

Support du cours destiné pour 1^{er} année Productique Mécanique et industrialisation (PMI)

Cours Bureau Des Méthodes (BDM)



Enseignant : Layachi Abdelheq

UEM 2	PRODUCTIQUE, INDUSTRIALISATION	Volume Horaire : 12h CM, 21h TD, 18h TP
Coef. : 3 ECTS	FAB 3 – Bureau des Méthodes	Semestre 2
<p>Objectifs du module :</p> <p>Analyser les éléments de fabrication et définir les procédés et processus, les moyens et les modes opératoires.</p> <p>Etablir les documents de fabrication (gammes, procédures, cahiers des charges, ...) et en contrôler la conformité d'application.</p> <p>Sélectionner les machines, les outillages appropriés.</p>		
<p>Compétences visées :</p> <p>L'objectif de ce module est de faire acquérir la compétence particulière relative à l'élaboration et rédaction d'un mode opératoire ou de gamme d'usinage à partir d'un cahier des charges et d'un plan d'ensemble ou de définition de la pièce. Il vise donc à rendre l'étudiant apte à analyser la fabrication des pièces mécaniques et d'établir les documents nécessaires à leur fabrication. L'étudiant apprendra à utiliser les documents relationnels des méthodes et apprendra à élaborer des processus d'usinage en tournage et fraisage sur des pièces mécaniques comportant plusieurs phases d'usinage.</p>		
<p>Pré requis : M 121FAB 1 - Technologie de Fabrication, M 221- FAB 2 - Mise en Œuvre des Moyens de Production.</p>		
<p>Contenus :</p> <p>Analyse de fabrication et gamme d'usinage</p> <p>La fonction méthodes d'usinage</p> <p>La cotation de fabrication</p> <p>Mise en position des pièces (isostatisme)</p> <p>Tolérances de forme, d'orientation et de position</p> <p>Analyse de fabrication ; choix des surfaces de référence et réglage des appuis</p> <p>Positionnement et montage d'usinage</p> <p>Ordonnancement des opérations d'usinage</p> <p>Recherche de l'ordre chronologique des opérations d'usinage cotes de réglage et applications pratiques</p> <p>Méthodologie d'établissement des processus d'usinage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • repérage des surfaces élémentaires • étude des graphes ordonnés • analyse des contraintes particulières d'usinage • influence des contraintes d'usinage sur le graphe ordonné <p>Approche de la technologie de groupe</p> <p>Exemples et applications</p>		
<p>Modalités de mise en œuvre :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les étudiants auront à faire en groupe des exposés sur des thèmes techniques d'usinage (perçage, tournage, fraisage, rectification) englobant les équipements, les outils, les outillages, les capacités et les différents types de machines. • Le travail en groupe et en sous-groupe sera favorisé par le formateur • Mettre les étudiants dans des situations réelles de production en provoquant des relations client fournisseurs 		
<p>Prolongements possibles :</p> <p>M 322 FAB 5 : Méthodes de production (Phase de Fabrication et Coûts)</p>		

Sommaire

Chapitre I : L'analyse d'usinage	
1. Introduction.....	5
2. L'étude de fabrication.....	5
2.1. Introduction.....	5
2.2. Le produit.....	6
2.2.1. Le dessin de définition du produit	6
2.2.2. Le dessin de définition du brut capable.....	7
2.2.3. Le dessin de définition du produit fini.....	8
2.2.4. Le dessin de définition du brut fini.....	8
2.3. Les spécifications produites.....	9
2.3.1. Les spécifications dimensionnelles.....	9
2.3.2. Les spécifications géométriques.....	10
Chapitre II : Le dossier d'étude de fabrication	
1. Le programme de fabrication.....	14
2. Le dessin de définition du produit.....	14
3. Le dessin du brut capable.....	15
4. L'avant-projet d'étude de fabrication (APEF)	15
5. Les feuilles de contrôle de l'Avant-Projet d'Études de Fabrication (APEF)	16
6. Le projet d'étude de fabrication (PEF)	16
7. L'étude de fabrication définitive.....	16
Chapitre III : L'élaboration d'APEF et Ordonnancement	
1. Dessin de définition bureau des méthodes.....	17
2. Les critères d'élaboration.....	17
2.1. Les contraintes technologiques.....	17
a. Contraintes de spécifications dimensionnelles.....	18
b. Contraintes de spécifications géométriques.....	18
c. Ordonnancement des séquences d'usinage.....	19
2.2. Critères économiques.....	22
2.3. Les critères physiques.....	23
3. Conclusions.....	23
Chapitre IV : La mise en position isostatique	
1. Introduction.....	24
2. L'isostatisme - généralités.....	24
3. L'étude théorique du repérage isostatique.....	24
3.1. Les objectifs.....	24
3.2. Les degrés de liberté ; principe de Kelvin.....	25
3.3. Les conditions d'isostaticité ; liaison de mise en position.....	25
3.4. Face de référence.....	26
4. La représentation normalisée d'un degré de liaison.....	27
5. Les liaisons isostatiques élémentaires.....	28
5.1. La mise en position par liaison ponctuelle (LP)	28
5.2. La mise en position par liaison linéaire rectiligne (LR)	28
5.3. La mise en position par liaison linéaire annulaire (LA) : gouttière, anneau,	28
5.4. La mise en position par liaison appui plan (AP)	29
5.5. La mise en position par liaison rotule.....	29
5.6. La mise en position par liaison pivot glissant (verrou)	29
5.7. La mise en position par liaison pivot.....	29
6. Le choix des surfaces de mise en position.....	30
6.1. Le principe.....	30
6.2. Les règles de choix.....	30
7. TD mise en position isostatique.....	31
Chapitre V : Le dimensionnement et la cotation d'usinage	
1. La cotation fonctionnelle.....	34
2. Définitions.....	34
a. La cote condition ou le jeu.....	34
b. La cote fonctionnelle.....	34
c. Les surfaces terminales.....	34

d. Les surfaces d'appui ou de contact.....	34
e. Chaîne de cotes.....	34
3. Cotation de fabrication.....	36
4. Les cotations bureau d'études (BE) et bureau de méthodes (BM)	37
5. Les cotes fabriquées.....	37
5.1. La recherche d'une cotation d'usinage logique.....	38
5.2. Les différentes cotes de fabrication.....	38
a. Les cotes-appareillages (C_a)	39
b. Les Cotes-outils (C_o)	39
c. La notion de référentiel auxiliaire de réglage.....	40
d. Conseil : Choix d'une cote d'usinage.....	40
e. Une cote outil C_o est souvent préférable à une cote-machine C_m	40
f. Une cote appareil C_a est souvent préférable à une cote-machine.....	41
6. Conclusion.....	41
Chapitre VI : Les cotes de fabrication : transfert de cotes	
1. Introduction.....	42
2. Définitions.....	42
a. Cote directe.....	42
b. Cote transférée.....	42
c. Cotes-méthodes.....	42
d. Cotes-conditions CC.....	44
e. Tolérances économiques.....	44
3. Le transfert de cotes (TC)	45
4. Les méthodes de calcul d'un transfert de cote.....	49
a. La méthode des cotes limites.....	50
b. La méthode des cotes moyennes.....	51
c. Le calcul du transfert total.....	53
5. La simulation d'usinage.....	55
5.1. Introduction.....	55
5.2. La méthodologie d'établissement d'une simulation d'usinage.....	55
5.3. Interprétation des cotes de brut calculées dans la simulation.....	55
5.4. Le transfert de côtes : cas des tolérances géométriques.....	56
Chapitre VII : Méthodologie d'établissement des processus d'usinage	
1. Influence des contraintes d'usinage sur le graphe ordonne.....	63
2. Influence de l'ordre d'intervention des opérations élémentaires.....	63
3. Changements de niveaux imposés par les contraintes d'usinage.....	63
4. Etablissement du graphe ordonné final.....	64
Chapitre VIII : La réalisation des gammes d'usinage	
1. Rôle d'une gamme d'usinage.....	65
2. Le choix des surfaces de référence.....	65
3. Le choix des surfaces de départ.....	65
4. La conduite de l'usinage.....	66
a. Les moyens à mettre en œuvre.....	66
b. La décomposition de l'usinage en opérations élémentaires.....	64
5. L'association des surfaces à usiner.....	67
6. Le traitement des gammes d'usinage.....	68
7. Exemple réalisation des gammes d'usinage.....	74
Références bibliographiques.....	81

Chapitre I : L'analyse d'usinage

1. Introduction

L'analyse d'usinage comporte trois aspects essentiels pour la préparation du travail :

L'étude de fabrication

L'élaboration des gammes

L'analyse des phases

Dans la présente section on aborde les aspects précités en se fixant comme objectifs :

De définir la suite logique des usinages pour une pièce à réaliser

De choisir les machines et les outillages à employer pour réaliser des pièces bonnes, à un prix de revient minimal

De rédiger les documents nécessaires au lancement et au suivi des travaux à l'atelier

On introduira dans cette optique les notions théoriques permettant de formuler des considérations technologiques relatives à la mise en position des pièces sur les machines - outils (MO), à la cotation de fabrication, ou encore à l'établissement des gammes d'usinage. L'analyse détaillée des documents fournis par le bureau d'études (BE) précède toute décision, il faut évaluer et analyser avec attention les spécifications dimensionnelles et géométriques des pièces afin de constituer des dossiers de fabrication rigoureux et précis.

2. L'étude de fabrication

2.1. Introduction

L'étude de fabrication représente la recherche des solutions permettant l'obtention de pièces bonnes au coût minimum, par la combinaison des informations relatives à l'ordre chronologique des opérations, à l'utilisation de main d'œuvre, de parc machines et d'outils déterminés.

Pour l'industrialisation d'un produit en vue de sa commercialisation le bureau des méthodes (BM) réalise un dossier d'étude de fabrication. Cette étude prévisionnelle permettra au technicien des méthodes de consigner, pour un produit déterminé, les décisions concernant :

L'ordre des phases et des opérations d'usinage qu'elles comportent,

Le choix des machines-outils,

Le choix d'outils et des outillages,

Les spécifications de contrôle géométrique et dimensionnel

Les réglages à faire,

Le choix des conditions de coupe,

L'étude prévisionnelle des temps et des prix.

Pour l'établissement du processus d'usinage on prendra donc en compte les contraintes liées aux données techniques et économiques du produit, ainsi que celles liées aux moyens de production disponibles dans l'entreprise.

2.2. Le produit

Un produit est le résultat fabriqué correspondant à un besoin.

La conception entraîne la mise en œuvre du/des procédé/s d'usinage permettant de l'obtenir.

Le procédé retenu détermine un équipement de production plus ou moins facile à automatiser.

Si le procédé est remis en cause le produit doit évoluer, si l'équipement est difficile à automatiser le procédé doit être remis en cause.

Définition :

Un **produit** sera dit **élémentaire** si, selon le besoin exprimé par le cahier des charges, les processus de mise en œuvre pour l'obtenir sont indépendants d'un autre produit ou d'un autre besoin.

Rappel :

La productique recouvre l'ensemble des trois concepts industriels essentiels : le produit, le procédé, l'équipement

2.2.1 Le dessin de définition du produit

Le but du dessin de définition d'un produit élémentaire est de définir l'agencement relatif des surfaces, la distribution de la matière et les spécifications le caractérisant. Selon l'état d'avancement de l'étude, on peut distinguer :

a) le projet de dessin de définition de produit.

Données :

le cahier de charges,

le dessin d'ensemble.

Contenu :

les surfaces fonctionnelles,
les spécifications fonctionnelles,
les options sur la matière.

Élaboration : bureau d'études (BE).

b) le dessin de définition de produit.

Données :

Le projet de dessin de définition du produit,
Le contexte économique et technique de l'entreprise (données disponibles).

Contenu :

La disposition relative des surfaces,
La distribution de la matière,
Les spécifications fonctionnelles,
La matière et le procédé d'obtention du brut.

Élaboration : bureau d'études (BE) en concertation avec le bureau des méthodes.

2.2.2 Le dessin de définition du brut capable

Données :

Le dessin de définition du produit,
Le projet d'étude de fabrication,
Le calcul des cotes fabriquées,
Le procédé d'élaboration du brut,
Le dessin du brut non coté.

Contenu :

La disposition relative des surfaces brutes de fabrication

le(s) plan(s) de joint éventuel(s),

La disposition et la forme des surfaces brutes de mise en position pour la fabrication,

La cotation fabriquée brute garantissant la réalisation du produit

Elaboration : bureau des méthodes d'usinage (BM).

2.2.3 Le dessin de définition du produit fini

Données :

Le dessin de définition du produit,

Les résultats de fabrication obtenus en présérie et série.

Contenu : tous les éléments permettant de préciser sans ambiguïté l'état de finition du produit fabriqué.

Élaboration : bureau d'étude (BE), qui prend en charge le regroupement des données nécessaires à l'élaboration de ce document

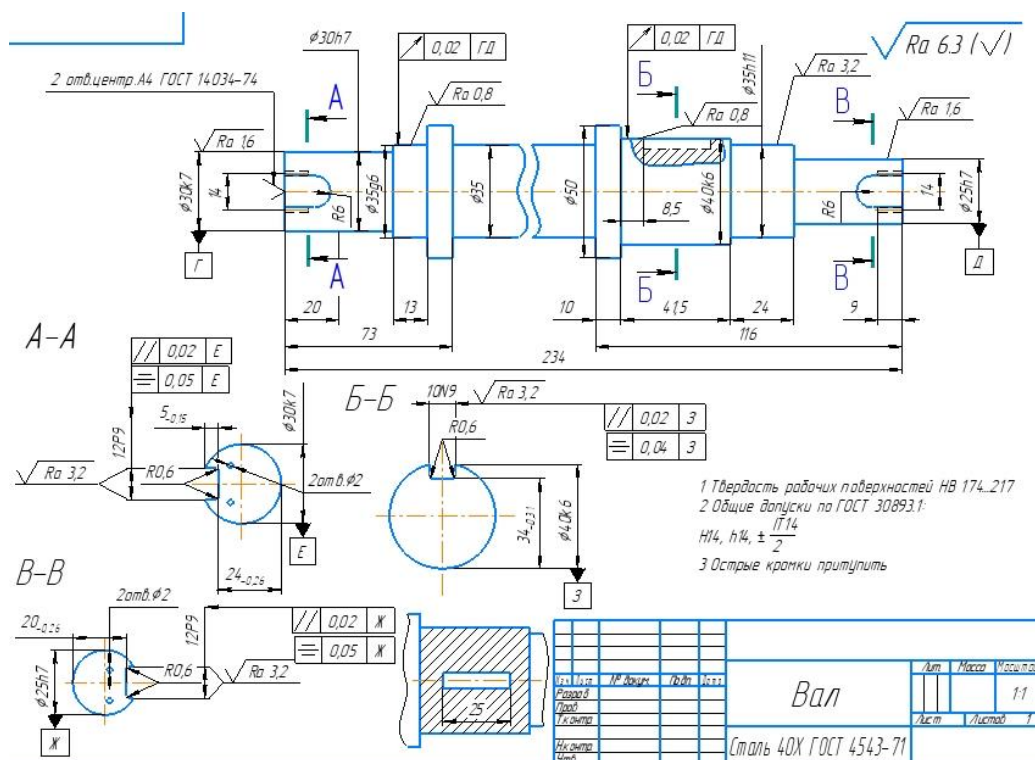


Figure I.1 : Dessin de définition du produit fini

2.2.4 Le dessin de définition du brut fini

Données :

Le dessin de définition du brut capable,

L'étude de moulage,

Les résultats de la fabrication des bruts.

Contenu : tous les éléments permettant de préciser sans ambiguïté l'état du produit brut fini.

Elaboration : bureau des méthodes brut (BM).

2.3. Les spécifications produites

Les spécifications sont les différentes indications contenues sur le dessin de définition du produit. Elles permettent de traduire le besoin initial en termes utilisables par les techniciens.

2.3.1. Les spécifications dimensionnelles

Rappel :

Le technicien en fabrication mécanique doit être capable de décoder les spécifications pour définir le processus d'élaboration du produit.

*** Définition :**

Une **dimension** est la valeur de la mesure effectuée dans une direction donnée, entre deux points appartenant à la même pièce.

*** Définition :**

Les spécifications dimensionnelles portées sur un dessin de définition de produit sont appelées **cotes**.

Une cote est l'ensemble ordonné des dimensions des pièces d'une série. Cet ensemble est toujours borné car le nombre d'éléments d'une série est toujours fini.

Symbole	Définition
C_{min}	Dimension minimale de l'ensemble cote
C_{max}	Dimension maximale de l'ensemble cote
C	Dimension nominale choisie
IT	Intervalle de tolérance $C_{max} - C_{min}$
e_s	Ecart supérieur $C_{max} - C$
e_i	Ecart inférieur $C_{min} - C$
C_{moy}	Dimension moyenne

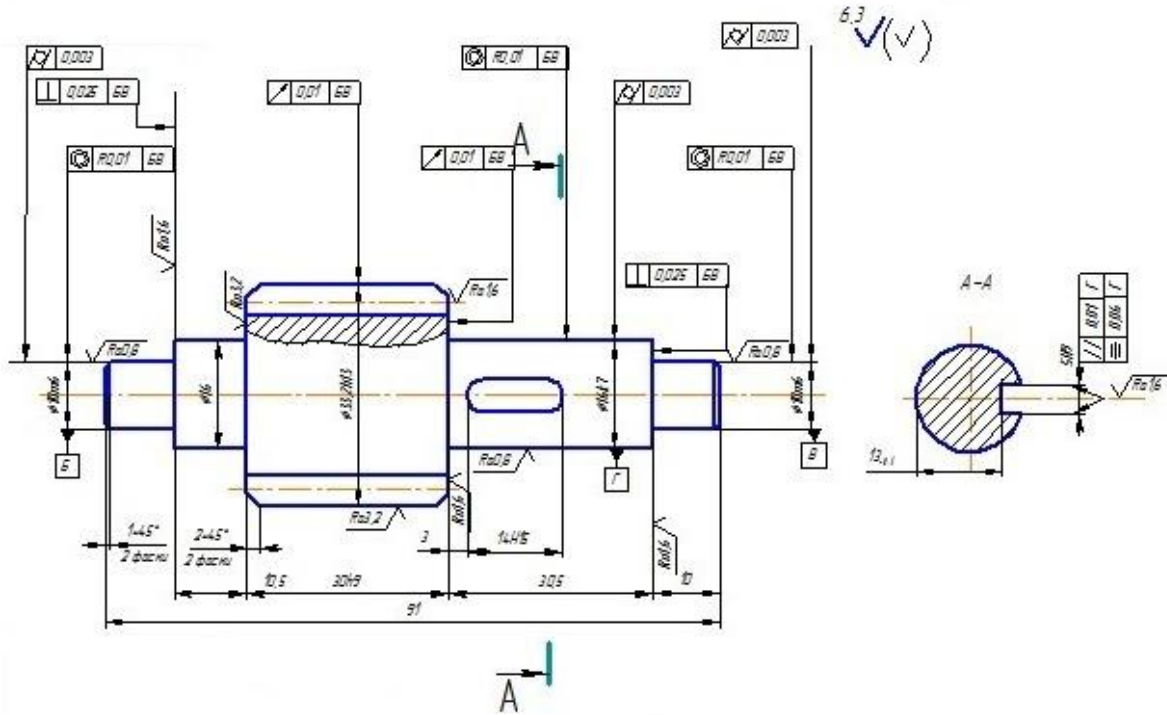


Figure I.2 : Exemples de cotes

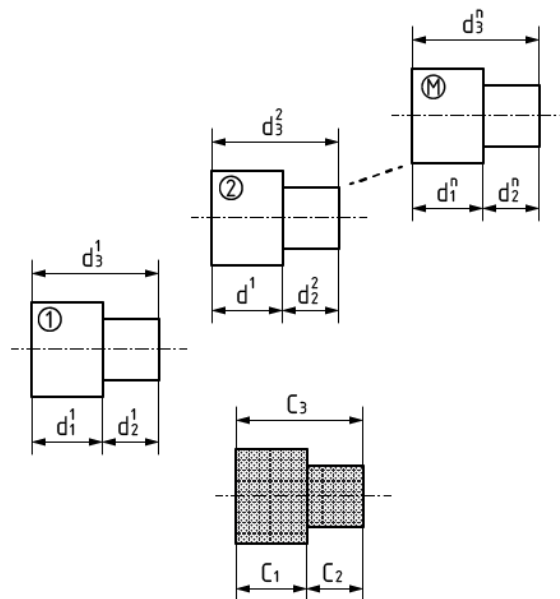


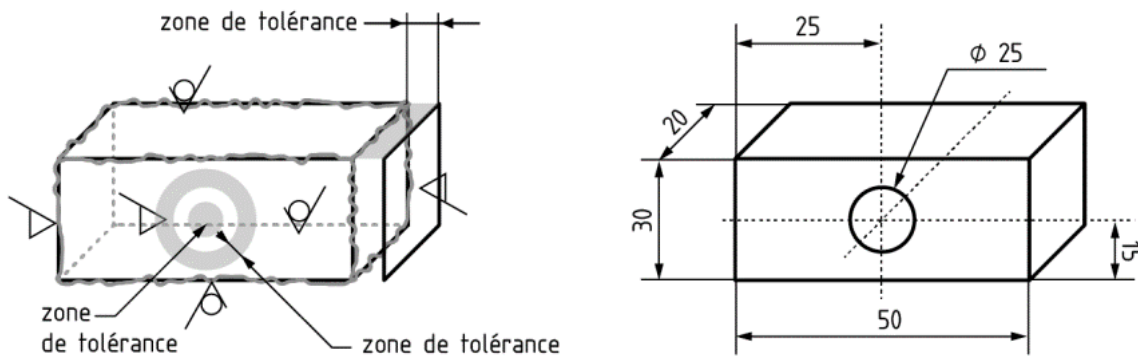
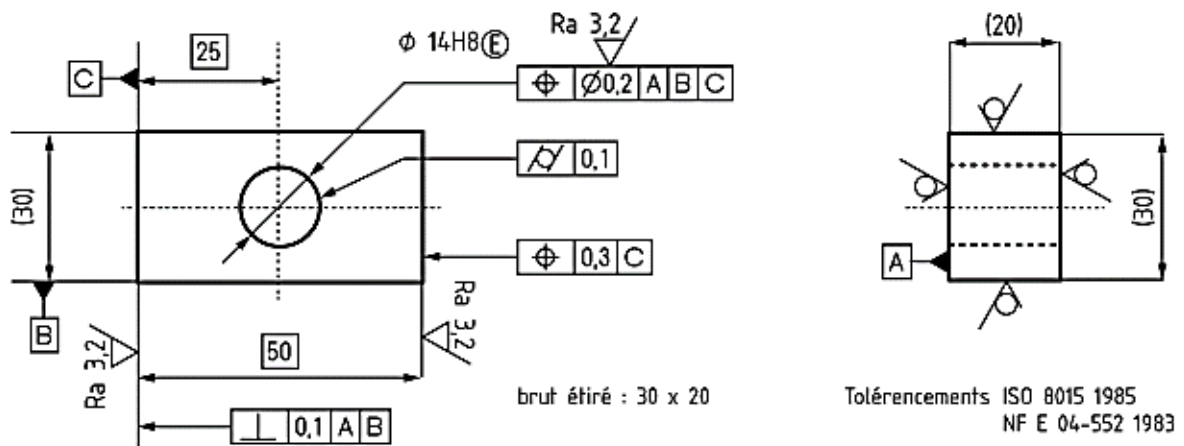
Figure I.3 : Soit une série de n pièces pour laquelle on définit une (des) cote(s)

2.3.2 Les spécifications géométriques

Définition :

La **spécification géométrique** des produits consiste à définir, sur le dessin de définition, la forme, les dimensions et les caractéristiques de surface d'une pièce qui lui assurent un

La géométrie idéale de la pièce (géométrie parfaite ou nominale).



