III.1. Cote de fabrication : cote-outil, cote-machine et cote-appareillage

L'établissement d'un processus d'usinage impose la détermination, par choix raisonnable ou par 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.

III.1.1. Définition d'une cote fabriquée

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.

A noter que :

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

III.1.2. 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).

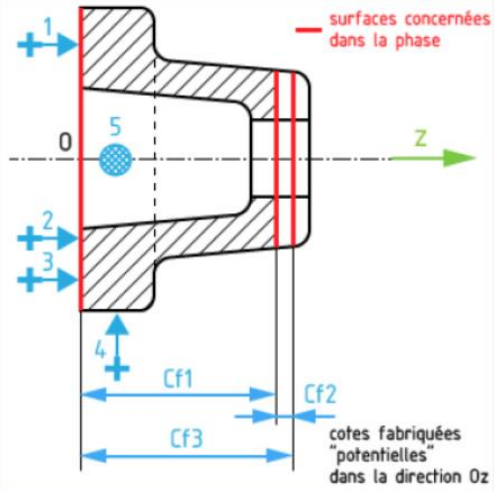


Figure III.1: Cotes fabriquées « potentielles » dans la direction OZ.

III.1.3. Règles de base à respecter

Le régleur ou l'opérateur ne doit 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.

III.1.4. 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 dites « cotes-machines » (Cm),
- Les cotes dites « cotes-appareillages » (Ca),
- Les cotes dites « Cotes-outils » (Co).

III.1.4.1. Cotes-machines (Cm)

Les cotes définissant **la forme** et **la position** des surfaces usinées, entre le référentiel 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.

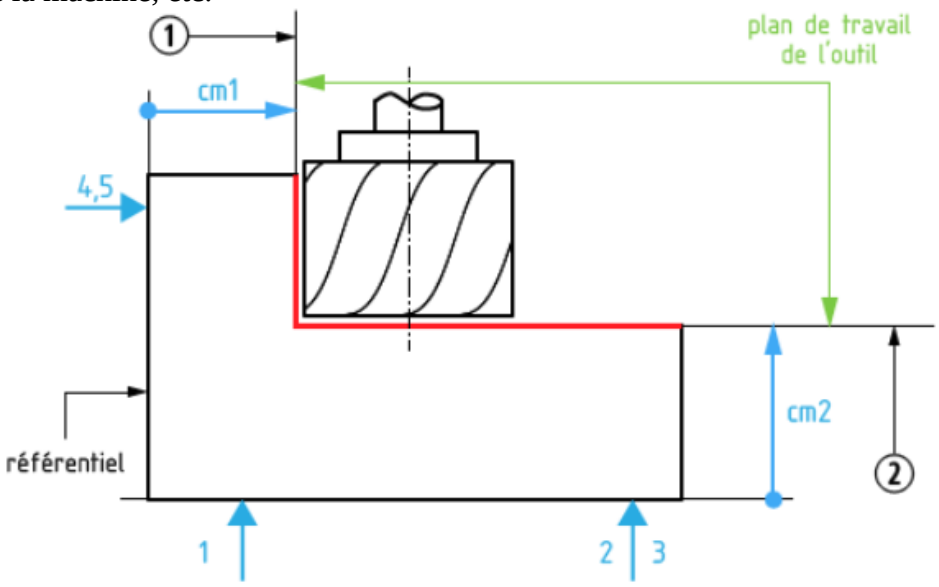


Figure III.2: Exemples de cotes - machines en fraisage.

