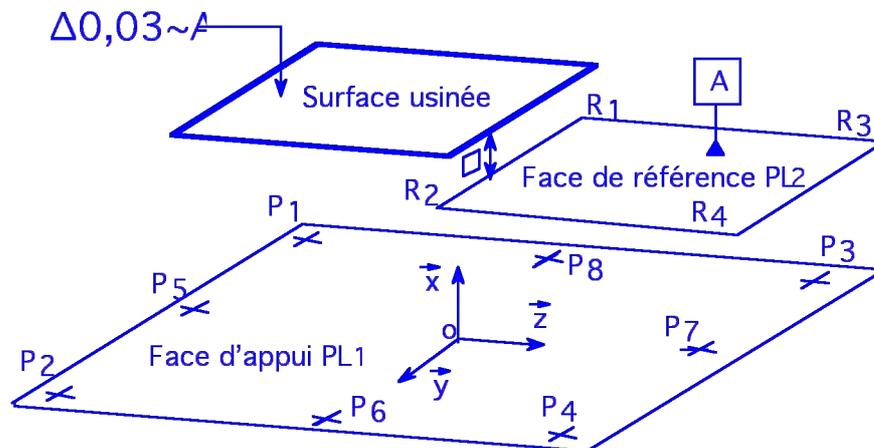
4421. Comparaison entre plusieurs solutions de mise en position :

Une face plane PL1 de contour rectangulaire est mise en position par trois appuis ponctuels. Quelle est la meilleure disposition des trois appuis qui minimise la dispersion d'une face plane de référence PL2 en projection sur un axe perpendiculaire à la face PL2 en position idéale ?

Hypothèses :

- la qualité de chacun des appuis est identique (même valeur de l'intervalle de variation de chaque ξ_i),
- le problème étant linéaire la meilleure position des appuis sera sur le contour de la face rectangulaire.

Afin de limiter le nombre de cas à comparer, les trois appuis seront choisis parmi huit points d'appuis P_i potentiellement les meilleurs, quatre points aux sommets du rectangle $\{P_1 \dots P_4\}$ et quatre points au milieu de chacun des cotés $\{P_5 \dots P_8\}$. (voir figure ci-dessous)



Il existe 2^8 combinaisons possibles (256). Étudions pour une combinaison k , la variation de mise en position de la face PL2 due aux variations de mise en position des trois d'appui P_j choisis.

Le torseur de petit déplacement exprimé au point O est de la forme

$$T_o \left[\begin{array}{c} \vec{R} \\ \vec{D}_o \end{array} \right] = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ - \\ - \\ w \end{pmatrix}$$

Sachant que chaque point P_j a pour composantes $(X_j \vec{x}, Y_j \vec{y}, 0 \vec{z})$ et que chaque normale unitaire aux points P_j a pour composantes $(0 \vec{x}, 0 \vec{y}, 1 \vec{z})$

Pour la combinaison k (par exemple j {1, 2, 7}) Les trois petits déplacements sont donnés par la solution du système :

$$\begin{pmatrix} 1 & Y_1 & -X_1 \\ 1 & Y_2 & -Y_2 \\ 1 & Y_7 & -Y_7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_k \\ \alpha_k \\ \beta_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_7 \end{pmatrix}$$

En prenant chacun des écarts à son maximum puis à son minimum, en les combinant on obtient pour une combinaison k de 3 appuis, 2^3 torseurs T_t extrêmes (avec t {1...8}).

Il est possible de calculer pour les quatre points $R_1 R_m \dots R_4$ de la surface de référence les écarts $E_{k,t,m}$ dus à chaque torseur extrême :

$$E_{k,t,m} = w_{k,t} - X_{R_m} \beta_{k,t} + Y_{R_m} \alpha_{k,t}$$

On retient pour une combinaison k l'intervalle de variation de $E_{k,t,m}$

$$\Delta E_{k,t,m} = \sup(E_{k,t,m}) - \inf(E_{k,t,m}) \quad \text{avec } t \{1 \dots 8\} \text{ et } m \{1,2,3,4\}$$

En faisant varier les combinaisons k des points d'appui on retient la solution qui donne la valeur de $\Delta E_{k,t,m}$ minimum

Remarque : Cette simulation peut être appliquée à la recherche automatique de la position des points d'appui donnant la meilleure mise en position d'une ou de plusieurs surfaces de référence. Pour cela toutes les surfaces d'appui potentielles de la pièce sont quadrillées. Chaque point du quadrillage pouvant être un point de contact avec le montage d'usinage, toute combinaison de points de contact donnant une solution peut être systématiquement calculé. Afin de limiter le calcul de toutes les combinaisons de solutions de montage d'usinage (nombre de combinaisons trop important), on lui préfère une méthode dite de Monté Carlo, où chaque combinaison est obtenue par tirage aléatoire, l'algorithme de calcul est dans ce cas limité par le choix d'une durée de traitement.

4422. Simulation d'un liaison linéaire annulaire réalisé par un montage en mors doux

Cette liaison élimine deux degrés de liberté, le défaut de coaxialité au droit des mors est de 0,03 mm. Le centre de la surface de révolution de la pièce est donc situé dans un cercle de diamètre $\varnothing=0,03$ mm.

La liaison est modélisée par deux contacts ponctuels situés à 90° , chaque contact ponctuel possède un écart ξ_i variant dans l'intervalle $\pm 0,015$ mm.

Si comme précédemment, les écarts ξ_i sont indépendants, le centre de la pièce décrit une zone de tolérance de forme carré.

Un changement de variable permet d'obtenir une zone de tolérance circulaire.

$$\xi_1 = 0,015 \cos \theta$$

$$\xi_2 = 0,015 \sin \theta$$

avec dans ce cas $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$