Conformément aux normes ISO de cotation il faut faire distinction entre les notions de tolérance et écart : la tolérance représente la largeur de la zone de tolérance admise selon la cotation, tandis que l'écart caractérise le défaut d'une pièce. La définition de l'écart dépend du type de spécification :

Écart de forme : caractérise la largeur de la zone dans laquelle peut être incluse la surface réelle d'une pièce réelle,

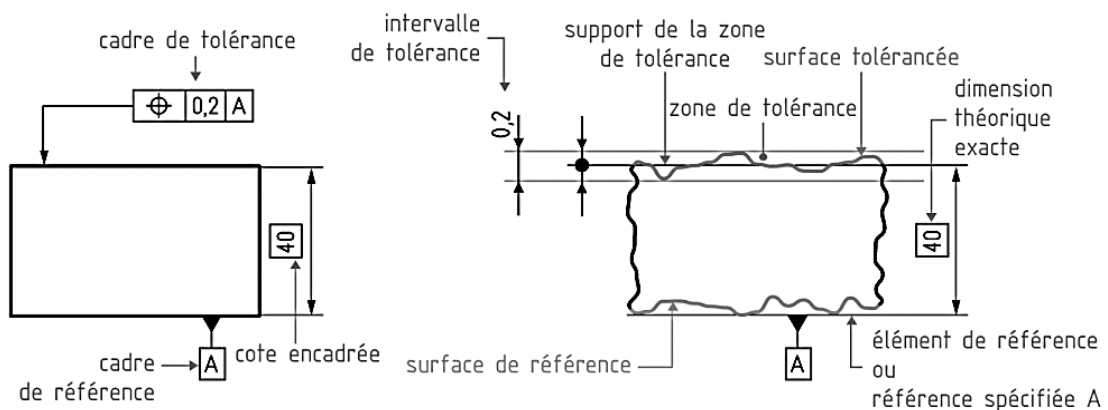
Écart d'orientation : caractérise la largeur de la zone parallèle à la référence dans laquelle peut être incluse la surface réelle d'une pièce réelle,

Écart de position : caractérise la plus grande distance entre l'élément tolérance et la surface nominale.

Tolérances	Cas Généraux		Cas Particuliers	
Forme	Forme d'une ligne quelconque		Rectitude	
			Circularité	
	Forme d'une surface quelconque		Planéité	
			Cylindricité	
Orientation	Inclinaison		Parallélisme	
			Perpendicularité	
Position	Localisation		Concentricité	
			Coaxialité	
			Symétrie	

Principe du tolérancement géométrique

Une tolérance géométrique est toujours appliquée à un élément réel (sauf pour les surfaces projetées). Elle indique la dimension de la zone à l'intérieur de laquelle l'élément doit être compris. L'analyse de la pièce illustrée ci-après nous aide à proposer quelques définitions et notions de base.



Notions de base :

La référence est une surface de forme parfaite associée à l'élément de référence réel,

La surface nominale est située à 40 mm de la référence,

La zone de tolérance est un espace limité par deux plans parallèles au plan de référence distants de 0,2 mm, situés symétriquement par rapport à la surface nominale,

La surface réelle doit être comprise dans la zone de tolérance.

Chapitre II : Le dossier d'étude de fabrication

1. Le programme de fabrication

Le programme de fabrication fournit et concerne :

Les informations relatives à la quantité et la cadence des pièces à produire,

La nature et la qualification de la main d'œuvre,

La nature du parc machines disponible, les fiches techniques de ces machines,

Le délai de fabrication,

Le coût horaire des postes de travail.

2. Le dessin de définition du produit

Ce document, issu du BE, doit exprimer les seules conditions fonctionnelles destinées à être prises en compte pour le contrôle de réception. Il apporte des informations concernant la pièce en précisant notamment :

Le nom, la matière et des informations complémentaires telles que les tolérances, la dureté, les traitements thermiques à appliquer, etc.

La morphologie générale de la pièce, à l'aide des vues principales, des vues et coupes partielles et éventuellement d'une représentation volumique 3D ;

Les fonctionnalités de la pièce grâce :

Aux cotes nominales,

Aux tolérances dimensionnelles,

Aux spécifications géométriques,

Aux états de surface.

L'étude du dessin de définition aura une incidence sur : le type et la capacité des machines choisies pour réaliser les usinages, les paramètres de coupe, la mise en position de la première phase de la gamme, et le repérage des surfaces à usiner.

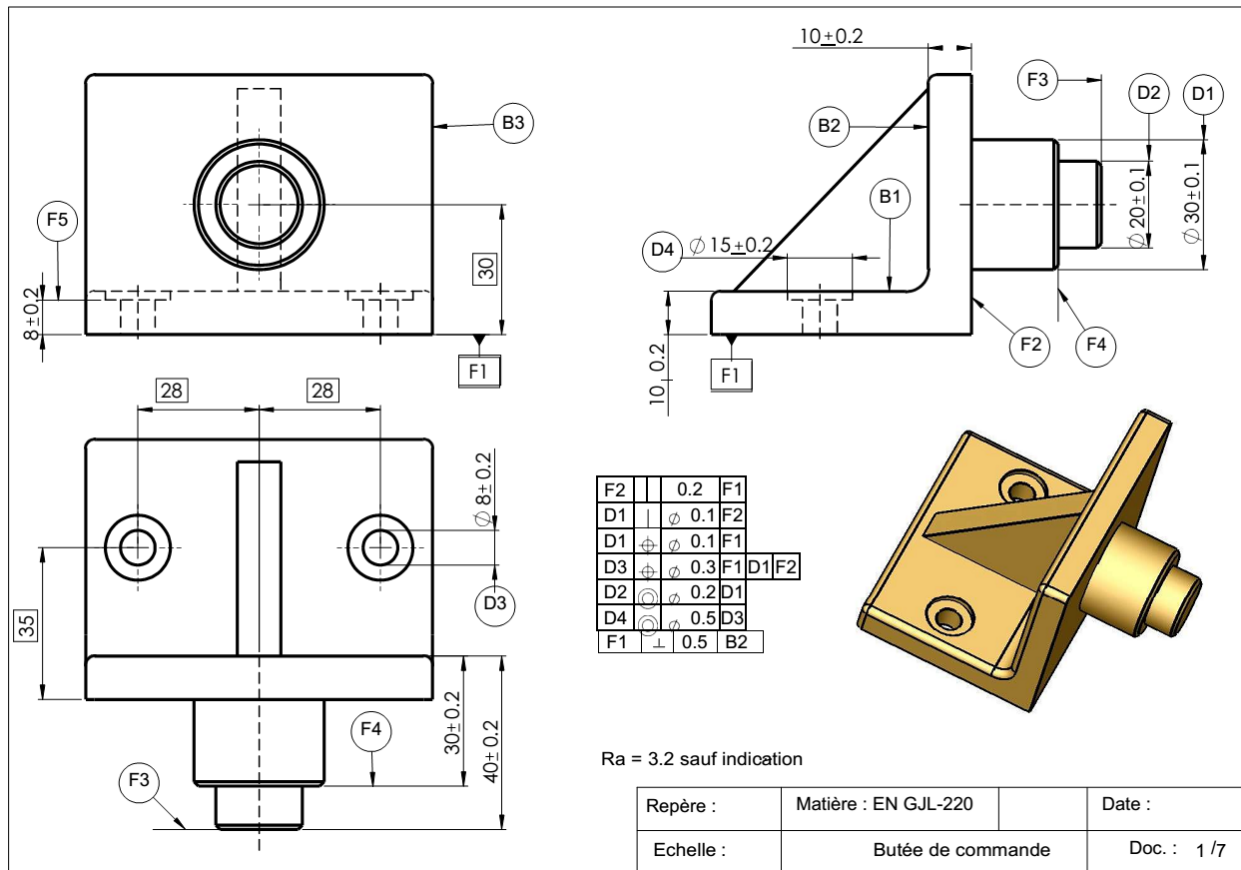


Figure II.1 :Dessin de définition de produit

3. Le dessin du brut capable

L'étude de la forme brute de la pièce donne des informations sur le matériau, les surépaisseurs d'usinage, les surfaces de départ de cotation, les traitements de stabilisation, le mesurage et le contrôle métallurgique éventuels.

4. L'avant-projet d'étude de fabrication (APEF)

L'APEF comporte une suite ordonnée possible des différentes phases intervenant dans le processus de réalisation d'une pièce. Il recensera les informations suivantes :

L'ordre chronologique des phases d'usinage,

La localisation géométrique pour chaque phase (mise en position géométrique des silhouettes),

L'ordre des opérations pour chaque phase,

Le repérage des surfaces à réaliser,

Les outils utilisés et leur mode d'intervention (trajectoire et arrêt en position),

Les machines utilisées.

5. Les feuilles de contrôle de l'Avant-Projet d'Études de Fabrication (APEF)

Des feuilles de contrôle d'avant-projet doivent également être rédigées pour permettre la vérification qu'un avant-projet a des chances de permettre l'usinage de pièces bonnes, compte tenu de la répartition des dispersions de reprise et d'usinage.

6. Le projet d'étude de fabrication (PEF)

C'est un ensemble de documents créés à partir de l'avant-projet retenu, de la feuille de contrôle associée et validés par des expériences et d'essais à l'atelier. On indiquera notamment les éléments suivants :

L'ensemble des cotes fabriquées et les feuilles de calcul associées

L'ensemble des conditions de coupe regroupée dans les contrats de phase prévisionnels

Les moyens de contrôle

Pour la réalisation du PEF on procédera donc à l'étude d'outillage, à l'établissement des fiches de réglage prévisionnel, à la mise en place des feuilles de calcul des cotes fabriquées (simulation d'usinage). On pourra à ce stade définir également le dessin de définition du produit fini.

7. L'étude de fabrication définitive

Ce dossier regroupe toutes les conditions effectives de fabrication, il est matérialisé par la réalisation des contrats de phase définitifs, des feuilles d'instruction éventuelles et des fiches de réglage.

Chapitre III : L'élaboration d'APEF et Ordonnement

1. Dessin de définition bureau des méthodes

Le dessin de définition bureau des méthodes est un dessin bureau d'étude complété par un repérage des surfaces usinées et brutes utilisées dans l'APEF.

Norme :

Le repérage des surfaces est normalisé :

- les plans sont repérés F suivi d'un nombre (F1, F2...);
- les cylindres sont repérés D (D1, D2...);
- les cônes C (C1, C2...);
- les surfaces brutes B (B1, B2...);
- les surfaces particulières (taraudage, filetages...) ainsi que les associations de surfaces (trou lamé...) sont repérées A (A1, A2...).

2. Les critères d'élaboration

a. Les contraintes technologiques

Elles dépendent des moyens disponibles mis en œuvre (outils, outillages, Machines-Outils disponibles, efforts de coupe ...). Les contraintes technologiques concernent plusieurs catégories de moyens, respectivement :

a) les machines. Leurs possibilités techniques sont limitées en termes de :

- Nature des surfaces pouvant être usinées,
- Types d'associations possibles des surfaces,
- Capacité,
- Qualité des surfaces usinables (état, forme),
- Paramètres de coupe possibles.

b) les outils. Les possibilités techniques sont :

- Le type d'usinage : ébauche, finition, etc.,
- La nature et la dureté des matériaux usinables,

Les conditions de coupe admises,

La nature des trajectoires,

La qualité et l'état de surface attendus,

La nature et la valeur de l'usure prévisible.

c) les outillages, dont les possibilités techniques sont limitées en termes de :

Nature des prises de pièces et d'outils,

Nature des maintiens en position,

Dispersion prévisibles.

a. Contraintes de spécifications dimensionnelles

• Surface brute à surface usinée

La surface brute (B) doit précéder

La surface (1) (B) \longrightarrow (1)

• Surface usinée à surface usinée

La surface brute (B) doit précéder

La surface (1) (B) \longrightarrow (1)

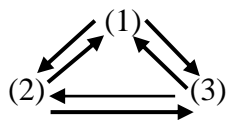
La surface brute (1) doit précéder

La surface usinée (2) (1) \longrightarrow (2)

(B) \longrightarrow (1) \longrightarrow (2)

• Surface usinées associées

Les surfaces (1) (2) (3) sont réalisées simultanément à l'aide d'une fraise 3 tailles

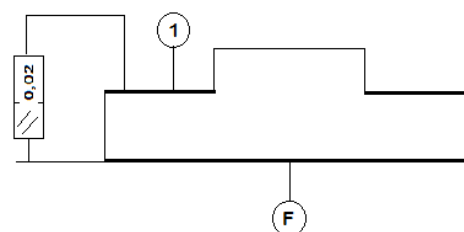
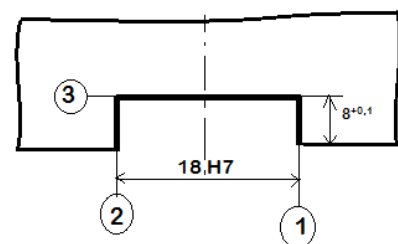
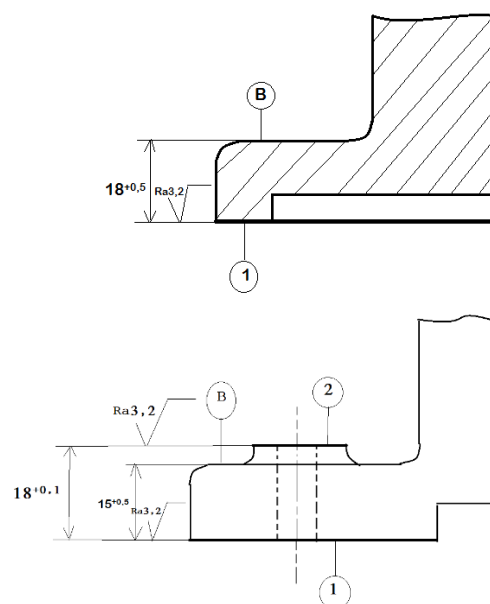


b. Contraintes de spécifications géométriques

• Parallélisme

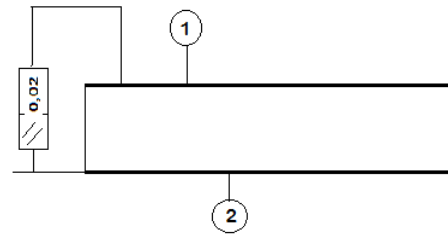
La surface usinée (F) doit précéder la surface usinée (1)

(F) \longrightarrow (1)



Aucune contrainte n'est imposée, le choix de la première surface à usiner importe peu.

(1) \longleftrightarrow (2)



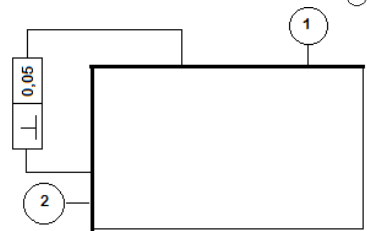
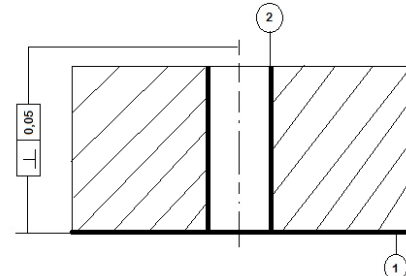
- **Perpendicularité**

La surface usinée (1) doit précéder la surface usinée (2) pour la contrainte d'intériorité (1)

(1) \longrightarrow (2)

Aucune contrainte n'est imposée, le choix de la première surface à usiner importe peu

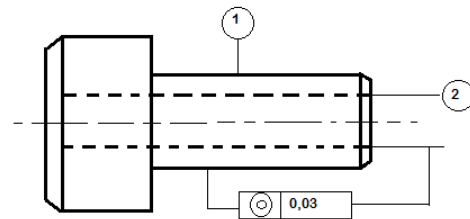
(1) \longleftrightarrow (2)



- **Coaxialité**

La surface usinée (1) doit précéder le trou percé (2)

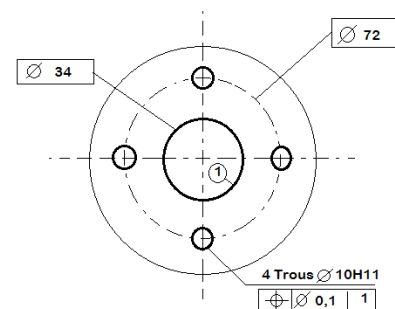
(1) \longrightarrow (2)



- **Position**

Les 4 trous ont pour contrainte d'antériorité (1) l'usinage de ces trous fait sur perceuse multibroches

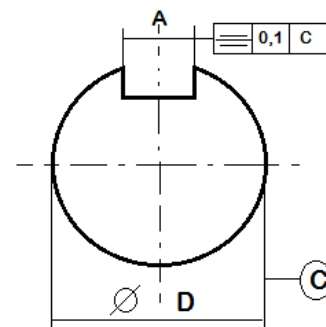
(1) \longrightarrow (4 Trous)



- **Symétrie**

La rainure (A) a pour contrainte d'antériorité la réalisation du cylindre (C)

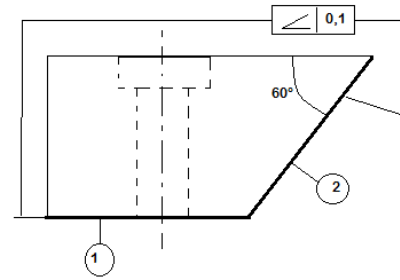
(C) \longrightarrow (A)



- **Inclinaison**

La surface oblique (2) a pour contrainte d'antériorité la surface usinée

(1) → (2)



c. Ordonnement des séquences d'usinage

- **Exemple Usinage d'une pièce comportant des alésages et des rainures**

Pour l'usinage des surfaces notées de 1 à 8 on se propose d'identifier les surfaces associées et de donner un ordre de réalisation des opérations. Ces choix seront faits compte tenu de certaines contraintes technologiques, respectivement :

La surface 4 sera associée avec la surface 5 en raison de l'utilisation d'un même outil : fraise 3 tailles ou fraise scie,

Les surfaces 1 et 2 seront associées car elles sont obtenues simultanément à l'aide d'une fraise à lamer,

La surface 8 sera usinée avant les surfaces 4 et 5, ceci afin d'éviter la déformation de la pièce, déformation qui peut apparaître si la rainure est usinée avant le perçage (le foret peut "accrocher" au niveau de la surface 5, ce qui engendra sa déformation, il y a également l'éventualité de relaxation de contraintes),

Le perçage de 7 sera réalisé avant le taraudage de 6 (impossible de réaliser le filet sans percer au préalable),

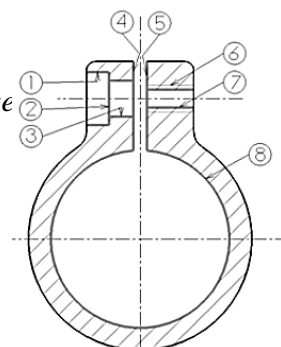
Le perçage de 3 sera réalisé avant de procéder au lamage de 1 et 2. Puisque la fraise à lamer doit être guidée, il est alors nécessaire de réaliser d'abord le perçage,

L'usinage des surfaces 4 et 5 sera fait après la réalisation des opérations de perçage, taraudage, lamage, pour éviter la déviation des outils de perçage.