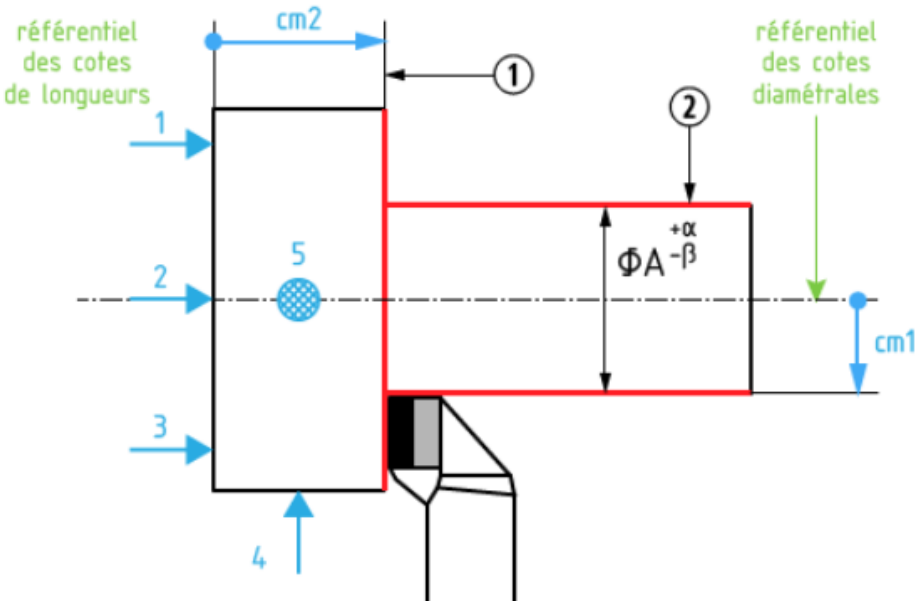


Figure III.3: Exemples de cotes - machines en tournage.

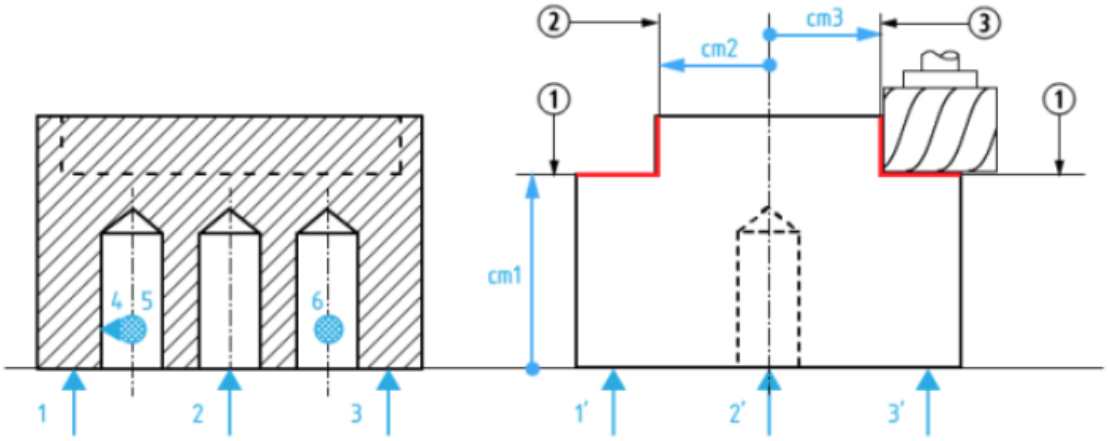


Figure III.4: Cotes machine.

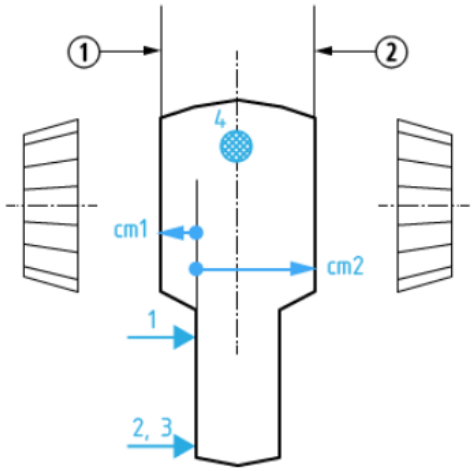


Figure III.5: Exemples de cotes-machine.

III.1.4.2. 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, plateaux tournants, dispositif de copiage, canons-guides des alésages, etc.
- Installation des cotes de fabrication : cas particulier. En tournage, lorsque l'on utilise un appareillage spécial pour des pièces de formes variées, on réalise une cote appareillage.

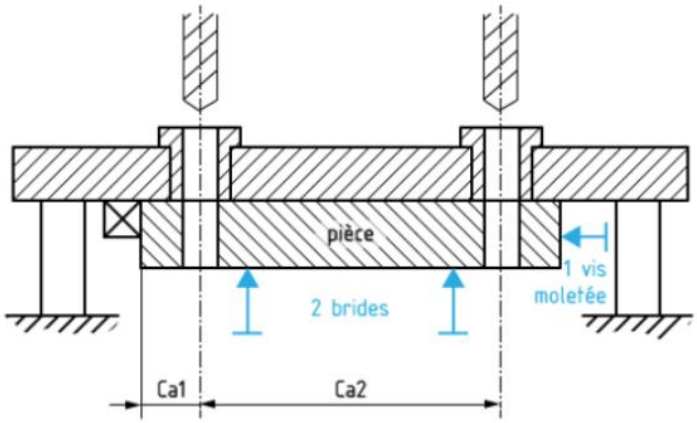


Figure III.6: Utilisation des canons de perçage pour obtenir des cotes appareillage.