Figure III.2 : Les surfaces à usiner et les outils disponibles pour l'usinage

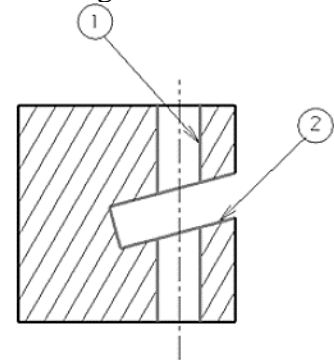
Conclusion : l'ordre des opérations est le suivant :

(8) → (7) → (3) → (6) → (2) (1) → (4) (5)



- **Exemple Usinage de rainure et d'alésage sécants**

On se propose de donner l'ordre de réalisation des opérations, compte tenu des contraintes technologiques. Celles-ci sont liées au risque de déviation du foret si l'usinage de la rainure (2) est fait avant le perçage de la surface (1).



En conclusion : l'ordre des opérations est le suivant : **(1) → (2)**

Figure III.3 : Étude de l'usinage d'une pièce comportant un alésage et une rainure

- **Exemple étude de l'usinage des alésages sécants**

On se propose de donner l'ordre de réalisation des opérations pour la pièce illustrée ci-après. Dans le cas d'alésages sécants, le problème vient du fait que la forêt ou l'alésoir va travailler aux chocs à l'intersection des 2 alésages. Il y a donc un risque de coincement de l'outil pour le 2^{ème} trou, ou de détérioration rapide de celui-ci.

Deux cas sont possible :

$D_1 \simeq D_2$. On réalise l'alésage le plus précis en premier

$D_1 \gg D_2$. On réalise d'abord l'alésage qui a le plus petit diamètre

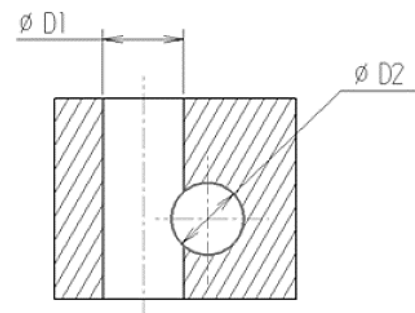
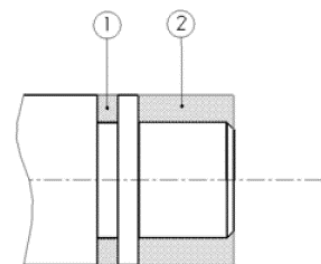


Figure III.4 : Pièce comportant des alésages sécants

- **Exemple étude chronologique de l'usinage pour une rainure et un chariotage**

On se propose de donner un ordre de réalisation des opérations pour l'usinage de la pièce suivante. On remarque que l'usinage de la gorge (1) en premier risque d'affaiblir la pièce pour l'usinage de (2) en chariotage.



En conclusion l'ordre des opérations sera le suivant : **(2) → (1)**

Figure III.5 : Usinage d'une gorge

- **Exemple : La réalisation des alésages**

On demande d'indiquer un ordre pour la réalisation des surfaces 1 (dressage) et 2 (alésage) sur la pièce suivante. Les surfaces brutes sont couvertes par une couche de calamine très dure. Il est préférable de préserver les outils fragiles comme les outils à aléser ou les alésoirs, au moment de l'attaque de la pièce.

En conclusion les opérations seront réalisées dans l'ordre suivant : **(1) →(2)**

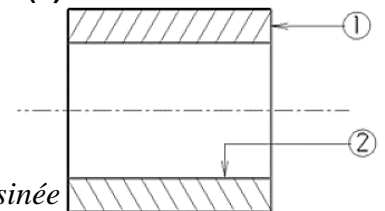


Figure III.6 : L'alésage se fait en attaquant la pièce par une surface usinée

- **Exemple : Le respect des spécifications géométriques de forme**

On se propose de donner l'ordre de réalisation des opérations d'usinage pour la pièce suivante.

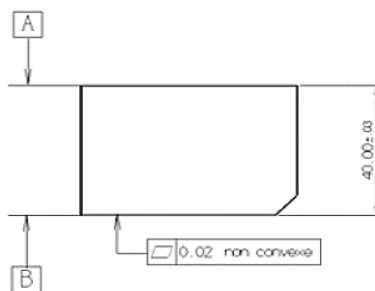


Figure III.7 : Les spécifications de forme imposent des précautions pour l'usinage

Pour la surface (B) on impose une meilleure qualité que pour la surface (A). Elle sera donc usinée en respectant également la spécification géométrique de planéité, l'ordre des opérations est le suivant : **(A) →(B)**

Fondamental :

Les surfaces de référence sont usinées toujours avant les surfaces tolérances.

b. Les critères économiques :

- Coût horaire estimé des postes de travail,
- Délai de fabrication,
- Quantité de pièces à fabriquer (type de série),
- Cadence de fabrication,
- Qualification de l'opérateur.

c. Les critères physiques

Critères physiques, relatives à la pièce :

La masse,

Les caractéristiques matériaux (dureté, résistance à la corrosion, etc.),

La déformabilité.

Remarque : Lors d'une première approche d'élaboration d'un avant-projet il est difficile de tenir compte de tous les critères recensés car leur nombre est important, ils sont très diversifiés et leur influence est variable.

3. Conclusions

Les trois critères ci-dessus ne sont pas indépendants les uns des autres ; ils ne peuvent pas influencer séparément le choix de l'APEF. Il faut trouver un compromis entre les 3 critères :

Exploiter au maximum les possibilités des machines et des outillages (Règle 1)

Associer un maximum d'opérations dans une même phase (Règle 2)

Le posage de la pièce sur la machine doit être de la meilleure qualité possible. (Règle 3)

Le posage doit permettre l'accessibilité maximale aux surfaces à usiner. (Règle 4)

Chapitre IV : La mise en position isostatique

1. Introduction

Lors de l'usinage d'une pièce sur une machine-outil l'ensemble constitué par la pièce à usiner, le porte-pièce utilisé (mandrin, étau ou montage d'usinage), la machine-outil, le porte-outil et l'outil forme un système bouclé. La pièce étant un des maillons de cette chaîne elle joue un rôle important car c'est sur celle-ci que le régleur interviendra afin de positionner correctement les surfaces à usiner S_u par rapport aux surfaces S qui participent à la mise en position de la pièce dans son support.

2. L'isostatisme - généralités

Les déplacements des machines-outils sont définis par un système d'axes qui constitue le référentiel de base $OXYZ$, étant l'origine du système et X, Y, Z les axes.

La fabrication des pièces en série impose :

Que les pièces soient toujours situées de la même façon par rapport aux outils et dans le référentiel,

Que soient respectées les conditions du bureau d'études (BE) :

Cotation fonctionnelle,

Tolérances de forme et de position,

Indice de rugosité en fonction du procédé d'obtention,

L'interchangeabilité,

D'avoir des formes simples (pour avoir, si possible, une prise de pièce facile),

De réduire les usinages,

De simplifier les montages d'usinage,

D'utiliser des outils normalisés.

3. L'étude théorique du repérage isostatique

3.1. Les objectifs

Déterminer les surfaces d'appui sur la pièce à usiner, dans le but :

De respecter les spécifications du dessin de définition,

De tenir compte de la répétitivité de l'usinage, dans un travail de série.

Le problème posé sera donc de **repérer** un solide dans un **référentiel**.

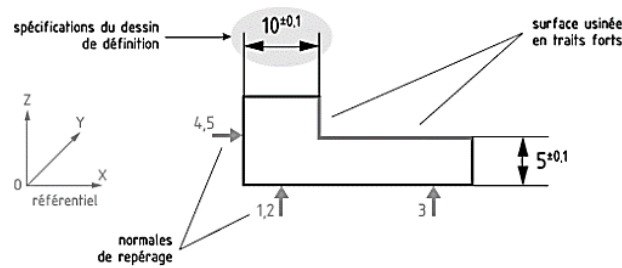
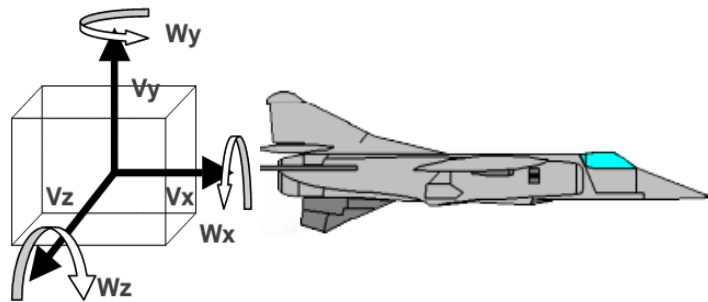


Figure IV.1 : Repérage d'un solide dans un référentiel

3.2. Les degrés de liberté ; principe de Kelvin

Un solide dans l'espace peut se déplacer suivant 6 directions. L'objectif du montage est donc de bloquer (positionner) ces 6 mouvements : 3 rotations et 3 translations. Représentation avec des normales de repérage (correspondant à des liaisons ponctuelles).



Principe

Pour positionner totalement un solide :

- il faut 6 repérages élémentaires
- il faut que chaque repérage élimine un mouvement

Si le nombre de repérage est inférieur à 6, le repérage est **partiel**

Si le nombre de repérage est supérieur à 6, le repérage est **hyperstatique**

3.3. Les conditions d'isostaticité ; liaison de mise en position

Ces 6 mouvements représentent les 6 degrés de liberté du solide. Pour immobiliser un solide dans l'espace, il suffit de **supprimer ces 6 degrés de liberté**. Pour une meilleure stabilité de la pièce sur le porte-pièce, on choisit de mettre **le nombre d'appuis maximum sur la plus grande surface**. En fabrication, l'isostaticité, c'est l'étude de la suppression des

degrés de liberté d'un solide. Il est en effet préférable que la pièce soit bien mise en place pendant les opérations d'usinage. Pour supprimer les degrés de liberté, il suffit d'utiliser une ou plusieurs liaisons qui s'opposent au mouvement. La pièce doit être positionnée par rapport à la machine dans une situation telle que l'on puisse réaliser **plusieurs pièces identiques**.

Conclusion : pour supprimer 6 degrés de liberté, il faut établir 6 degrés de liaison.

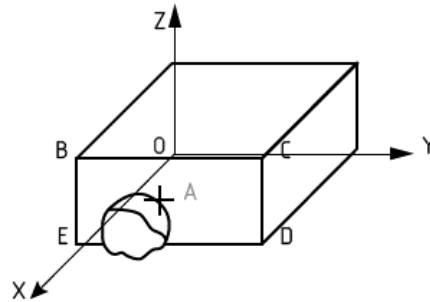


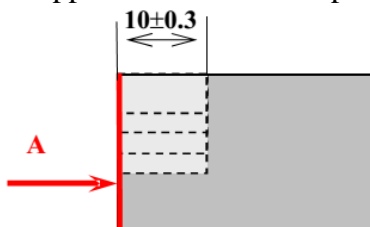
Figure IV.2 : Exemple : le solide S ne possède que 5 degrés de liberté

3.4.Face de référence

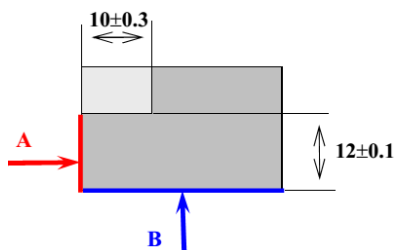
Exemple : Usinage d'un épaulement :

On désire réaliser l'usinage de cet épaulement dans une pièce prismatique :

Pour pouvoir situer avec précision cet épaulement, il nous faut connaître sa position par rapport aux bords de la pièce.



x est la première cote qui nous informe sur la position de cet épaulement. La cote **x** est liée à la face A : **A est une "face de référence"**.



Y est la deuxième cote qui va nous permettre de situer avec précision la position de l'outil (profondeur de l'épaulement). La cote **y** est liée à la face B : **B est une "face de référence"**.

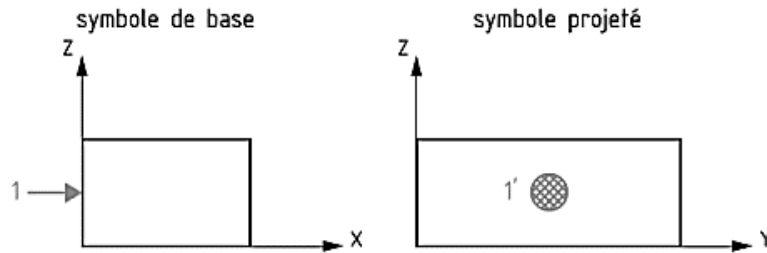
x et **y** sont les deux côtes qui définissent l'épaulement :

- la cote 10 ± 0.3 est liée à la face A,
- la cote 12 ± 0.1 est liée à la face B.

A et B sont les deux faces de références.

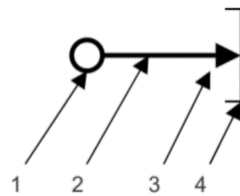
4. La représentation normalisée d'un degré de liaison

Le symbole de base est représenté ci-après. Il est noirci pour une meilleure visualisation. La projection éventuelle du symbole est un cercle avec hachures quadrillées. Ce symbole est placé sur la surface spécifiée ou sur une ligne d'attache, du côté libre de matière. Ce symbole est également normal à la surface.



Symbolisation technologique

1	Type de technologie
2	Nature de la surface repérée
3	Fonction de l'élément technologique
4	Nature de la surface de contact



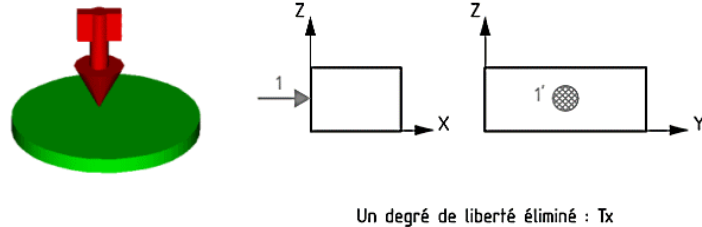
Type de technologie

Appui fixe		Pièce d'appui, touche...		Touche de pré-localisation, détrompeur...
Centrage fixe		Centreur, broche...		Pré-centreur
Système à serrage		Mise en position et serrage symétrique...		Bride, vérin...
Système à serrage concentrique		Mandrin pinces expansibles...		Entraîneur
Système de réglage irréversible		Appui réglage de mise en position...		Appui réglable de soutien
Système de réglage réversible		Vis d'appui réglable...		Anti vibreur
Centrage réversible		Pied conique...		Pied conique, broche conique

5. Les liaisons isostatiques élémentaires

5.1. La mise en position par liaison ponctuelle (LP)

La liaison ponctuelle est une liaison permettant d'enlever à un solide un degré de liberté (1 translation).

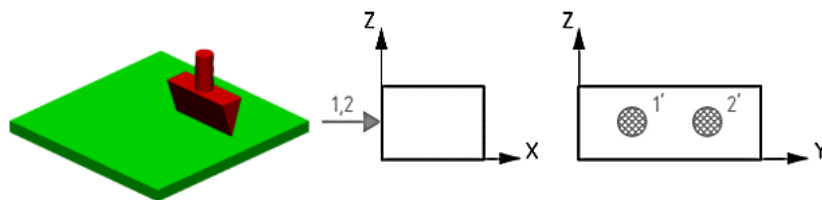


Un degré de liberté éliminé : T_x

Figure IV.2 : La liaison ponctuelle

5.2. La mise en position par liaison linéaire rectiligne (LR)

Ce type de liaison permet de supprimer à un solide deux degrés de liberté : une translation et une rotation.

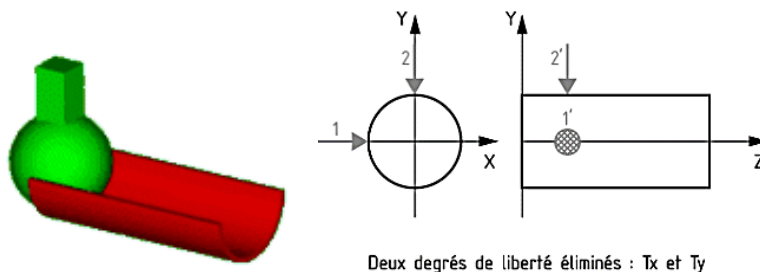


Deux degrés de liberté éliminés : T_x et R_z

Figure IV.3 : La liaison linéaire rectiligne

5.3. La mise en position par liaison linéaire annulaire (LA) : gouttière, anneau, ...

La liaison linéaire annulaire est une liaison utilisée pour bloquer sur un solide 2 degrés de liberté de type translation.

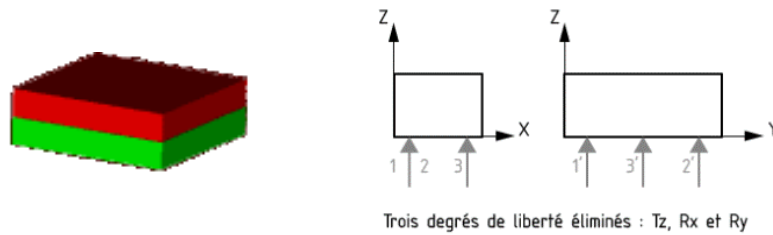


Deux degrés de liberté éliminés : T_x et T_y

Figure IV.4 : La liaison linéaire annulaire

5.4. La mise en position par liaison appui plan (AP)

La liaison appui plan permet de supprimer sur une surface une translation et deux rotations.

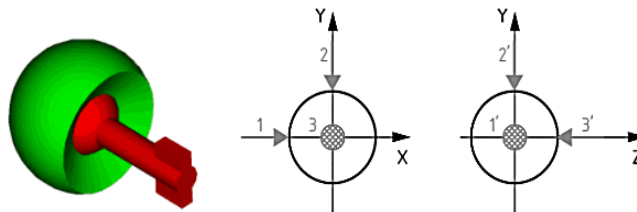


Trois degrés de liberté éliminés : T_z , R_x et R_y

Figure IV.5 : La liaison appui plan

5.5. La mise en position par liaison rotule

La liaison rotule est utilisée pour bloquer sur une sphère 3 translations.

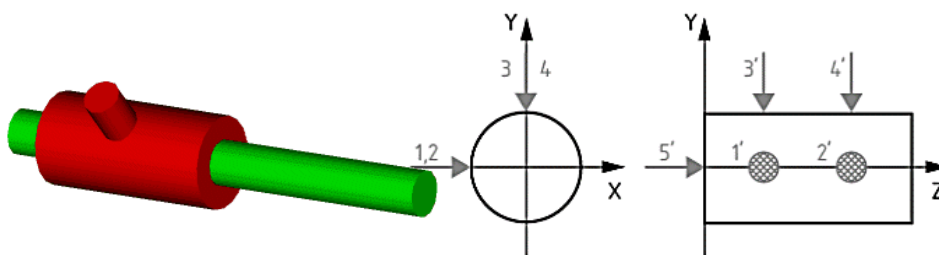


Trois degrés de liberté éliminés : T_x , T_y et T_z

Figure IV.6 : La liaison rotule

5.6. La mise en position par liaison pivot glissant (verrou)

Le pivot glissant est une liaison constituée de 2 liaisons linéaires annulaires ou de 2 liaisons linéaires rectilignes. Leur utilisation simultanée permet de supprimer 2 translations et 2 rotations.



Quatre degrés de liberté éliminés : T_x , T_y , T_z et R_y

Figure IV.7 : La liaison pivot glissant

5.7. La mise en position par liaison pivot

Cette liaison est composée d'une liaison pivot glissant et d'une liaison ponctuelle. Elle permet de bloquer 5 degrés de liberté sur une pièce : 3 translations et 2 rotations.

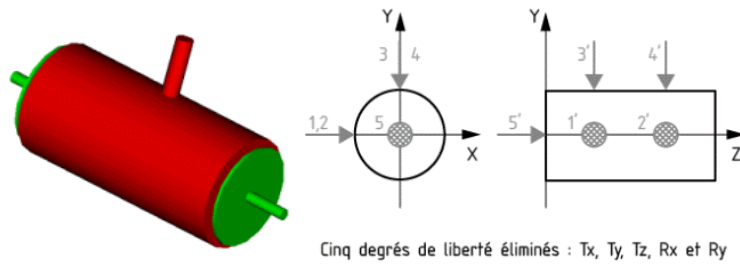


Figure IV.8 : La liaison pivot

6. Le choix des surfaces de mise en position

6.1. Le principe

Une mise en position est isostatique si :

Le n° des degrés de liaisons (normales) est égal au nombre de degrés de libertés supprimés, Chacune des normales contribue à éliminer un degré de liberté.

6.2. Les règles de choix

Cette problématique sera traitée principalement en fonction de la cotation.

La surface choisie doit être suffisamment importante pour recevoir le nombre de normales choisi.

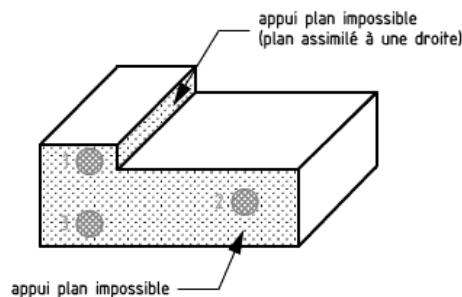


Figure IV.9 : Choix de la liaison selon la taille de la surface

Une cote relie la surface usinée à la surface de mise en position.

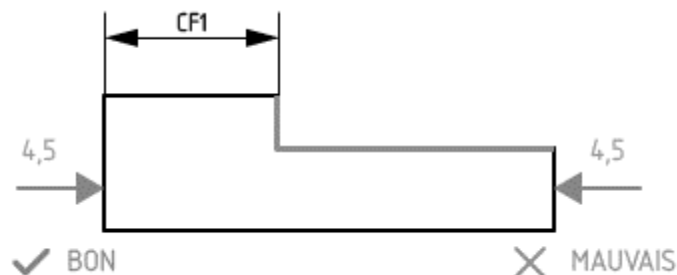


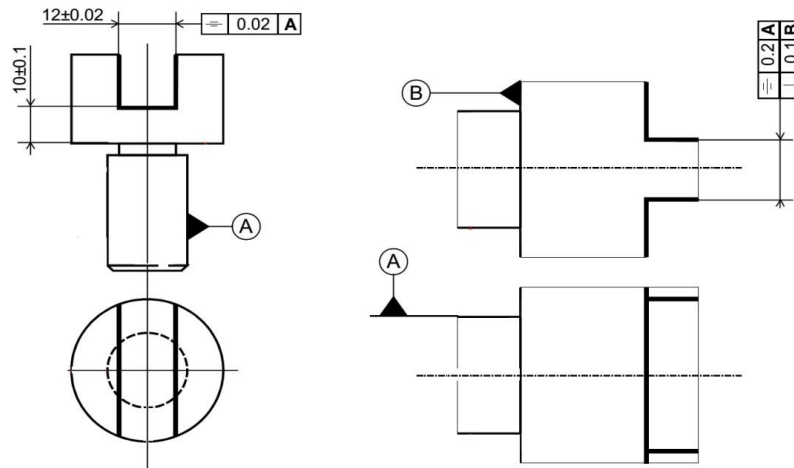
Figure IV.10 : La cote fabriquée $Cf1$ relie la surface usinée et celle de mise en position

7. TD mise en position isostatique

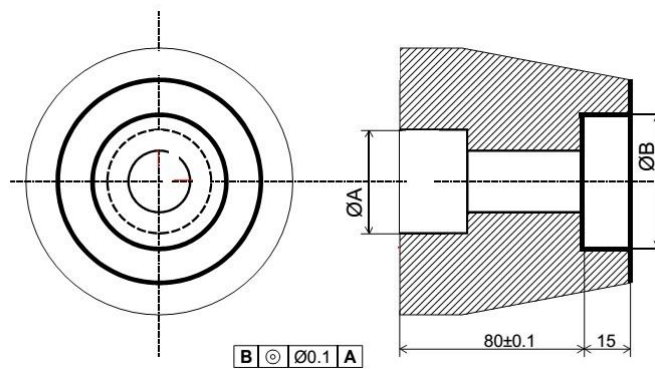
Nécessité d'une MEP correcte pour respecter les spécifications du dessin de définition.

Soit à usiner une série de pièces suivantes :

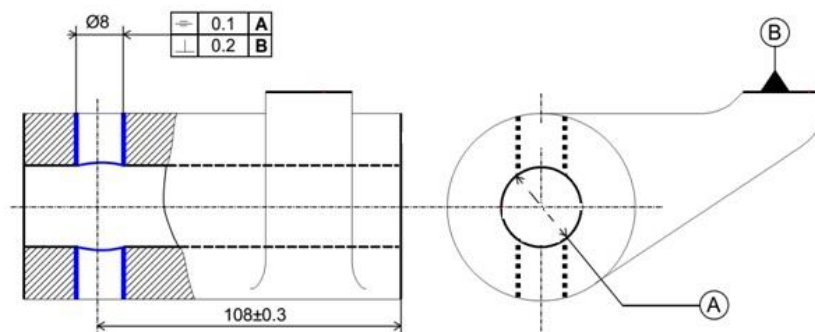
Exemple 1



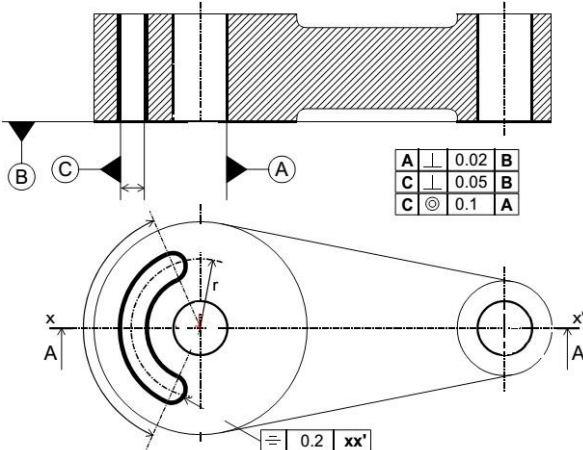
Exemple 2



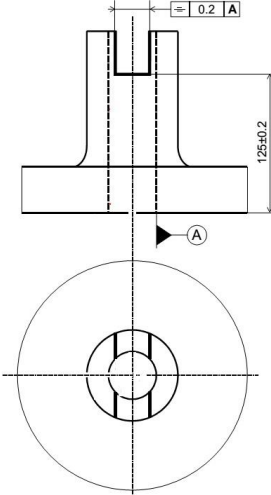
Exemple 3



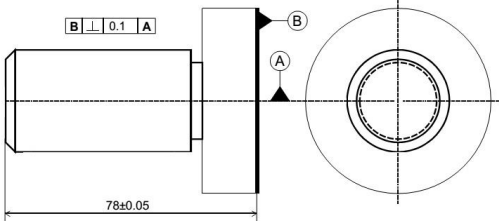
Exemple 4



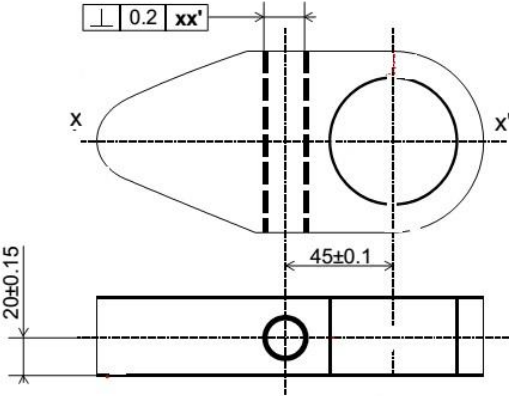
Exemple 5



Exemple 6

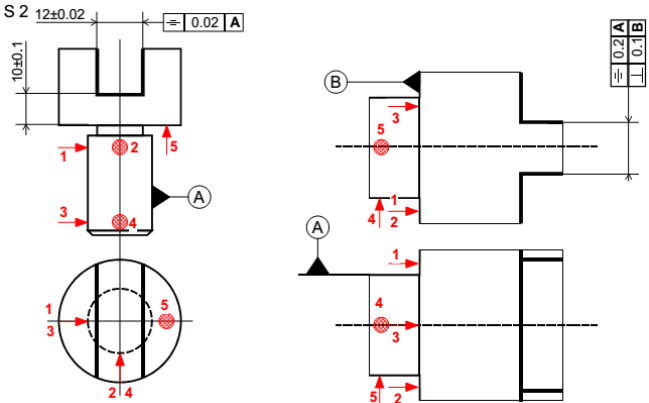


Exemple 7

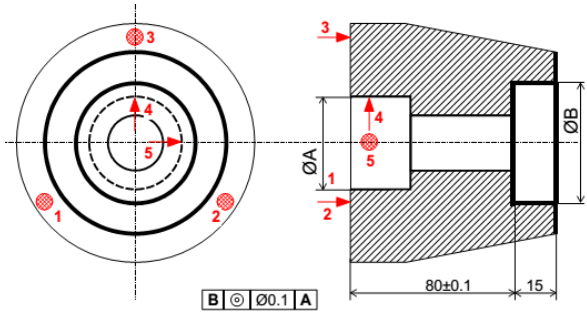


8. La solution

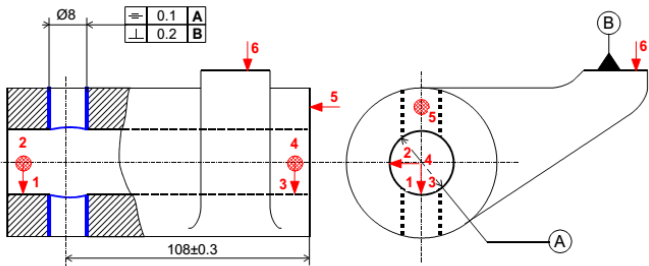
Exemple 1



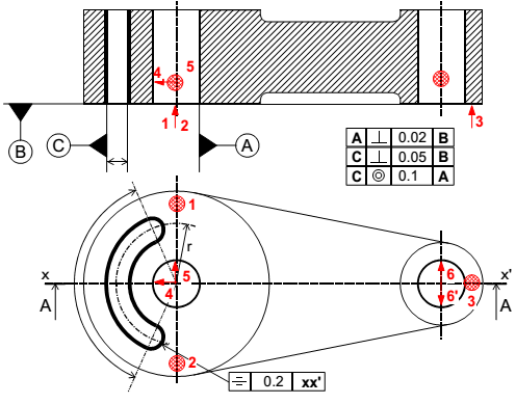
Exemple 2



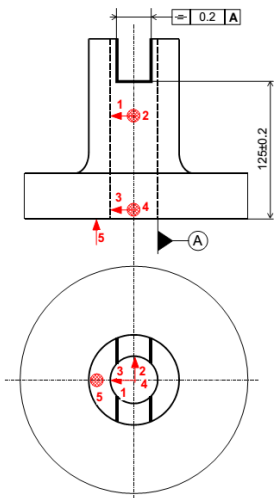
Exemple 3



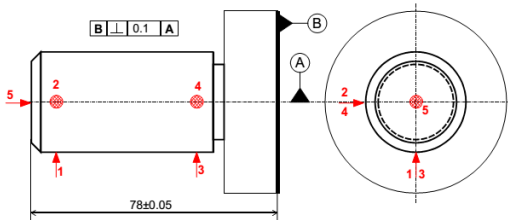
Exemple 4



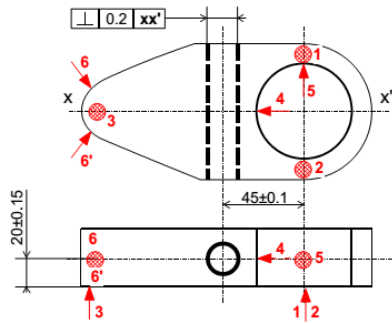
Exemple 5



Exemple 6



Exemple 7



Chapitre V : Le dimensionnement et la cotation d'usinage

1. La cotation fonctionnelle

Coter fonctionnellement un dessin, c'est faire un choix raisonné entre ses diverses dimensions géométriquement équivalentes. Ne coter et tolérance que les « dimensions fonctionnelles » qui expriment directement les conditions d'aptitude du produit à l'emploi prévu, dites « cotes condition ».

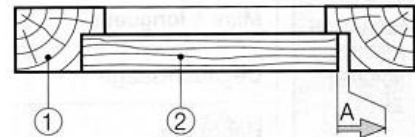
2. Définitions

a. La cote condition ou le jeu

Une cote condition est une cote tolérancée qui exprime une exigence liée à l'assemblage, ou au fonctionnement du mécanisme ou à l'assemblage d'un ensemble de pièces.

Elle s'inscrit sur le dessin d'ensemble.

Elle est orientée de gauche à droite, ou de bas en haut.

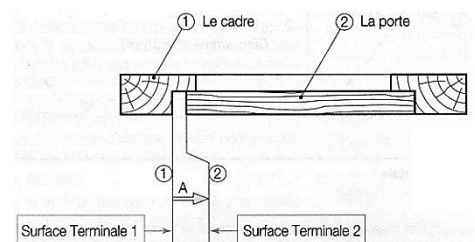


b. La cote fonctionnelle

Une cote fonctionnelle est une cote tolérancée appartenant à une pièce ayant une influence sur la cote condition, elle a une influence, dans la mesure où elle varie dans son intervalle de tolérance, sur la valeur d'une cote-condition. Une cote fonctionnelle est délimitée, à ses extrémités, par deux surfaces d'appui ou par une surface d'appui et une surface terminale.

c. Les surfaces terminales

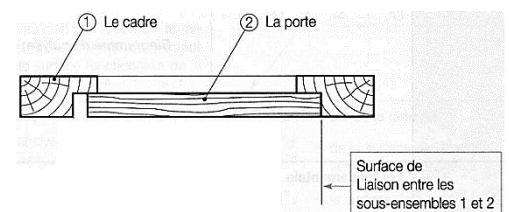
Les surfaces terminales ou lignes qui sont perpendiculaires à la cote condition et qui encadrent la cote condition ou le jeu.



d. Les surfaces d'appui ou de contact

Les surfaces d'appui ou de contact sont des surfaces :

Ou ligne de contact entre deux pièces successives qui servent de limite, ou d'extrémité, à des cotes fonctionnelles. Les surfaces de contact à prendre en compte sont celles perpendiculaires au jeu.



e. Chaîne de cotes

Une chaîne de côtes rassemble toutes les cotes fonctionnelles ayant une influence sur la valeur d'une même cote condition ou jeu. L'ensemble de ces dimensions, ou « maillons », disposées en série, bout à bout et qui forme une boucle.

Méthode générale pour coter fonctionnellement :

- 1° Faire une analyse complète du produit afin de mettre en évidence les cotes condition pour assurer un fonctionnement normal.
- 2° Choisir les cotes qui expriment directement, pour chaque pièce, ces cotes condition.

Généralement les personnes qui travaillent au bureau d'études (BE) sont des techniciens ayant une longue expérience au bureau des méthodes (BM).

Dans la majorité des cas la cotation fonctionnelle permet de déterminer les distances et leurs tolérances entre plans et axes parallèles.

Exemple : Analyse fonctionnelle d'un assemblage

Considérons l'assemblage du pied de bielle, illustré ici.

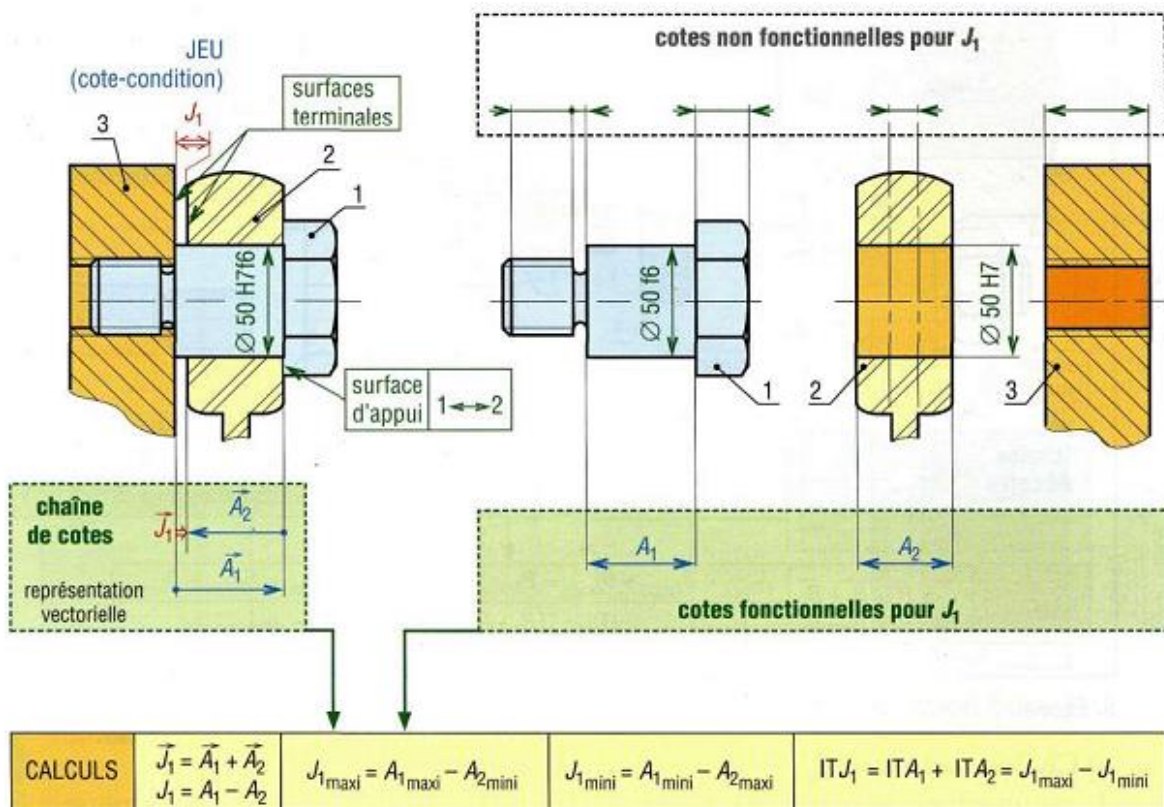


Figure V.1 : Pied de bielle

La bielle doit être immobilisée par rapport à l'axe, la liaison complète entre les 2 pièces est assurée par la liaison hélicoïdale (vis) et par le contact plan sur plan. Ce contact est assuré correctement si la longueur A_2 est inférieure à la profondeur de taraudage A_1 .

Attention :

La condition fonctionnelle est toujours comprise entre deux surfaces terminales d'une même pièce. Pour tracer une chaîne de cotes relative à une cote condition on part d'une surface terminale pour rejoindre l'autre surface terminale en passant par l'intermédiaire des surfaces d'appui (surfaces fonctionnelles).

A partir d'une condition fonctionnelle donnée il ne doit pas avoir qu'une seule cote par pièce. On dit alors que la chaîne de côtes est minimale.

3. Cotation de fabrication

On peut naturellement se demander pourquoi doit-on fixer une cotation de fabrication, puisque le bureau d'études a déjà établi une cotation fonctionnelle permettant d'assurer le bon fonctionnement de la pièce dans le cadre du système technique dont elle fait partie.

Or, le dessin de définition ne comporte que les cotes de la pièce finie et de plus le contrôle tout au long du processus de fabrication impose la connaissance de plusieurs autres cotes concernant :

La pièce brute

Les cotes intermédiaires (d'ébauche et de demi-finition)

Certaines cotes fabriquées issues d'un transfert de cote imposé par la limitation des possibilités des machines et des outillages ou par une diminution du coût des outillages.

L'objet de la cotation de fabrication est la recherche et le calcul des côtes et spécifications fabriquées qui sont les éléments à contrôler après chaque séquence de fabrication. On doit tenir compte du processus de fabrication envisagé et le calcul des cotes est fait à partir des cotes fonctionnelles portées sur le dessin de définition et des cotes conditions imposées par le préparateur.