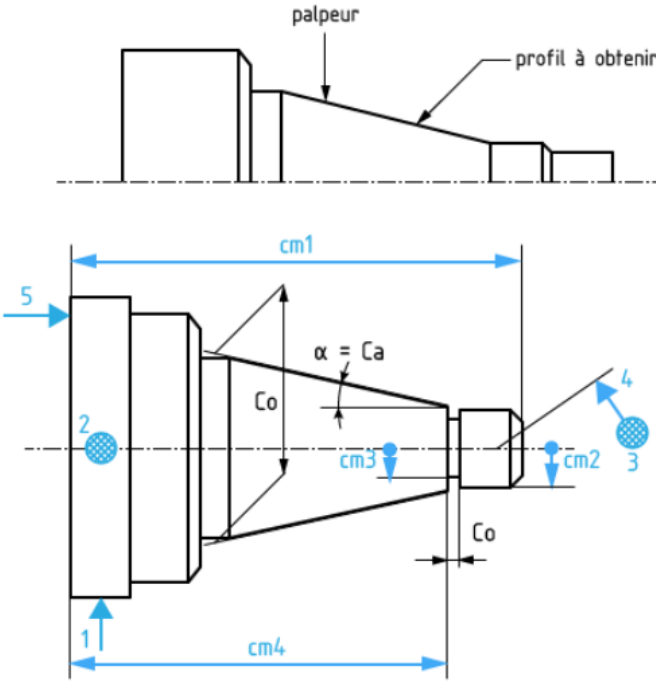


Figure III.7: Exemples des cotes-appareillages.

III.1.4.3. 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).