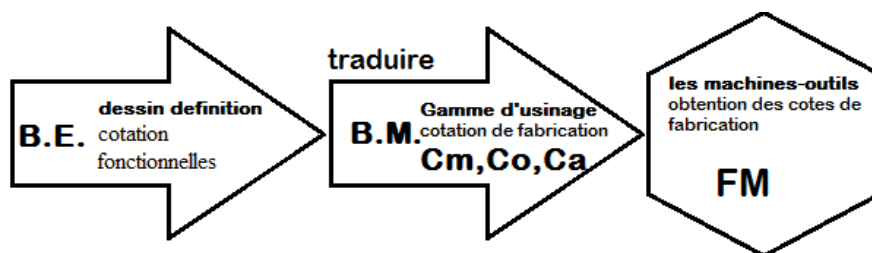


Figure V.2 : L'évolution de la cotation entre le bureau d'études et la fabrication de la pièce.

4. Les cotations bureau d'études (BE) et bureau de méthodes (BM)

Toutes les côtes et les spécifications indiquées sur le dessin de définition du produit sont des conditions à satisfaire au moyen des cotes fabriquées, elles constituent les points de départ de la recherche et des calculs des cotes de fabrication du préparateur. Chaque condition bureau d'études doit être vérifiée et faire l'objet d'une chaîne de cotes fabriquées pouvant se réduire à une chaîne à un seul maillon dans le cas d'un usinage à cote directe.

Le préparateur impose des conditions complémentaires pour satisfaire aux exigences technologiques de la coupe (copeaux minimums de finition) des procédés d'élaboration des bruts (copeaux minimums d'ébauche) des procédés d'usinage (surépaisseur maximum de rectification, etc.). Ces conditions peuvent encore être dues à des considérations de prise de pièces, de passage d'outils (cotes de liaisons au brut non fonctionnelles, non portées sur le dessin de définition, mais indispensables à la fabrication) ou à des considérations d'esthétique. Chaque condition bureau des méthodes doit également être vérifiée et faire l'objet d'une chaîne de cotes fabriquées. Cette chaîne peut également se réduire à une chaîne à un seul maillon dans le cas d'un usinage en cote directe (par exemple le cas où un copeau est réalisé entre deux surfaces usinées dans la même phase).

5. Les cotes fabriquées

L'établissement d'un processus d'usinage impose la détermination, par choix raisonné ou calcul, de toutes les côtes et tolérances dimensionnelles et géométriques effectivement réalisées sur la pièce et dont l'ensemble est regroupé sous le terme cotation de fabrication (CF) ou d'usinage. Celle-ci n'apparaît que sur les documents qui explicitent le processus d'usinage (dessins de phase ou d'opération) et ne constitue qu'une étape dans l'évolution ayant pour origine la pièce brute et pour objectif final la pièce usinée (conforme au dessin de définition). Ainsi certaines cotes d'usinage mesurables (ou contrôlables) en cours de processus n'existent plus sur la pièce finie.

Définition :

Une cote fabriquée est l'ensemble borné et ordonné des dimensions des pièces d'une série, dimensions définies entre deux points d'une surface ou de deux surfaces concernées d'une même phase.

En travail de série, la cote d'usinage est obtenue sur la pièce par enlèvement de matière, à l'aide des outils coupants ayant fait l'objet de réglages préalables (par rapport au référentiel de la

pièce). Cette cote ainsi obtenue est donc une cote de fabrication. La raison principale pour ce type de réglage est que l'on recherche la rentabilité et l'interchangeabilité des pièces satisfaisant la cotation demandée par le bureau d'études. Lorsqu'elle apparaît dans une opération, elle concerne dans tous les cas au moins une des surfaces réalisées lors de cette opération. Avec une même prise de pièce, au moins une des cotes de fabrication a pour origine la surface de la pièce en contact avec le référentiel de mise en position, afin de situer les usinages réalisés par rapport aux surfaces choisies comme référence.

Remarque :

- Une cote fabriquée est définie uniquement sur une série de pièces.
- Certaines cotes de fabrication sont obtenues par transfert de cotes fonctionnelles.

a. La recherche d'une cotation d'usinage logique

Les surfaces concernées par la cotation de fabrication dans une phase sont respectivement :

Celles qui participent à la mise en position des pièces,

Les surfaces réalisées (usinées)

Règle de base à respecter : Le régleur ou l'opérateur ne doivent pas avoir des calculs à effectuer pour les productions de série. Pour cela, on envisage l'un ou l'autre de ces deux types de cotes :

Soit les cotes « idéales » de réglage proprement dites des outils et des butées de la machine, mais cela implique la connaissance précise des dispersions du procédé.

Soit les cotes à satisfaire sur les pièces mais utiles au régleur, c'est à dire lui évitant des calculs. Ainsi, connaissant bien la machine et les cotes tolérancées à obtenir, le régleur peut réaliser certains réglages avant ou pendant l'usinage de la première pièce ; après contrôle de cette première pièce, il retouche les réglages s'il y a lieu. Cette dernière mesure est couramment adoptée dans l'industrie à défaut de pouvoir calculer les cotes idéales de réglage des machines.

b. Les différentes cotes de fabrication

Selon les éléments référentiels utilisés pour effectuer les réglages des outils coupants les cotes de fabrication sont classées en trois catégories :

Les cotes-machines (**Cm**),

Les cotes-appareillages (**Ca**),

Les Cotes-outils (**Co**).

Les cotes-machines (**Cm**)

Les cotes définissant **la forme** et **la position** des surfaces usinées, entre la référentielle pièce et le plan de travail de l'outil (ou point générateur de l'outil) lorsque celui-ci est réglé par rapport au référentiel (par rapport aux éléments de mise en position) sont couramment dites "cotes - machines" **Cm**. Exemples : un montage porte-pièce, la table de la machine, etc.

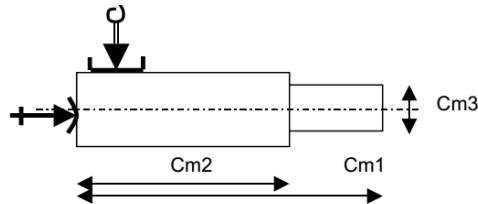


Figure V.3 : Exemples de côtes - machines en tournage

g. Les cotes-appareillages (Ca)

Ce sont les cotes obtenues à partir d'un appareillage ou par un gabarit de copiage. Les trajectoires des outils réalisant les cotes de fabrication sont imposées par des appareillages dont les positions sont définies par rapport à des référentiels fixés. Les appareillages peuvent :

Faire partie de la machine : verniers, butées mécaniques, etc.

Être des éléments indépendants de la machine : plateaux diviseurs, dispositif de copiage, canons-guides des alésages, etc.

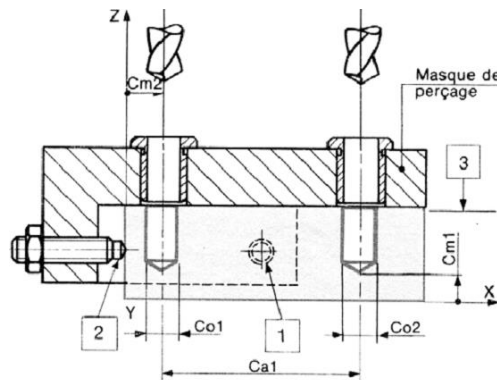


Figure V.4 : Utilisation des canons de perçage pour obtenir des cotes appareillage

h. Les Cotes-outils (Co)

Ce sont les cotes définissant la forme, la dimension, la précision des surfaces usinées données, par l'outil (foret, alésoir, fraise 3 tailles) ou par l'association de plusieurs outils travaillant simultanément (train de fraises) et réglées par des cotes machines ou cotes appareillages.

Les surfaces définissant la cote de fabrication sont réalisées par des outils réglés entre eux. On distingue deux situations :

Les outils sont différents et sont réglés entre eux par l'intermédiaire d'un élément support (outils sur porte-outils, plaquettes amovibles sur support),

Les différentes arêtes de coupe appartiennent à un outil monobloc et sont réglées entre elles par construction puis affûtage (outils de forme de tournage, forets, fraises à rainurer).

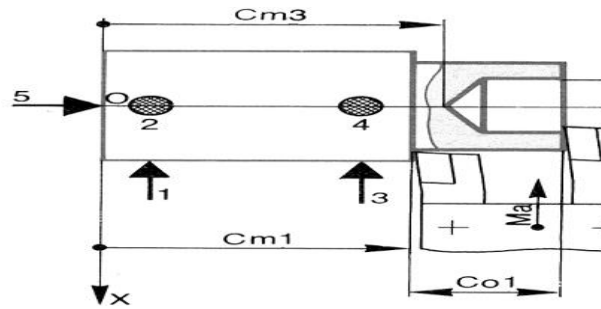


Figure V.5 : Cotes outils : cas de tournage

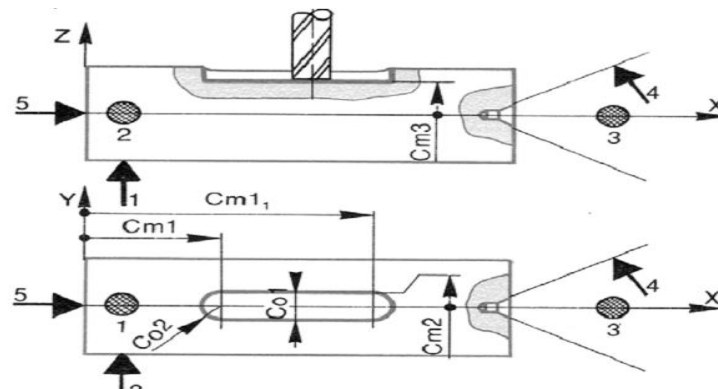


Figure V.6 : Exemples des cotes-outils

c. La notion de référentiel auxiliaire de réglage

Dans la plupart des cas, les cotes appareillages ou outils ont une extrémité accrochée à un référentiel auxiliaire de réglage constitué de surfaces usinées dans la même phase et reliées par la cotation de fabrication aux surfaces en contact avec le référentiel de mise en position de la pièce (à la phase considérée).

d. Conseil : Choix d'une cote d'usinage

Au moment de choisir le procédé d'usinage, le préparateur peut hésiter pour l'adoption d'une cote-outil, d'une cote-machine, ou d'une cote-appareil. Il est conseillé de procéder respectivement :

i. Une cote outil C_o est souvent préférable à une cote-machine C_m

En effet, la dispersion d'une cote outil est en général plus faible que celle d'une cote dont les causes de dispersion sont beaucoup plus nombreuses. D'autre part, une cote-outil réalise 2 surfaces associées alors qu'une cote-machine n'en réalise qu'une seule, d'où l'avantage

économique pour les travaux de série, cette solution permettant le groupement de surfaces à l'usinage.

e. Une cote appareil C_a est souvent préférable à une cote-machine

C_m car la dispersion d'une cote-appareil ne dépend essentiellement que de la précision de cet appareil. D'autre part, la machine est banale, donc moins coûteuse, et un ouvrier de qualification moyenne peut suffire pour réaliser une série de pièces. Mais ceci ne convient pas aux travaux unitaires car le prix de l'appareil spécial doit pouvoir être amorti sur une série de pièces suffisantes.

6. Conclusion

L'emploi des cotes-outil et des cotes appareillage est particulièrement intéressant pour les travaux de série.

Chapitre VI : Les cotes de fabrication : transfert de cotes

1. Introduction

Les principaux objectifs de la cotation de fabrication (liés à un processus d'usinage fixé) sont d'abord l'obtention d'une pièce conforme au dessin de définition et ensuite la recherche du moindre coût d'usinage.

La détermination des côtes et des tolérances géométriques d'usinage (par choix raisonné ou calcul) permet de satisfaire le premier point.

Elle impose la connaissance :

Des réglages possibles entre machines, outils, appareillages et pièces,

Des dispersions dimensionnelles qui interviennent lors de la réalisation répétitive d'une cote,

Des différents types de côtes de fabrication,

Des méthodes de raisonnement et de calcul à mettre en œuvre.

Pour satisfaire le second point il faut savoir que, dans la plupart des cas, sur une machine donnée, le coût d'un usinage est fonction de la précision demandée.

2. Définitions

a. Cote directe

Lorsqu'une cote de fabrication s'établit entre les mêmes surfaces que celles indiquées par le dessin de définition, on dit que cette cote est obtenue par une cote directe.

b. Cote transférée

Si la cote du dessin de définition n'est pas réalisée directement mais résulte de la combinaison de deux (plusieurs) cotes de fabrication Cf, elle devient une cote transférée. La détermination des cotes de fabrication permettant d'obtenir la cote transférée nécessite toujours un calcul appelé transfert de cote.

c. Cotes-méthodes

Elles sont fixées par le BM et apparaissent selon trois formes différentes :

copeau-minimal : impose l'épaisseur de matière à enlever pour réaliser un usinage correct des surfaces. Si la surépaisseur prévue pour l'usinage est trop faible, l'outil ne coupe pas et le métal

est écroui. Il est donc nécessaire de prévoir une surépaisseur égale ou supérieure au copeau minimum (Cpm). Le copeau minimum (Cpm) est fonction de la nature du matériau constituant l'outil, de la finesse de l'arrête tranchante, de l'arrosage, etc. Le copeau minimum intervient comme cote condition dans le calcul des côtes.

Réduction de l'IT d'une cote du dessin de définition (pour rendre un transfert possible par exemple).

Respect de certaines cotes ne figurant pas sur le dessin de définition mais imposées par les procédés d'usinage.

Dans les tableaux suivants sont indiquées les valeurs usuelles des copeaux minimum Cpm, à choisir selon le type d'usinage et les divers matériaux à usiner.

Mode d'usinage	Opérations	Copeaux minima
Tournage Fraisage Rabotage	Écroûtage	1 à 3
	Ébauche sans écroûtage	1.0
	Ébauche après écroûtage	0.5
	Demi-finition	0.5
	Finition	0.2
Rectification	Finition	0.05
Rodage	Finition	0.03
Brochage	Finition	0.05

Valeurs usuelles des copeaux minima pour les principales opérations d'usinage

Valeurs indicatives Cpm		
Cpm par rapport à une surface brute	Pièces en acier moulé $L \leq 250$	4 à 6
	Pièces en acier moulé $250 < L < 1000$	6 à 10
	Pièces en fonte moulée $L \leq 250$	2.5 à 5
	Pièces en fonte moulée $250 < L < 1000$	4 à 8
	Pièces en alliage d'aluminium moulé en sable	2 à 6
	Pièces en alliage d'aluminium moulé en coquille (gravité)	1 à 3
	Pièces en alliage d'aluminium moulé en coquille (sous pression)	0.5 à 1.5
	Pièces soudées ou découpées	1 à 2
Cpm par rapport à une surface usinée	Seconde ébauche (semi-finition)	0.3 à 0.5
	Finition à l'outil coupant	0.1 à 0.2
	Rectification	0.05 à 0.1

Valeurs indicatives du copeau minimal pour différents matériaux

d. Cotes-conditions CC

Les cotes du dessin de définition (réalisées en cotes directes ou obtenues par transfert) ainsi que les cotes méthodes sont toujours des conditions impératives à respecter lors de la détermination des cotes de fabrication.

C'est pourquoi dans les graphes et calculs elles sont particularisées et appelées **cotes-conditions CC**.

Remarque :

Les notions de cote directe, cote transférée, cote-méthode et cote-condition s'appliquent aussi aux tolérances géométriques.

e. Tolérances économiques

Les cotes de fabrication sont assorties d'une tolérance. Pour chaque procédé de fabrication, suivant l'opération effectuée (ébauche, demi-finition, finition) il existe une tolérance économique qui permet la réalisation de la cote de fabrication dans un intervalle satisfaisant, compte tenu de la précision de la machine et du prix de revient.

Modes d'usinage	Ebauche	½ finition	Finition
Sciage	2	-	-
Tournage			
Fraisage			
Rabotage			
Tournage-Fraisage	0.5	0.25	0.05
Rabotage	0.5	0.25	0.1
Perçage	0.3	0.1	0.1
Alésage (enveloppe)	0.3	0.15	0.03
Alésage (forme)	0.2	0.1	0.03
Rectification	0.2	0.05	0.01
Brochage	0.1	0.03	0.01
Rodage	-	-	0.005

Valeurs usuelles des tolérances économiques

Procédés d'usinage	Cote par rapport à une surface brute	Cote entre surfaces usinées		Cote de finition
	Varie de +/- 0.1 à +/- 1 selon la qualité et la correction géométrique de la surface brute	Ebauche	Semi-finition	
Fraisage		0.3 à 0.5	0.1 à 0.2	
Tournage		0.3 à 0.5	0.1 à 0.2	
Perçage		0.2 à 0.5	0.15 à 0.2	
Alésage grain		0.2 à 0.4	0.1 à 0.2	
Alésage alésoir		0.15 à 0.2	0.05 à 0.15	
Rectification		0.1 à 0.3	0.05 à 0.1	
Brochage		0.05 à 0.15	0.02 à 0.04	

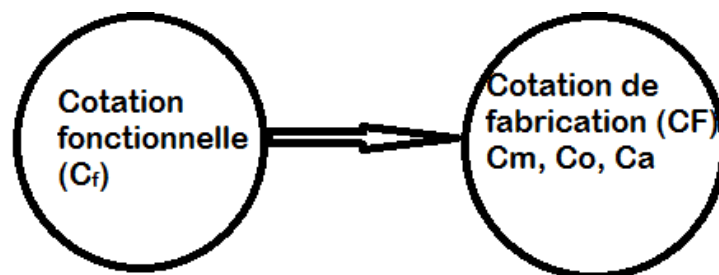
Valeurs indicatives des IT sur les côtes de fabrication

3. Le transfert de cotes (TC)

Le BM établit l'avant-projet d'étude de fabrication, sa vérification et le calcul des cotes fabriquées à partir des spécifications (cotes fonctionnelles, tolérances géométriques, états de surface) du dessin de définition réalisé au BE. Les moyens de fabrication prévus dans l'avant-projet d'étude de fabrication permettent parfois de réaliser directement certaines cotes fonctionnelles (les cotes directes). Les autres cotes, réalisées indirectement, nécessitent un calcul appelé « transfert de cotes ».

Définition :

Le transfert de cotes (TC) est un moyen de calcul permettant la détermination des cotes utiles à la fabrication.



Exemple :

Considérons le dessin de définition d'une pièce et le croquis de phase relatif au procédé d'usinage

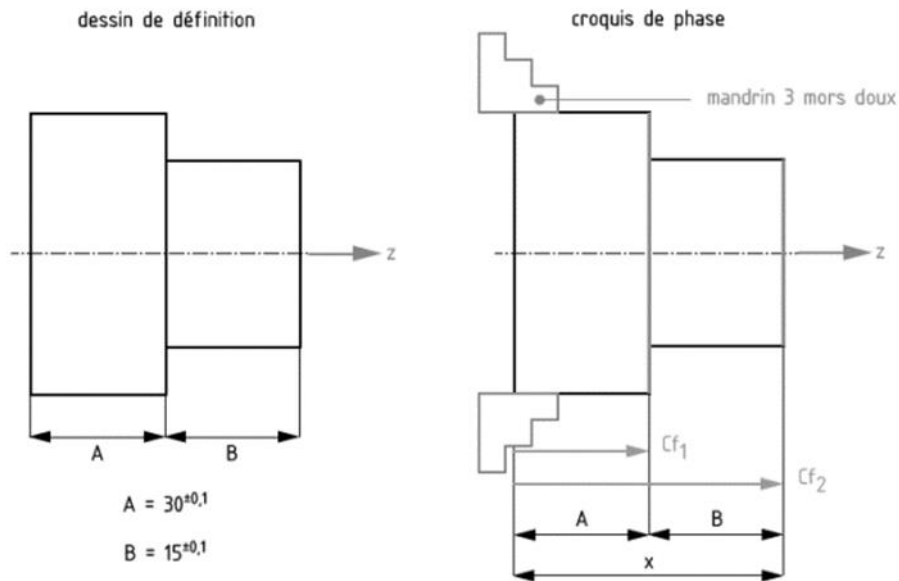


Figure VI.1 : Dessin de définition et croquis de phase

La cote fabriquée Cf_1 , correspondant à la cote **A** du dessin de définition, est obtenue directement en cote machine. C'est une cote directe.

La cote Cf_2 (ou **X**) est la cote-machine nécessaire au réglage de l'outil ; il faut la calculer, car elle ne figure pas sur le dessin de définition.

A et **B** sont les cotes fonctionnelles. Elles sont concernées par le transfert pour l'obtention de la cote fabriquée :

$$X = A + B$$

B est à considérer spécialement, car elle touche la surface usinée et va donc être supprimée pour cette phase, étant remplacée par **X**. **B** est la cote condition, elle devient **la résultante** des autres cotes **A** et **X**, ce qui permet d'écrire la relation fondamentale :

$$IT B = IT X + IT A$$

Où **IT** signifie intervalle de tolérance. On considère généralement que l'**IT** de la **CC** doit être supérieur ou égal à la somme des **IT** des **Cf**.

En généralisant :

$$IT \text{ cote condition} = \sum \text{ cotes intervenant dans le transfert (y compris la cote à calculer)}$$

Il en résulte que :

$$IT \text{ cote à calculer} = IT \text{ cote condition} - \sum IT \text{ autres cotes intervenant dans le transfert}$$

Ces relations fondamentales permettent le calcul de l'IT de la nouvelle cote.

Remarque :

L'IT de la nouvelle cote est obligatoirement plus faible que celui de la cote supprimée, devenue cote condition.

Pour éviter les erreurs, il est souhaitable de tracer la chaîne de cotes (appelée **chaîne de transfert**). La représentation graphique de la chaîne de transfert est appelée **graphe de transfert**.

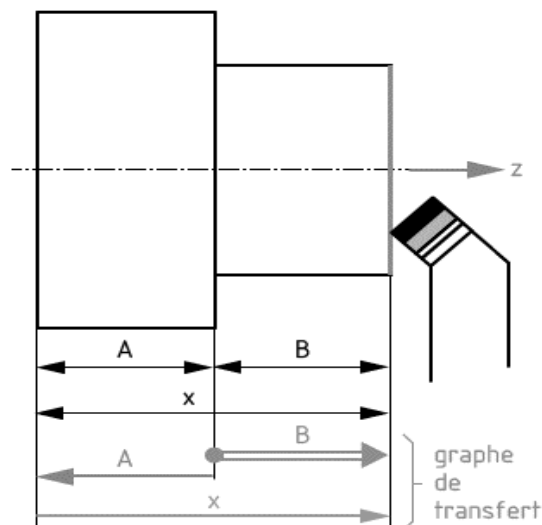


Figure VI.2 : La chaîne de transfert et le graphe de transfert

. Conventions adoptées pour tracer le graphe de transfert :

La cote condition (à transférer) est la cote qui ne peut être réalisée directement.

Le vecteur cote condition est tracé en double trait. Le sens positif habituellement utilisé est de la gauche vers la droite ou de bas en haut.

Les lignes d'attache de cotes sont numérotées de 1 à n.

Il ne peut pas avoir plus d'une cote fabriquée Cf par chaîne de côtes.

La chaîne de cotes doit être la plus courte possible.

L'IT de la cote condition doit être supérieur ou égal à la somme des IT des cotes composantes.

IT cote condition $\geq \sum$ IT des cotes composantes

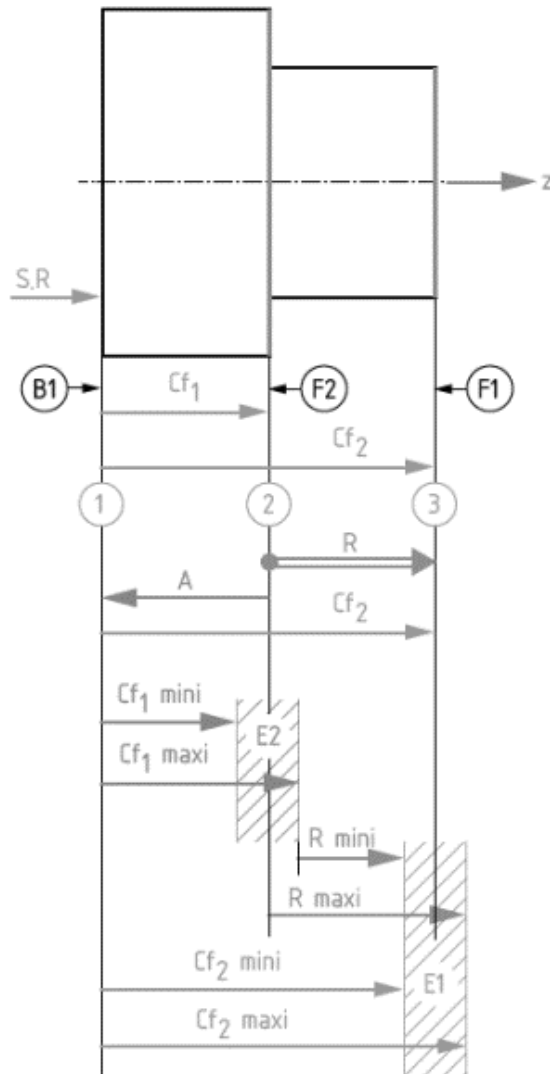
Les cotes de même sens que le vecteur cote condition sont maxi ou mini en même temps.

Les vecteurs des composantes sont tracés de manière à fermer la chaîne, leur sens étant choisi afin que la somme algébrique de ces composantes soit égale au vecteur cote condition. Pratiquement on peut prendre l'habitude de toujours partir de l'origine du vecteur cote-condition qui est en même temps l'origine d'une des composantes.

La lecture du graphe permet de trouver l'équation logique de la cote condition. Ainsi, **B** cote condition, et **X**, étant de même sens, alors que **A** est de sens contraire, on peut écrire :

$$\mathbf{B} = \mathbf{X} - \mathbf{A}$$

Nous définissons l'ensemble E_1 des positions occupées par le plan F_1 défini à partir du plan F_2 par les cotes R_{mini} et R_{maxi} . De la même manière, on notera E_2 l'ensemble des positions occupées par le plan F_2 défini par les cotes $C_{m1\text{mini}}$ et $C_{m1\text{maxi}}$ à partir du plan associé à la surface brute B_1 .



A partir de l'équation de la cote résultante $\mathbf{B} = \mathbf{X} - \mathbf{A}$ (ou encore $R = C_{f2} - C_{f1}$), les conditions suivantes sont à respecter :

$$B_{max} = X_{max} - A_{min} \qquad B_{min} = X_{min} - A_{max}$$

Nous pouvons ainsi calculer numériquement les bornes de la cote fabriquée C_{f2} .

4. Les méthodes de calcul d'un transfert de cote

Avant de calculer en détail un transfert, il est préférable de vérifier d'abord que la nouvelle cote sera acceptable, c'est à dire que son IT sera non seulement positif, mais suffisant pour être réalisable en fabrication. A l'aide de la relation fondamentale :

$$\mathbf{IT\ cote\ à\ calculer} = \mathbf{IT\ cote\ condition} - \sum \mathbf{IT\ autres\ cotes\ intervenant\ dans\ le\ transfert}$$

Il en résulte, pour le transfert de cotes traité dans le cas précédent :

$$ITX = ITB - ITA$$

$$ITX = 0,3 - 0,2$$

$$ITX = 0,1$$

Si le IT est jugé acceptable, on peut entreprendre les calculs, soit à l'aide de la méthode de côtes-limites soit en appliquant la méthode des cotes-moyennes.

f. La méthode des cotes limites

Ayant défini les cotes fonctionnelles **A** et **B**, on se propose de calculer la cote machine **X**. La cote **B**, qui touche la surface usinée, doit être supprimée et remplacée par **X**. Cette cote est donc la cote condition et la résultante de **A** et **X**. La méthode des cotes limites nécessite d'abord de tracer le graphe de transfert (figure); ensuite, l'équation de la cote condition $B = X - A$ est développée en interprétant les sens des vecteurs lus sur le graphe.

$$B_{max} = X_{max} - A_{min} \qquad B_{min} = X_{min} - A_{max}$$

$$X_{max} - 29,9 = 15 \qquad X_{min} - 30,1 = 14,7$$

$$X_{max} = 29,9 + 15 = 44,9 \qquad X_{min} = 30,1 + 14,7 = 44,8$$

Simplification : Exploitation d'un tableau (placé en regard de la chaîne) qui permet de regrouper les calculs sous un faible volume, en réduisant les risques d'erreurs.

Conventions adoptées :

1. Si la cote condition est minimale, les composantes de même sens qu'elle sont minimales et les cotes composantes de sens opposé sont maximales.
2. La valeur de la cote condition minimale doit être inscrite dans la même colonne que les cotes composantes maximales.
3. La somme des cotes inscrites dans la colonne des cotes minimales est égale à la somme des cotes inscrites dans la colonne des cotes maximales (cote condition minimale incluse).

Exemple :

Soit à réaliser un axe épaulé : les cotes fonctionnelles à respecter suivant l'axe Oz sont $A=60\pm 0,15$ et $B=35\pm 0,2$. La cote A est obtenue directement à l'aide de la cote fabriquée Cf_2 . La cote B est réalisée indirectement à l'aide de la cote fabriquée Cf_1 ; un transfert de cote est donc nécessaire.

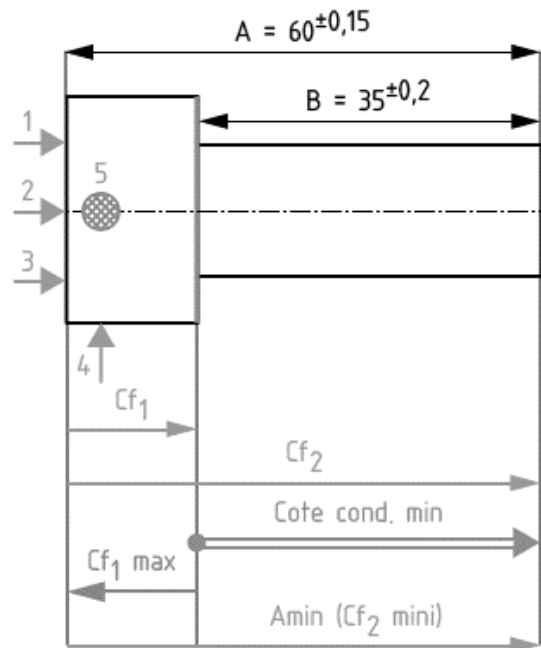


Figure VI.3 : Transfert de côtes - exemple : l'axe épaulé

. Calcul de Cf_1 en prenant la condition au minimum.

La cote condition B est prise au minimum (soit 34,8) et elle est placée dans la colonne des valeurs max.

La cote fabriquée Cf_1 est la cote cherchée ; elle au sens inverse de la cote condition, elle est donc maximale et elle est placée dans la colonne max.

La cote fabriquée $Cf_2 = A$ le même sens que la cote condition, elle est donc minimale (soit 59,85) et elle est placée dans la colonne min.

La somme des deux colonnes étant identique, on obtient la valeur maximale de Cf_1 par soustraction :

$$Cf_{1 \max} = 59,85 - 34,8 = 25,05.$$

Appliquons la règle (6) : **IT cote condition $\geq \sum$ IT des cotes composantes**

$$ITB = IT Cf_1 + IT A.$$

$$0,4 = IT Cf_1 + 0,3$$

$$IT Cf_1 = 0,1$$

$$\Rightarrow Cf_1 = 25,05^{+0,1/0,1}$$

		Cond min	
Cotes	min	max	Tolérances
B = 35 ± 0,2		34,8	0,4
Cf1 = ?		/?	/?
A = 60 ± 0,15	59,85		0,3
(Somme)	59,85	59,85	

. Calcul de Cf₁ en prenant la condition au maximum.

La cote condition B est prise au maximum (soit 35,2) et elle est placée dans la colonne min. La cote fabriquée Cf₂=A a le même sens que la cote condition, elle est donc maximale (soit 60,15) et elle est placée dans la colonne min.

La cote fabriquée Cf₁ est la cote cherchée ; elle au sens inverse de la cote condition, elle est donc minimale et elle est placée dans la colonne min.

La somme des deux colonnes étant identique, on obtient la valeur minimale de Cf₁ par soustraction :

$$Cf_{1 \min} = 60,15 - 35,2$$

$$Cf_{1 \min} = 24,95$$

$$\text{Appliquons la règle (6) : } IT Cf_1 = 0,4 - 0,3 = 0,1$$

$$\text{Alors } Cf_{1 \min} = 24,95^{+0,1/0}$$

Cond max			
Cotes	min	max	Tolérances
B = 35 ± 0,2	35,2		0,4
A = 60 ± 0,15		60,15	0,3
Cf1 = ?	/?		/?
(Somme)	60,15	60,15	

g. La méthode des cotes moyennes

Reprenons l'exercice précédent. La démarche de calcul des cotes-moyennes comporte les étapes suivantes :

a) on exprime toutes les cotes connues en cote moyenne, soit : $A = 30^{\pm 0,1}$

$$B = 15^{0/-0,3} = 14,85^{\pm 0,15} \text{ (Cote condition)}$$

b) on calcule la valeur nominale de X : $X = A + B$ (ceci est lu sur le croquis)

$$\Rightarrow X = 30 + 14,85 = 44,85$$

c) on calcule l'IT de X en appliquant la relation fondamentale (6) soit :

$$\text{IT cote condition (cote B)} = \text{IT X} + \text{IT A}$$

$$(\pm 0,15) = \text{IT X} + (\pm 0,1) \text{ donc :}$$

$$\text{IT X} = (\pm 0,15) - (\pm 0,1) = (\pm 0,05)$$

Finalement, $X = 44,85^{\pm 0,05}$ valeur identique à celle trouvée par la méthode des cotes limites.

h. Le calcul du transfert total

Les transferts établis précédemment sont souvent appelés « transferts partiels » lorsque l'IT de la cote nouvelle est acceptable sans qu'il ait été nécessaire de modifier les cotes d'origine. Dans certains cas, le calcul de la nouvelle cote est inacceptable :

Quand l'IT obtenu est négatif

Lorsque l'IT obtenu est positif mais de valeur trop faible pour pouvoir être respectée en fabrication.

On peut alors envisager un **transfert total**. Le calcul lui-même est identique à celui d'un transfert partiel mais il faut modifier les IT d'une ou plusieurs cotes d'origine, afin d'obtenir pour la nouvelle cote un IT acceptable.

Fondamental :

Le préparateur n'a pas le droit d'augmenter la valeur de l'IT d'une cote fonctionnelle, mais il peut le réduire.

Exemple :

Soit D le cylindre à usiner

X est la cote machine à calculer

Les cotes fonctionnelles du contrat sont $A=15^{\pm 0,4}$; $B= 60^{\pm 0,1}$; et $C= 20^{\pm 0,3}$

C'est la cote condition (elle sera supprimée et remplacée par X pour remplacer D).

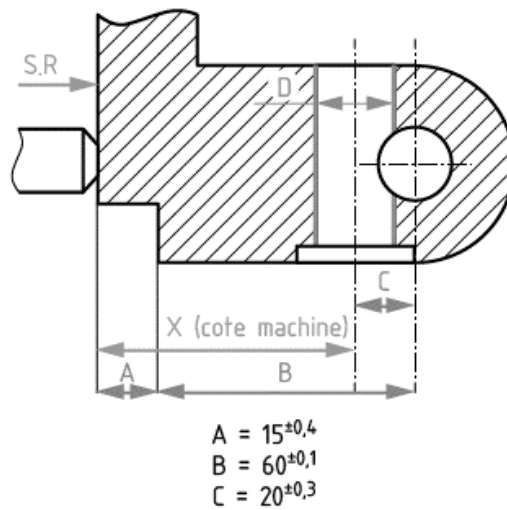


Figure VI.4 : Le cylindre D

Vérifier d'abord si le transfert est acceptable :

$$IT X = IT C - IT A - IT B$$

$$IT X = 0,6 - 0,8 - 0,2 = - 0,4$$

Conclusion : ITX étant négatif, le transfert n'est pas. Acceptable.

Au regard des équations ci-dessus et compte tenu du fait qu'on ne peut pas augmenter l'IT de la cote condition C, il résulte qu'on doit réduire ITA ou ITB, ou à la fois ITA et ITB, afin d'obtenir un ITX acceptable. Comme $ITA > ITB$ on va essayer d'abord de réduire ITA à une valeur encore réalisable normalement en fabrication, soit 0,2 par exemple. L'équation ci-dessus devient :

$$IT X = 0,6 - 0,2 - 0,2 = 0,2$$

Si cette valeur est également jugée réalisable en fabrication, ces nouvelles cotes tolérancées peuvent être retenues. Sinon, on peut tenter d'autres modifications, par exemple réduire aussi ITB (l'essentiel étant que tous les IT soit réalisables).

Il est recommandé de répartir l'IT de la cote condition entre les différentes composantes (dont la nouvelle cote) de manière judicieuse, en accordant des IT plus importants aux cotes jugées les plus difficiles à réaliser par l'usinage.

5. La simulation d'usinage

5.1.Introduction

La simulation d'usinage s'effectue en traçant les chaînes de cotes cumulées de toutes les opérations d'usinage réalisées sur la pièce, dans les directions imposées par les différentes cotes.

Elle permet :

De déterminer toutes les cotes de fabrication (côtes d'ébauches) ;

De déterminer les exigences dimensionnelles et géométriques du BM concernant la pièce brute (pour usiner une pièce correcte en mettant en œuvre une quantité minimale de matière brute) ;

De vérifier la validité du processus envisagé.

5.2.La méthodologie d'établissement d'une simulation d'usinage

La simulation se réalise lorsque le processus d'usinage est défini.

Elle consiste à :

Choisir les directions de simulation.

Faire le croquis de la pièce et représenter les épaisseurs de matière enlevées à chaque opération.

Indiquer sur le dessin les cotes condition à obtenir (cotes BE). Les cotes Cpm et les cotes conditions méthodes n'apparaissent que dans les graphes de transfert (leurs valeurs sont fixées par le BM).

Tracer les lignes de rappel correspondant aux surfaces usinées et aux surépaisseurs.

Tracer successivement (en les séparant par un trait) les chaînes de cotes des différentes opérations et faire apparaître en vis-à-vis le repérage alphanumérique des cotes de fabrication et de brut.

Résoudre au fur et à mesure les chaînes qui peuvent l'être ou passer à la chaîne suivante lorsque la résolution est impossible.

Progresser ainsi jusqu'à la détermination de toutes les cotes de fabrication et de brut recherchées.

Remarque

La détermination des cotes de fabrication peut se présenter sous forme de tableau.

5.3.Interprétation des cotes de brut calculées dans la simulation

Ces cotes donnent les dimensions limites (minimales ou maximales) de la pièce brute qui sera transformée par le processus d'usinage retenu. Elles sont définies par rapport aux surfaces

brutes de mise en position de la pièce et ce sont celles qui doivent être contrôlées par le service usinage lors de la réception de la pièce brute. Pour définir complètement la pièce brute, il convient ensuite d'ajouter aux contraintes fonctionnelles imposées par le BE et aux exigences dimensionnelles et géométriques du BM toutes les dispersions inhérentes au procédé d'élaboration (IT, dépouille, déports, défauts de coaxialité).

5.4. Le transfert de côtes : cas des tolérances géométriques

Les transferts géométriques concernent des transferts faisant intervenir des tolérances géométriques de position. La méthode générale est la même que pour le transfert de côtes.

Remarque :

La résolution se présente sous deux formes générales :

- l'une valable pour des tolérances de position (localisation, coaxialité et symétrie),
- l'autre convenant aux tolérances d'orientation (inclinaison : parallélisme et perpendicularité).

a. Le transfert d'une coaxialité

- Détermination d'une cote de brut

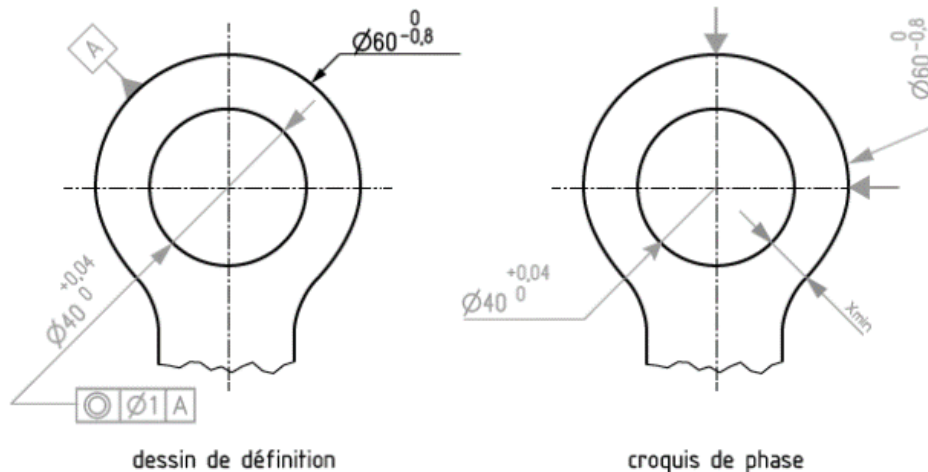


Figure VI.5 : Transfert d'une coaxialité

La cote X_{min} sert notamment au calcul de la cote du brut.