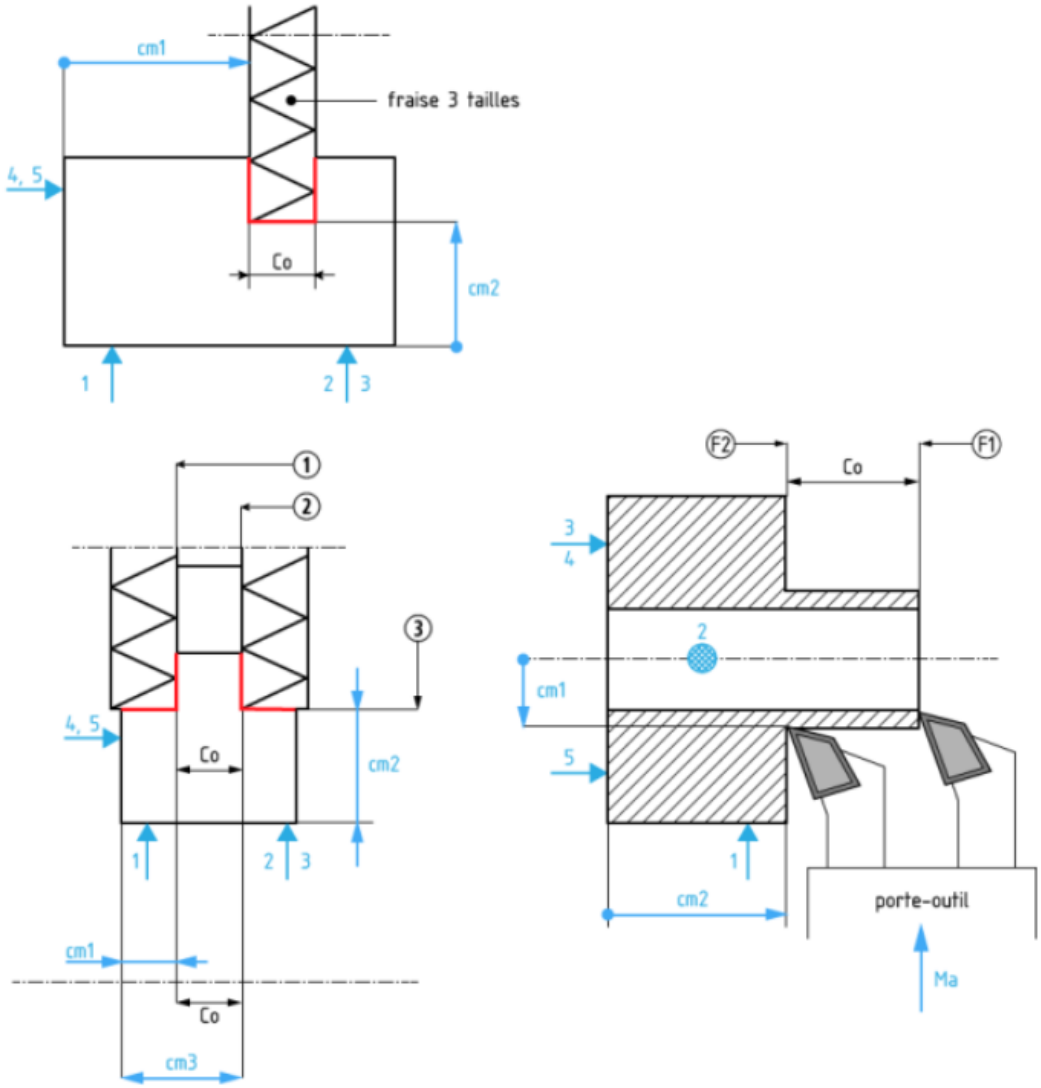


Figure III.8: Exemples de cotes-outils.

III.1.4.4. 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).

III.1.4.5. Conseils

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 :

a) Une cote outil (Co) est souvent préférable à une cote-machine (Cm). 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.

b) Une cote appareil (Ca)est souvent préférable à une cote-machine (Cm) 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.

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

III.2. Transfert de cote

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 ».

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

III.2.1. Définitions

III.2.1.1. 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.**

III.2.1.2. 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.**

III.2.1.3. Cotes-méthodes

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

- **Copeau-minimal** imposant 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 cotes.
- **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 III.1 et III.2 sont indiquées les valeurs usuelles des copeaux minimum Cpm, à choisir selon le type d'usinage et les divers matériaux à usiner.

III.2.1.4. 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.**

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

III.2.1.5. 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.

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

Tableau III.1: 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

Tableau III.2: Valeurs indicatives du copeau minimal pour différents matériaux.

Procédés d'usinage	Cote par rapport à une surface brute	Cote entre surfaces usinées		Cote de finition
		Ebauche	Semi-finition	
Fraisage	Varie de +/- 0.1 à +/- 1 selon la qualité et la correction géométrique de la surface brute	0.3 à 0.5	0.1 à 0.2	doit respecter le IT fixé par le dessin
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	

Tableau III.3: Valeurs indicatives des IT sur les côtes de fabrication.

Modes d'usinage	Ebauche	½ finition	Finition
Sciage Tournage Fraisage Rabotage	2	-	-
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

Tableau III.4: Valeurs usuelles des tolérances économiques.

III.2.2. Exemple de transfert de cotes

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

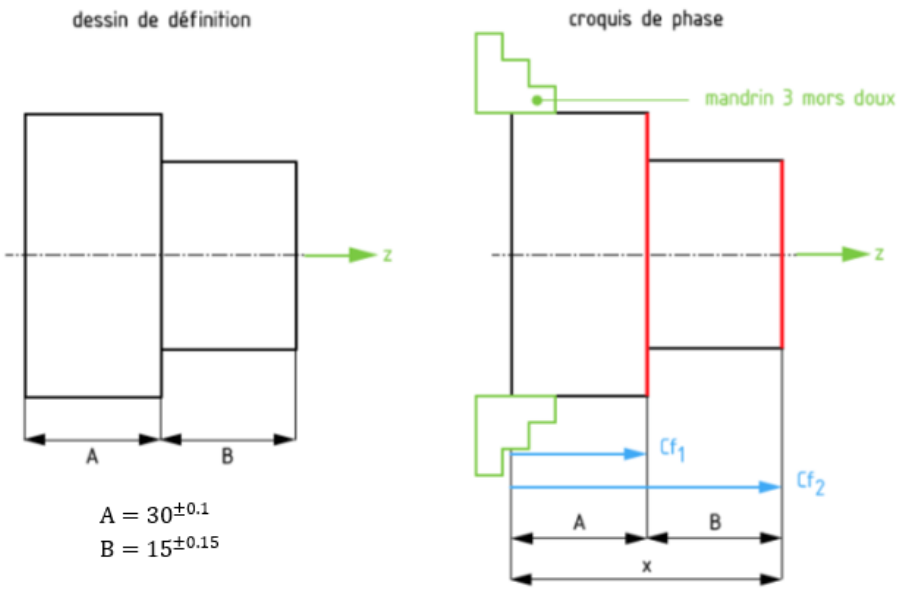


Figure III.9: Dessin de définition et croquis de phase.