Selon la chaîne de cotes (figure) nous pouvons écrire les relations suivantes :

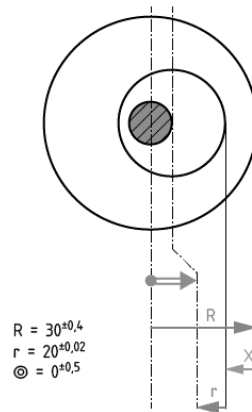


Figure VI.6 : Détermination d'une côte de brut pour une coaxialité imposée

- **Détermination d'une coaxialité**

On impose une épaisseur minimale de matière E_{\min} (condition de résistance) sur la pièce illustrée ci-après. Soit à calculer la tolérance de coaxialité qui permettra de respecter cette condition sachant que la mise en position axiale est réalisée par un vé à 90° .

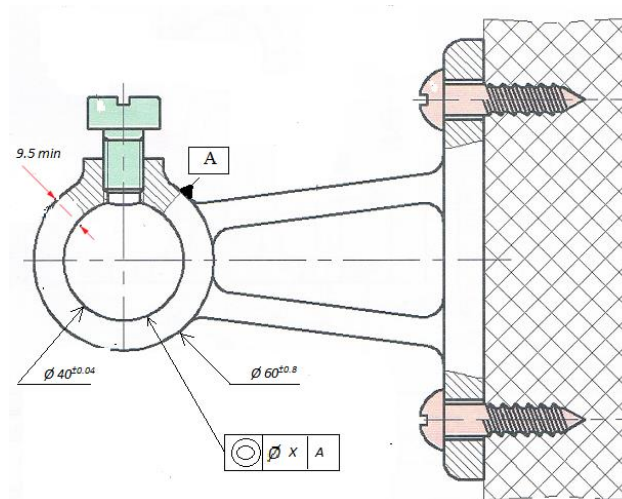


Figure VI.7 : Détermination d'une coaxialité

La chaîne de cotes permet de déduire les relations suivantes et de calculer la coaxialité maximale X_{\max} est la suivante :

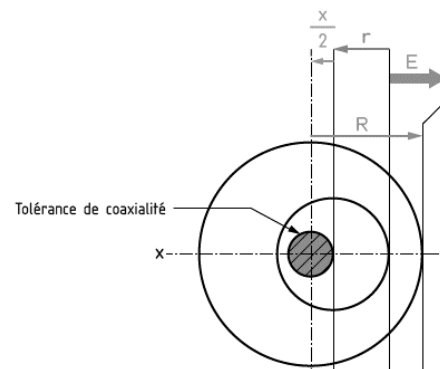
$$E_{\min} = R_{\min} - (r_{\max} + X/2_{\max})$$

$$9,5 = 29,6 - (20,02 + X/2_{\max})$$

$$X/2_{\max} = 29,6 - (20,02 + 9,5)$$

$$X/2_{\max} = 0,08$$

$$X_{\max} = 0,16$$



b. Le transfert d'une localisation

Le dessin de phase (figure ci-après) montre que le procédé de fabrication donne, pour l'axe de l'alésage, une zone de tolérance parallélépipédique à section carrée de côté t' . Cette zone de tolérance doit rester inscrite à l'intérieur du cylindre Φt imposé par le dessin de définition (voir le détail de la zone de tolérance).

$$\text{Soit : } t' = \frac{t\sqrt{2}}{2} \text{ d'où } \frac{t'}{2} = \frac{t\sqrt{2}}{4}$$

$$\text{On déduit alors, à partir de cette relation : } \frac{t'}{2} = \frac{0,2\sqrt{2}}{4}$$

$$\text{Donc } \frac{t}{2} = 0,0707$$

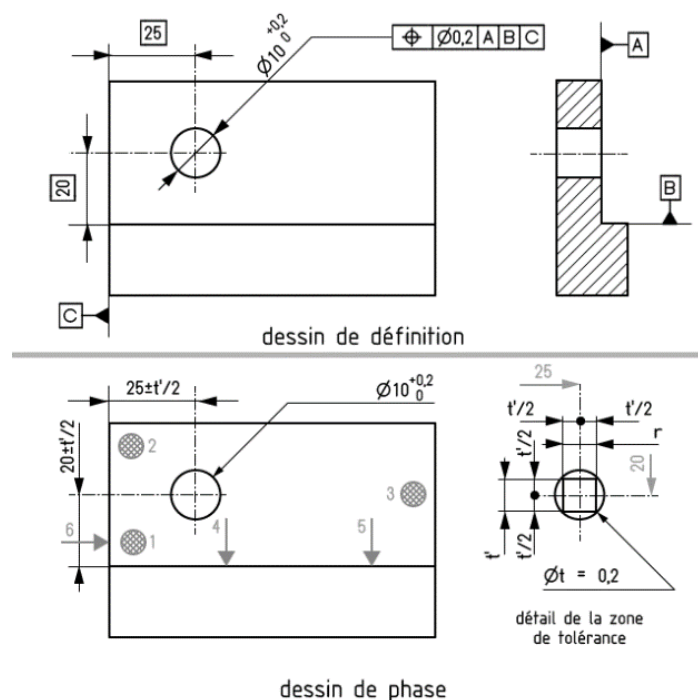


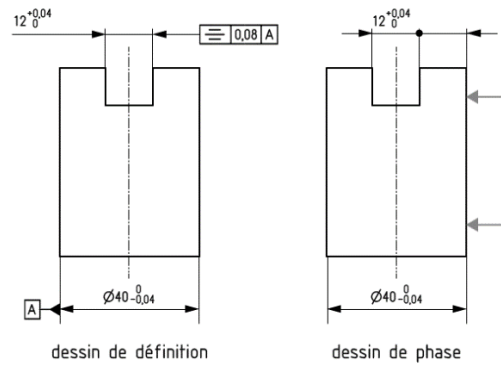
Figure VI.8 : Transfert de position : dessin de définition, dessin de phase et détail de la zone de tolérance

c. Le transfert d'une symétrie

Le dessin de phase montre que la position de la rainure est donnée par la cote X au lieu de la tolérance de symétrie. La cote condition est la tolérance de symétrie $t = 0,08$. On peut écrire également la cote condition :

$$t = \pm 0,04.$$

Les cotes et les tolérances intervenant dans la chaîne sont les demi-cotes affectées de la demi-tolérance.



Transfert d'une symétrie

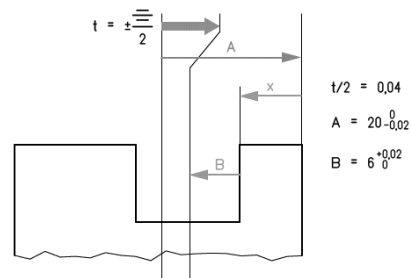


Figure VI.9 : Chaîne de cotes

D'après la chaîne de cotes on a :

$$t/2 \text{ max} = A_{\text{max}} - (X_{\text{min}} + B_{\text{min}})$$

$$0,04 = 20 - (X_{\text{min}} + 6)$$

$$X_{\text{min}} = 13,96$$

$$t/2 \text{ min} = A_{\text{min}} - (X_{\text{max}} + B_{\text{max}})$$

$$-0,04 = 19,98 - (X_{\text{max}} + 6,02)$$

$$X_{\text{max}} = 14$$

$$X = 13,98 \pm 0,02$$

d. Le transfert d'une inclinaison

Le dessin de phase montre que la face inclinée est usinée en ayant la pièce en appui plan sur la face horizontale. L'angle obtenu est X .

Le calcul de la valeur X tolérée est réalisé en plusieurs étapes :

- **Écrire la tolérance de perpendicularité en valeur angulaire :**

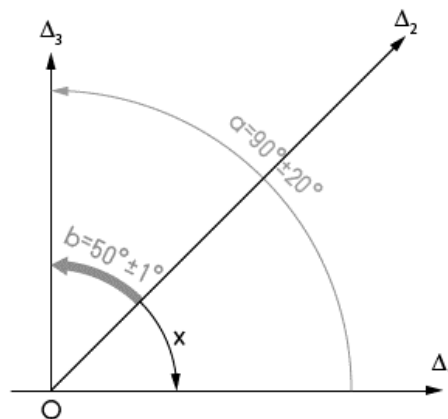
$$\tan a = \frac{0,2}{34} \approx 0,00588 \quad a \approx 20'$$

- **Choisir un système d'axes.**

A partir d'un point O quelconque, tracer trois axes parallèles aux cotes des angles **a**, **b** et **x**. Le sens de chaque axe est indifférent.

- **Tracer la chaîne de cotes angulaires.**

Cette chaîne est constituée d'arcs de cercles orientés.



La chaîne de cotes angulaires

On applique à la chaîne la règle générale du transfert de côtes. Soit :

$$b_{\max} = a_{\max} - X_{\min}$$

$$51^\circ = 90^\circ 20' - X_{\min}$$

$$X_{\min} = 39^\circ 20'$$

$$b_{\min} = a_{\min} - X_{\max}$$

$$49^\circ = 89^\circ 40' - X_{\max}$$

$$X_{\max} = 40^\circ 40'$$

$$X = 40^\circ \pm 40'$$

Vérification :

$$IT\ b = IT\ a + IT\ X\ \text{donc, en valeurs numériques : } \pm 1^\circ = (\pm 20') + (\pm 40')$$

Remarque :

Cette méthode s'applique si les axes $\Delta 1$, $\Delta 2$, $\Delta 3$ sont coplanaires. Si l'inclinaison à transférer est oblique par rapport au plan de projection, on effectue deux transferts par rapport à deux plans de projection.

e. Le transfert d'un parallélisme

Le dessin de phase montre que les alésages $\Phi 40 H7$ et $\Phi 30 H7$ sont usinés, la pièce étant en appui plan sur la surface A. On obtient, pour l'alésage $\Phi 30 H7$, une perpendicularité par rapport à la surface A au lieu du parallélisme demandé entre les axes.

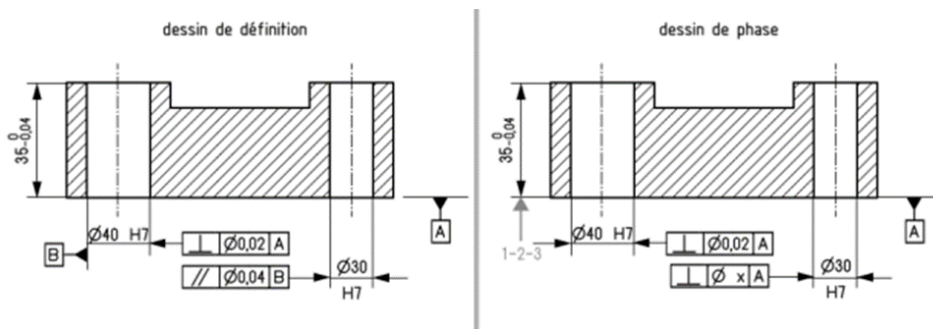


Figure VI.10 : Le dessin de définition et le dessin de phase

Le calcul de la valeur X tolérée sera réalisé en plusieurs étapes :

- **Ecrire les tolérances de perpendicularité et de parallélisme en valeurs angulaires :**

$$\tan \alpha = \frac{0,02}{35} = 5,71 \cdot 10^{-4} \quad \alpha \approx \pm 2'$$

$$\tan \beta = \frac{0,04}{35} = 1,14 \cdot 10^{-3} \quad \beta \approx \pm 4'$$

- **Choisir un système d'axes (comme précédemment). Pour une meilleure clarté on évite de prendre deux axes de même direction et de même sens.**

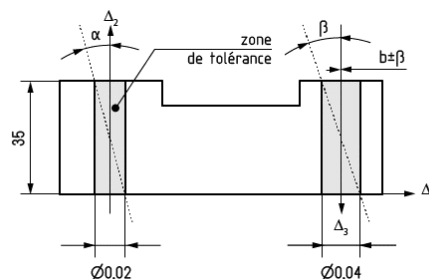


Figure VI.11 : Les positions limites pour les axes

- **Tracer la chaîne de côtes. Cette chaîne est composée de cercles orientés. On peut appliquer la relation :**

$IT\ b = IT\ a + IT\ X$ donc, en valeurs numériques : $\pm 4' = (\pm 2') + X \Rightarrow X = \pm 2'$

En convertissant cette tolérance angulaire en tolérance de perpendicularité :

$$X = \tan 2' * 35 \Rightarrow X = 0,02$$

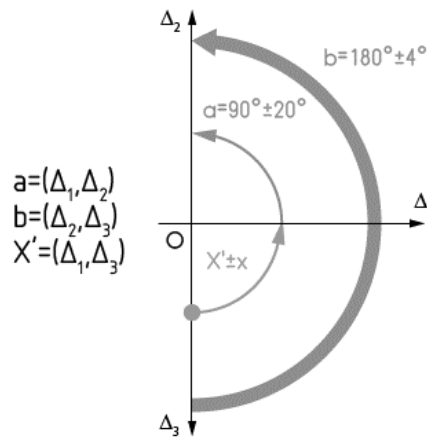


Figure VI.12 : La chaîne de cotes angulaires

Remarque :

Dans le cas où la tolérance sur la cote transférée (cote condition) est inférieure à la somme des tolérances sur les côtes composantes, il est nécessaire de réduire les tolérances sur les côtes restantes.

Chapitre VII : Méthodologie d'établissement des processus d'usinage

1. Influence des contraintes d'usinage sur le graphe ordonné (exemple d'application)

Le graphe ordonné initial est établi en tenant compte de la cotation du dessin de définition et, lorsqu'elles existent, des associations obligatoires.

Il faut ensuite :

- faire apparaître les antériorités dues aux contraintes d'usinage,
- respecter l'ordre d'intervention imposé par les opérations élémentaires concernant chaque surface.

Règle : La notion de niveau est toujours définie par les liaisons dimensionnelles entre surfaces, mais en superposant à la cotation de définition, une première approche de la cotation de fabrication.

Le nouveau graphe ordonné résultant, peut être établi directement à partir du graphe initial, mais par souci de clarté, la procédure qui y conduit sera ici détaillée (par étapes successives).

2. Influence de l'ordre d'intervention des opérations élémentaires

Cette étape consiste à faire apparaître, dans les niveaux existants, les niveaux créés par les antériorités dues aux opérations élémentaires. Pour alléger le graph, et parce que certaines d'entre elles deviennent des inconnues, les liaisons dimensionnelles ne sont pas représentées.

Ce travail peut être effectué suivant deux possibilités :

- soit distinguer seulement ébauche et finition pour les surfaces élémentaires (voir codage simplifié),
- soit distinguer successivement toutes les ébauches et la finition (voir codage détaillé).

La seconde solution est complète mais lourde. Comme dans la plupart des cas les contraintes d'usinage n'interviennent qu'entre ébauche et finition, la première solution est retenue, avec cependant l'utilisation du codage détaillé pour les surfaces constituant une association et non finies au même niveau.

3. Changements de niveaux imposés par les contraintes d'usinage

Cette seconde étape consiste à transcrire sur le graphe ordonné établi précédemment les changements de niveau imposés aux surfaces concernées par les contraintes d'usinage

particulières. Sur le graphe ordonné ce travail peut être conduit matériellement en utilisant un fléchage particulier qui indique les divers niveaux auxquels doivent se trouver les surfaces pour respecter les contraintes d'usinage (fig. 1).

L'extrémité des flèches se trouve sur une ligne rappelant la (ou les) surface(s) de niveau le plus élevé imposant la succession. Conventionnellement les changements de niveaux sont toujours représentés dans le sens des niveaux croissants (vers la droite). Les surfaces concernées par les contraintes d'usinage mais n'ayant pas à changer de niveau ne sont pas particularisées. La figure 1 montre les résultats de ces deux premières étapes appliquées au galet moteur.

4. Etablissement du graphe ordonné final

Il fait apparaître le nouvel ordonnancement des surfaces par niveaux et mentionner toutes les antériorités dues aux contraintes d'usinage.

Elles sont notées : x .

La cotation, qui dépend du processus retenu, ne figure pas sur ce graphe.

La figure 2 montre le graphe ordonné final, pour le galet moteur.

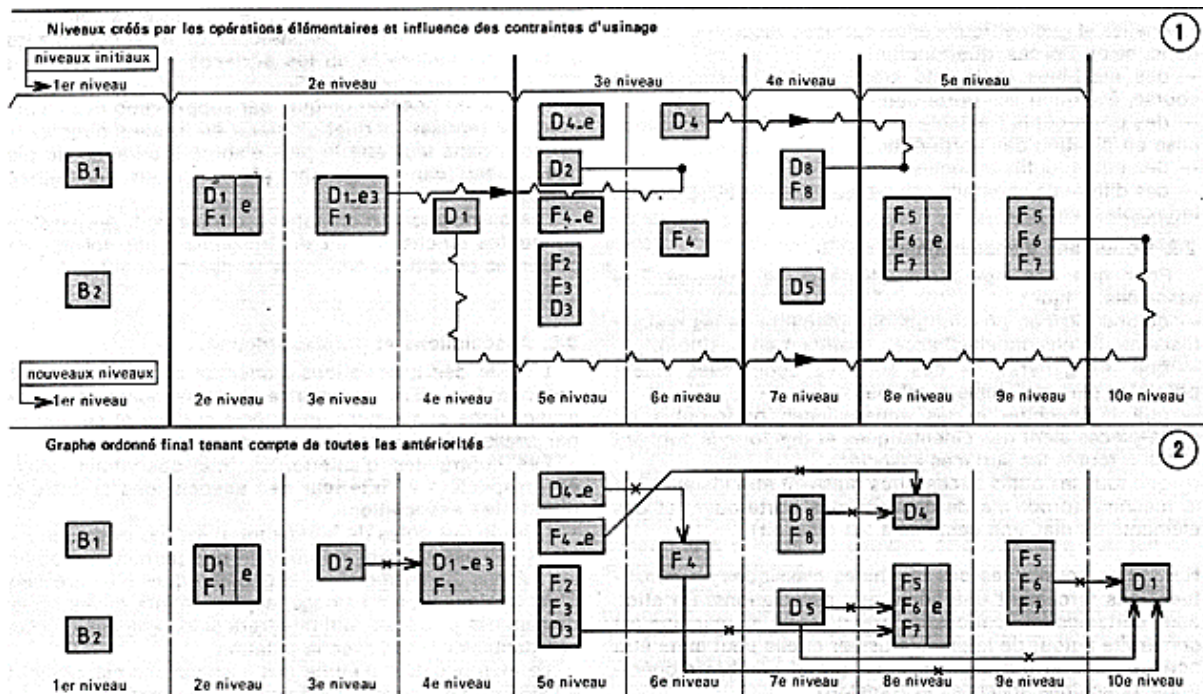


Figure VII.1 : Niveaux créés par les opérations élémentaires et l'influence des contraintes d'usinages.

Chapitre VIII : La réalisation des gammes d'usinage

1. 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.

2. Le choix des surfaces de référence

Les éléments de la cotation indiquée sur le dessin de définition de la pièce à usiner sont primordiaux dans l'établissement de la gamme et dans les choix technologiques qui seront faits par la suite car ils influencent la mise en position et par conséquent la qualité des surfaces réalisées.

Avec un matériel et des moyens déterminés, il est possible, selon le choix de la surface de référence (si elle est brute ou usinée par exemple) d'obtenir des cotes dont la précision de l'intervalle de tolérance est différente. Assez souvent, pour pouvoir conserver certaines surfaces de référence et diminuer ainsi le nombre de phases rentrant dans une gamme d'usinage on doit recourir au transfert de côtes TC.

3. Le choix des surfaces de départ

La mise en position (MEP) d'une pièce nécessite 6 points de contact mais parfois ce nombre n'est pas suffisant pour empêcher la pièce de fléchir, à cause de facteurs comme son propre poids, l'action du bridage, ou l'action des efforts de coupe. On placera dans ce cas des points d'appui réglables.

Le choix de l'emplacement des points d'appui est donc primordial pour assurer une mise en position correcte, lors de la première opération d'usinage. De ce choix dépendra le balancement de la matière et la fidélité du résultat, pour l'entière série de pièces.

En règle générale on espace les points d'appui car plus ils sont espacés moins l'erreur qui se produira sera grande, dans le cas contraire il se produirait un phénomène d'amplification.

En ce qui concerne le choix des surfaces de départ, on s'appuie sur les considérations suivantes : la plus grande surface servira généralement pour l'appui, tandis que la plus grande longueur sera utilisée pour l'alignement. Le choix sera ensuite guidé par d'autres éléments comme par exemple la méthode d'obtention du produit brut ou parfois en fonction des considérations liées aux impératifs fonctionnels.

4. La conduite de l'usinage

a. Les moyens à mettre en œuvre

Ils sont dépendants d'abord de l'importance de la série de pièces à réaliser. On distingue généralement trois situations :

La série est petite, l'usinage sera réalisé notamment avec les moyens disponibles à l'atelier.

La série est moyenne, on peut alors envisager même l'achat de machines et d'équipements spéciaux pouvant être utilisés ultérieurement pour d'autres travaux.

L'importance de la série justifie elle-même la création des machines et d'équipements spéciaux.