- 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 :

$$ITB = ITX + ITA$$

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 cote condition= $\sum$ cotes intervenant dans le transfert (y compris la cote à calculer) .

Il en résulte que :

IT cote à calculer = IT cote condition - IT autres cotes intervenant dans le transfert.

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

- 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**.

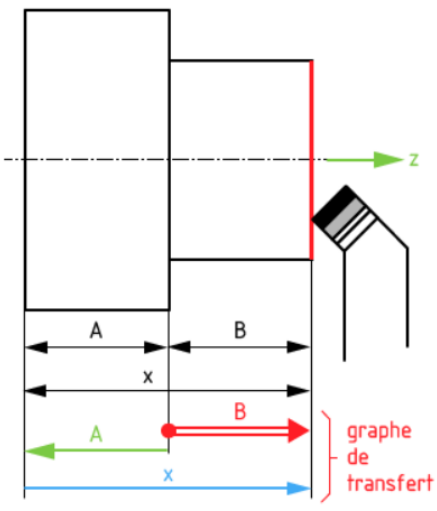


Figure III.10: La chaîne de transfert et le graphe de transfert.

III.2.3. Conventions adoptées pour tracer le graphe de transfert

1. La cote condition (à transférer) est la cote qui ne peut être réalisée directement.
2. 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.
3. Les lignes d'attache de cotes sont numérotées de 1 à n.
4. Il ne peut pas avoir plus d'une cote fabriquée Cf par chaîne de cotes.
5. La chaîne de cotes doit être la plus courte possible.
6. L'IT de la cote condition doit être supérieur ou égal à la somme des IT des cotes composantes.

   IT cote condition ≥ IT des cotes composantes
7. Les cotes de même sens que le vecteur cote condition sont maxi ou mini en même temps.
8. 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 :

$$B = X - A$$

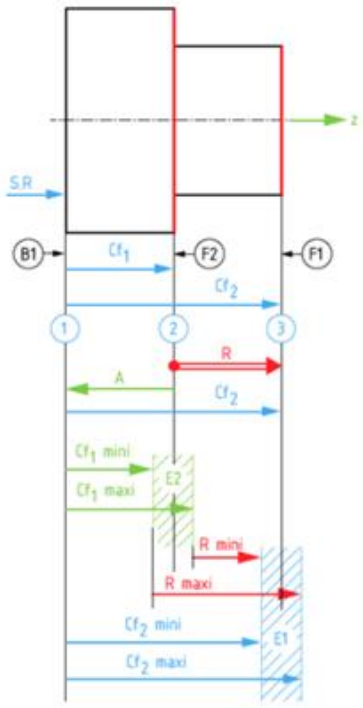


Figure III.11: La chaîne de transfert et le graphe de transfert.

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 Cf_{1mini} et Cf_{1maxi} à partir du plan associé à la surface brute B_1.

A partir de l'équation de la cote résultante $B = X - A$ (ou encore $R = \mathrm{Cf_2} - \mathrm{Cf_1}$), les conditions suivantes sont à respecter :

$$B_{maxi} = X_{maxi} - A_{mini} \quad \text{Ou bien} \quad R_{maxi} = \mathrm{Cf}_{2\,maxi} - \mathrm{Cf}_{1\,mini}$$
$$B_{mini} = X_{mini} - A_{maxi} \qquad\qquad R_{mini} = \mathrm{Cf}_{2\,mini} - \mathrm{Cf}_{1\,maxi}$$

Nous pouvons ainsi calculer numériquement les bornes de la cote fabriquée $\mathrm{Cf_2}$.

III.2.4. 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 :

IT cote à calculer = IT cote condition - $\sum$ 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 cotes-limites soit en appliquant la méthode des cotes-moyennes.

III.2.4.1. 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 III.10) ; ensuite, l'équation de la cote condition **B = X – A** est développée en interprétant les sens des vecteurs lus sur le graphe.

$$B_{maxi} = X_{maxi} - A_{mini} \qquad B_{mini} = X_{mini} - A_{maxi}$$
$$X_{maxi} = B_{maxi} + A_{mini} \qquad X_{mini} = B_{mini} + A_{maxi}$$
$$X_{maxi} = 15{,}15 + 29{,}9 \qquad X_{mini} = 14{,}85 + 30.1$$

$X_{maxi} = 45.05$ $X_{mini} = 44{,}95$

- **Simplification** : Exploitation d'un tableau (placé en regard de la chaîne ; à voir au TP) qui permet de regrouper les calculs sous un faible volume, en réduisant les risques d'erreurs.
- **Conventions adoptées**
  - Si la cote condition est minimale, les composantes de même sens sont minimales et les cotes composantes de sens opposé sont maximales.
  - La valeur de la cote condition minimale doit être inscrite dans la même colonne que les cotes composantes maximales.
  - 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).