Un autre critère qui pourra justifier certains choix technologiques est le prix de revient de chaque pièce.

b. La décomposition de l'usinage en opérations élémentaires

Compte tenu de la possibilité d'usiner une surface en employant différentes techniques ou différents moyens la décomposition de l'usinage en opérations élémentaires peut s'avérer un exercice très compliqué. L'association des surfaces par type d'usinage est un des critères majeurs à prendre en compte, on appliquera ce critère notamment une fois que le choix de la première sous-phase d'usinage sera définitif.

Les diverses incompatibilités pouvant apparaître toutefois peuvent être contournées en adoptant une des trois solutions suivantes :

Exécuter un montage d'usinage et réaliser deux (voir trois) surfaces de référence en changeant de machine mais en laissant la pièce dans la même position dans le montage. L'inconvénient principal est lié au besoin de plusieurs montages identiques.

Prévoir sur la pièce brute des surfaces de reprise. Ces surfaces, exécutées en première sous-phase, permettront plusieurs reprises pour l'exécution d'une ou plusieurs surfaces de référence. L'inconvénient de cette solution réside dans l'introduction d'un usinage supplémentaire.

Réaliser toutes les surfaces sans démonter la pièce. Certaines techniques comme le rabotage permettent de telles réalisations, on place sur la table de la machine un maximum de pièces en ligne, un seul réglage étant effectué ainsi pour réaliser plusieurs pièces.

Pour faire le choix de l'une ou l'autre parmi les solutions précédemment proposées les considérations économiques seront un critère supplémentaire.

Pour les situations dans lesquelles il n'existe pas d'ordre préférentiel à cause de la cotation ou des spécifications géométriques, le choix peut se faire en fonction de l'association des surfaces par type d'opération.

5. L'association des surfaces à usiner

- **Définition**

Une **phase** représente le groupement de toutes les opérations réalisées sur une même machine ou sur des machines de même type.

Une feuille de phase comporte, pour chaque phase d'usinage :

Son numéro : de 10 en 10 dans l'ordre prévu de la gamme,

Son intitulé : correspond en général au type de machine utilisée,

Une description complète de la **mise en position isostatique MEP**,

La suite des opérations élémentaires d'usinage, dans l'ordre de leur exécution,

Les cotes fabriquées C_f correspondantes,

La machine-outil choisie

Le nom, la référence, les caractéristiques principales des **outils et des outillages** utilisés,

Un schéma de phase montrant :

La pièce : en position d'usinage sur la machine, en deux vues au moins,

La mise en position isostatique MEP,

Les cotes fabriquées C_f ,

La mise en évidence des surfaces usinées (illustrée par un trait épais sur le dessin).

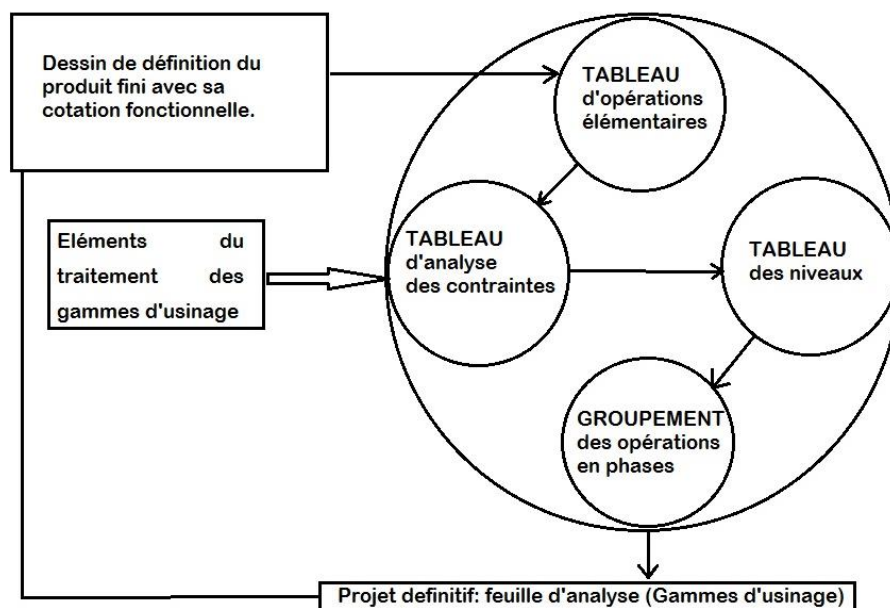
- **Définition**

On désigne par **sous-phase** l'association des opérations réalisées sans démontage ou transfert de pièce.

L'opération est tout travail élémentaire réalisé avec un seul outil ou simultanément avec plusieurs outils.

6. Le traitement des gammes d'usinage

- **Graphe logique du traitement des gammes d'usinage**



a) A partir du dessin de définition coté de manière fonctionnelle, on effectue le repérage des surfaces usinées et brutes (chiffres, lettres, lettres avec indices, etc).

Prendre ensuite rapidement connaissance des caractéristiques principales :

De la pièce : matière, dimensions et formes

Des surfaces brutes : nature, formes et dimensions de ces surfaces

Des surfaces usinées : Nature, formes, dimensions, précision, cotation relative à chaque surface,

Liaisons au brut : cotes entre surfaces usinées et surfaces brutes

b) Établissement des liaisons d'ordre dimensionnel et/ou géométrique entre les surfaces brutes et usinées ou entre les surfaces usinées seulement. On mettra déjà à ce stade en évidence la concentration importante de contraintes sur certaines surfaces qui constitueront probablement des antériorités dans la réalisation des usinages pour la réalisation d'autres surfaces. On réalisera également à ce stade des transferts de cotes si certaines surfaces ne possèdent pas de cote de liaison.

Sur la base des considérations faites et des relations établies nous sommes capables à ce stade de compléter le document "*tableau des opérations élémentaires*". On réalise donc à ce stade l'inventaire de toutes données fournies par le bureau d'études.

Analyse des opérations élémentaires						Pièces :					Feuille N° 1			
Repère	Forme Surface	Etat de Surface	<i>Liaisons entre surfaces</i>			Moyens d'usinage					Opérations élémentaires			
			Au brut	Dimensio nnelles	Position	T	F	P	A	R	E	F/2	F	

TABLEAU DES GROUPEMENTS DE SURFACES			Pièce :		Feuille N°: 2	
Repère	Surfaces associés	Raison du groupement			Opérations	

c) Remplir, sur la base du document précédemment réalisé, le tableau "groupement évident des opérations". Rechercher les groupements évidents de surfaces pouvant être réalisées par le même outil par exemple (ou par plusieurs outils associés) ou encore par le même type d'opération (les ébauches).

d) Remplir le document récapitulatif regroupant *les contraintes d'antériorité, dimensionnelles et géométriques*.

Analyse des contraintes								Pièce:			Feuille N° 3	
Opérations	CONTRAINTES											
	Dimensionnelles	Géométriques						Technologiques			Economiques	
		//	⊥	⊙	⊕	∠	≡	Opération	Bavure	Reprise	Usure d'outil	

e) Procéder à l'établissement du "*tableau des niveaux*". Sur ce document nous pouvons faire apparaître les contraintes d'antériorité, il s'établit à partir de la feuille d'opérations élémentaires et du dessin de définition du produit. On reporte en "entrées et sorties" les opérations élémentaires, le tableau servira pour la détermination des niveaux d'usinage et le groupement d'opérations par phases.

TABLEAU DES NIVEAUX		Pièce:
Nom :	Prénom:	Groupe:
NIVEAUX D'USINAGE		
total		
OPERATIONS ELEMENTAIRES ANTERIEURES		
↻	AUX OPERATIONS ELEMENTAIRES	

f) Détermination des niveaux d'usinage. On va totaliser d'abord, dans la colonne prévue, l'ensemble des antériorités indiquées sur les lignes. Les surfaces (ou les opérations) ayant obtenu zéro (donc aucune contrainte d'antériorité) seront réalisées en premier lieu. La détermination des opérations de niveau 1 est faite en supprimant dans le tableau des niveaux les colonnes correspondant aux surfaces ou aux opérations ayant obtenu zéro sur la ligne. On effectue une nouvelle sommation, des zéros apparaîtront maintenant au niveau 1.

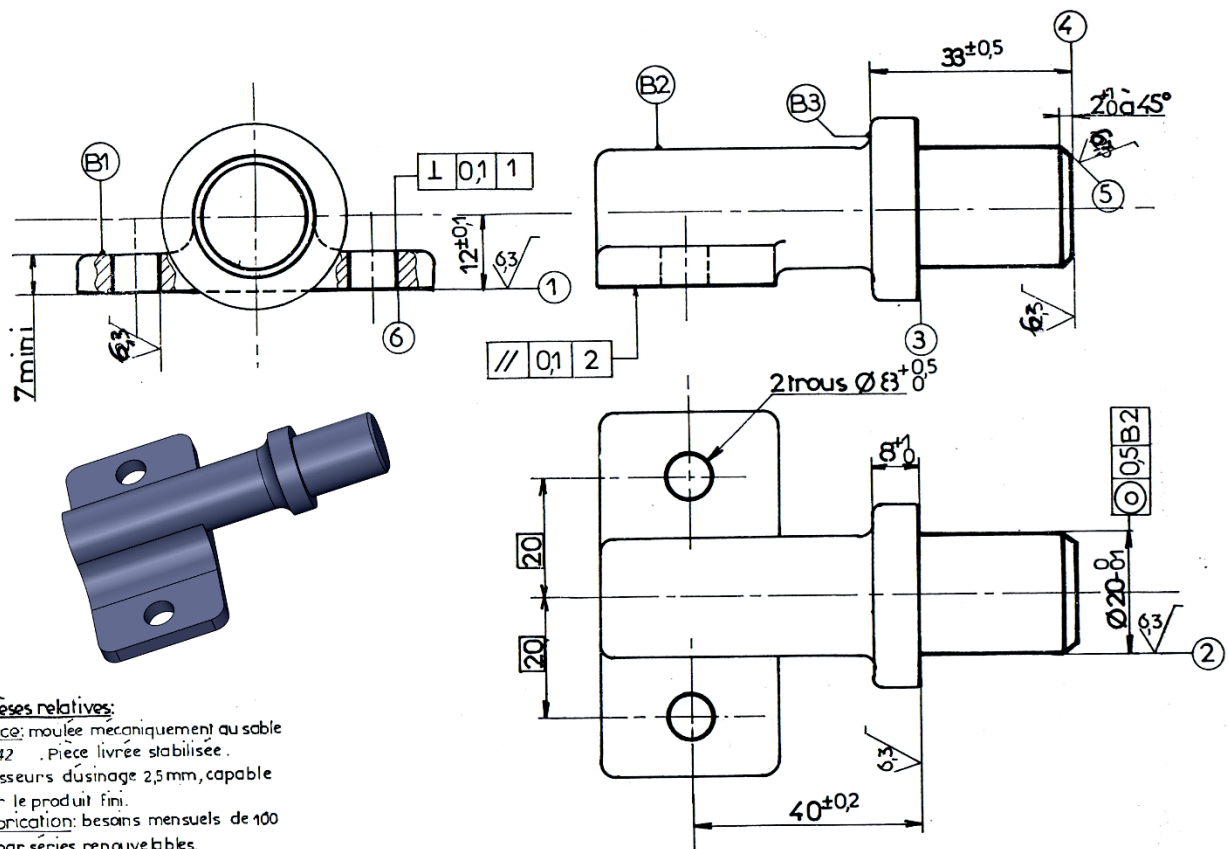
On procédera ainsi, de la même manière, jusqu'à l'épuisement des antériorités, ce qui peut être vérifié facilement car à la fin de chaque ligne nous devons avoir la valeur zéro.

g) Groupement des phases. Après avoir placé verticalement les niveaux et sur chaque ligne de ceux-ci les opérations élémentaires on procède au groupement des opérations en prenant en compte les considérations d'antériorité type réalisation par le même outil ou groupement évident par type de surfaces, etc. Le regroupement se fera également sur la base des considérations économiques, des possibilités techniques, du parc machines disponible, etc.

h) Rédaction du document *Feuille d'Analyse d'Usinage* (gamme d'usinage) en s'appuyant sur les considérations concernant les choix des référentiels, le respect des spécifications dimensionnelles et géométriques, etc.

Nom, Prénom:		FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE		BUREAU DES METHODES
Elément:		Ensemble:		Symboles :
Matière:		Brut:		Appui :
				Centrage :
				Serrage :
No d'op.	Désignation des phases, sous phases et opérations	Machine	Appareillage:	Croquis de la pièce à ses divers stades d'usinage
10	<u>CONTROLE DU BRUT</u>			
20 <u>Référentiel défini par:</u> Liaison.....sur... Liaison.....sur... Liaison.....sur...		Outil Outil Outil	

Exemple de réalisation des gammes d'usinage



Hypothèses relatives:

Δ la pièce: moulée mécaniquement au sable
 Acier C42 . Pièce livrée stabilisée.
 Surespaisseurs d'usinage 2,5mm, capable
 d'obtenir le produit fini.
 Δ la fabrication: besoins mensuels de 100
 pièces par séries renouvelables.
 Δ l'équipement des ateliers: équipes de
 machines pour la fabrication en moyenne
 et petite série.

Travail demandé:

Etudier et rédiger l'analyse de fabrication.

Echelle: 1	Matériau: C42
SUPPORT D'AXE	

Analyse des opérations élémentaires						Pièces:					Feuille N° 1					
Repère	Forme Surface	Etat de Surface	Liaisons entre surfaces			Moyens d'usinage					Opérations élémentaires					
			Au brut	Dimensionnelles	Position	T	F	P	A	R	E	F/2	F			
①	Plane	6.3	7min (B ₁)	12 ^{±0,1} (2)	// 0.1 (2)		<input checked="" type="checkbox"/>									1F
②	Cylindrique Ø20 ^{±0,1}	6.3		12 ^{±0,1} (2)	⊙ 0.5 (B ₃)	<input checked="" type="checkbox"/>										2F
③	Plane	6.3	8 ^{±1} (B ₃)	40 ^{±0,2} (6)		<input checked="" type="checkbox"/>										3F
④	Plane	6.3	33 ^{±0,1} (B ₃)			<input checked="" type="checkbox"/>										4F
⑤	Cylindrique	6.3		45° (4)		<input checked="" type="checkbox"/>										5F
⑥	Cylindrique Ø8 ^{±0,5}	6.3		20 (2) 40 ^{±0,2} (3)	⊥ 0.1 (1)			<input checked="" type="checkbox"/>								6F

TABLEAU DES GROUPEMENTS DE SURFACES		Pièce:	Feuille N°: 2
Repère	Surfaces associés	Raison du groupement	Opérations

Analyse des contraintes		Pièce:	Feuille N° 3									
Opérations	CONSTRAINTES											
	Dimensionnelles	Géométriques						Technologiques			Economiques	
		//	⊥	⊙	⊕	∠	≡	Opération	Bavure	Reprise	Usure d'outil	
B₁												
B₂												
B₃												
1F	B₁											
2F				B₂								4F
3F	B₃											2F
4F	B₃											
5F	4F											2F
6F	2F 3F			1F								

TABLEAU DES NIVEAUX											Pièce:						Nom:				Feuille N°									
ENTREES											NIVEAUX																			
SORTIES	R	B ₁	B ₂	B ₃	1F	2F	3F	4F	5F	6F								T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	B ₁	▨																	0											
	B ₂		▨																0											
	B ₃			▨															0											
	1F	1			▨														1	0										
	2F		1			▨		1											2	1	0									
	3F			1		1	▨												2	1	1	0								
	4F			1				▨											1	0										
	5F					1		1	▨										2	2	1	0								
	6F				1	1	1			▨									3	3	2	1	0							
										▨								B ₁	1F	2F	3F	6F								
											▨							B ₂	4F		5F									
												▨						B ₃												
													▨																	
														▨																
															▨															
																▨														
																	▨													

GROUPEMENT EN PHASES	Pièce:	Feuille N° :
OPERATIONS		NIVEAUX
<i>B₁ B₂ B₃</i>		1
(1 <i>F</i>)	(4 <i>F</i>)	2
	(2 <i>F</i>)	3
	(3 <i>F</i> 5 <i>F</i>)	4
(6 <i>F</i>)		5
		6
		7
		8

PROJET DE GAMME :

Phase 10: contrôle du brut *B₁, B₂, B₃*

Phase 20: Fraisage *1F*

Phase 30: Tournage *2F, 3F, 4F, 5F*

Phase 40: Perçage *6F*

Phase 50: contrôle finale

PROJET DE GAMME :

FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE		Feuille N° :	
Pièce : support d'axe		Ensemble :	Matière : C42
Nombre de pièces : 100		S/Ensemble :	Brut : de fonderie
N°	Désignation des phases, sous phases, opérations	Machines et outillages	Croquis de la pièce à ses divers stades d'usinage
10	<u>Contrôle du Brut</u> Vérifier côtes et spécifications vérifié si le brut est capable d'obtenir le produit fini	Atelier contrôle Appareillage	D'après plans de fonderie
20	<u>Fraisage</u> 1 pièces au montage référentiel de départ défini par : Appui plan sur 3 en 3 N (1, 2, 3) Centrage cour sur 2 en 2N (4, 5) Appui ponctuel sur B1 en 1 N (6) 21 : surfacer en finition 1 Cm = $12^{\pm 0,1}$, Cm= 7min Rugosité 6,3	FV Montage F 20 Fraise à surf $\phi 50$ à plaquettes en CM Calibre $12^{\pm 0,1}$ montage de contrôle //	Position de travail
30	<u>Tournage</u> 1 pièces au montage référentiel de départ défini par : Centrage longsur B2 en 4 N (1, 2, 3, 4) Appui ponctuel sur B3 en 1 N (6) 31 : charioter en finition 2 et 3 Cm= $8^{\pm 1}$, Cm= $20^{\pm 0,1}$ 32 chanfreiner en finition 5 Ca= $2 \times 45^\circ$ Rugosité 6,3	Montage T 30 Out couteau à CM Out à dresser à CM Out coudé à 45° à CM CMD $20^{\pm 0,1}$, $8^{\pm 1}$ Calibre $2 \times 45^\circ$ Montage de coaxialité	

<p>40</p>	<p align="center"><u>Percage</u></p> <p>1 pièces au montage référentiel de départ défini par :</p> <p>Appui plan sur 1 en 3 N (1, 2, 3)</p> <p>Centrage cour sur 2 en 2 N (4, 5)</p> <p>Appui ponctuel sur 3 en 1 N (6)</p> <p>41 : Percer en finition 6 Co=$8^{\pm 0,5}$, Ca=20, Ca= $40^{\pm 0,2}$</p> <p>Rugosité 6,3</p>	<p>Montage P 40</p> <p>Foret en ARS</p> <p>$\Phi 8$</p> <p>TLD $8^{\pm 0,5}$</p> <p>Calibres 20, $40^{\pm 0,2}$</p>	
<p>50</p>	<p align="center"><u>Contrôle final</u></p> <p>51 Dimensions</p> <p>52 spécifications</p> <p>53 Etats de surfaces</p>	<p>Poste de contrôle</p>	

Références bibliographiques

- [1] R. Astier, J. Bresciani, R. Coste, L. Jourdan, P. Neveu, P. Perrone et G. Rey - Construction industrielle, Dunod, Paris, 1982.
- [2] C. Barlier et R. Bourgeois - Mémotech Productique. Conception et dessin, Casteilla, Paris, 1988.
- [3] C. Barlier et L. Girardin - Memotech Productique. Matériaux et usinage, Casteilla, Paris, 1986.
- [4] M. Bonte, R. Bourgeois et R. Gognet - Mémotech productique mécanique, Casteilla, Paris, 1997.
- [5] A. Chevalier - Guide du dessinateur industriel, 2004 éd., Hachette technique, Paris, 2004.
- [6] J. Karr - Gammes d'usinage et analyse de phases, Dunod, Paris, 1971.
- [7] M. Paoletti - Etudes de fabrication, Desforges, Paris, 1983.
- [8] M. Kamali Nedjid, F. Vignat and F. Villeneuve (2009), Simulation of the geometrical defects of manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 45, No. 7-8, pp. 631-648, [DOI: 10.1007/s00170-009-2001-3](https://doi.org/10.1007/s00170-009-2001-3)
- [9] ISO, ISO 5458:1998 (1998), Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing - Positional tolerancing
- [10] Abdelhakim, B., Pairel, E., Pillet, M., & Sergent, A. (2012). Utilisation du tolérancement géométrique pour le réglage des machine-outils: Le pilotage inertiel total. *Congrès Intercut-MUGV*.
- [11] DANTAN, J. Y., BURLAT, P., VILLENEUVE, F., GIRARDIN, F., PILLET, M., & PAIREL, E. *Pilotage des usinages tridimensionnels* (Doctoral dissertation, Université de Savoie), 2014.
- [12] Préparation de Production en Productique Mécanique
http://analyse-fabrication.univ-lille1.fr/co/001_MOG_web.html