III.2.4.2. 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 :

$A = 30^{\pm 0,1}$

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

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

=> $X = 30 + 14{,}85 = 44{,}85$.

c) On calcule l'IT de **X** en appliquant la relation fondamentale soit :

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

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

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

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

III.2.4.3. 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. A savoir que le préparateur n'a pas le droit d'augmenter la valeur de l'IT d'une cote fonctionnelle, mais il peut la réduire.

III.3. Transfert de tolérances d'orientation

Dans la mesure où les tolérances de forme sont bien inférieures, ce qui est de règle, les tolérances d'orientation peuvent se traiter comme des tolérances angulaires.

III.3.1. Réalisation directe

La Figure III.12 illustre le fraisage associé de deux faces F1 et F2 à l'aide d'une fraise à deux tailles. Dans ce cas, la perpendicularité des deux faces est tout simplement une cote d'outil :

$U_0 =$ | ⊥ | 0,05 | .

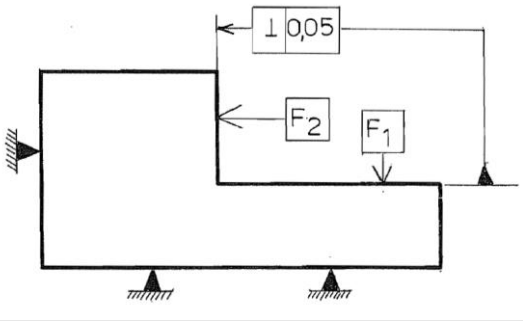


Figure III.12: Fraisage associé de deux faces F1 et F2.

III.3.2. Transfert d'une tolérance de parallélisme

Afin de réaliser l'angle entre les faces F1 et F2 de la Figure III.13, on procède comme suit :

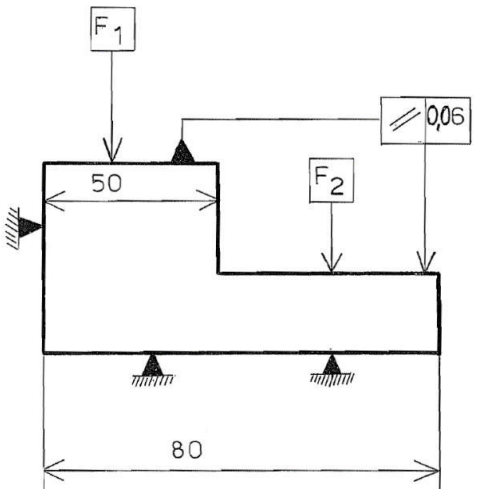


Figure III.13: Fraisage des deux faces parallèles F1 et F2.

a) Dans une première étape (Figure III.14), on réalise la face F1, d'une longueur de 80 mm. Cette face fait avec la référence un angle α_1 régi par une tolérance de parallélisme $\boxed{F_1| \parallel |U_1| \text{ réf}}$.

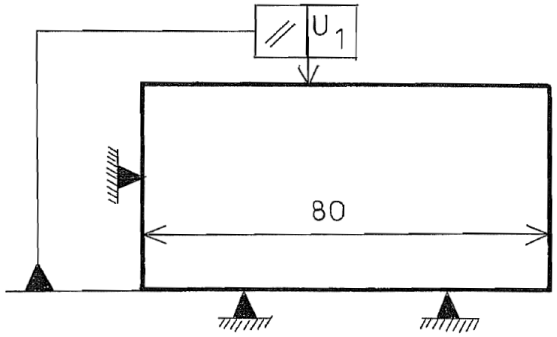


Figure III.14: Fraisage de la face F1 (1ère étape).

Ce qui signifie que $\alpha_1 = 0^{\pm\Delta\alpha_1}$

avec

$$\Delta\alpha_1 = \frac{U_1}{80}$$

b) Dans une deuxième étape (Figure III.15), on réalise la face F2, qui fait avec la même référence un angle α_2 régi par une tolérance de parallélisme $\boxed{F_2| \parallel |U_2| \text{ réf}}$.

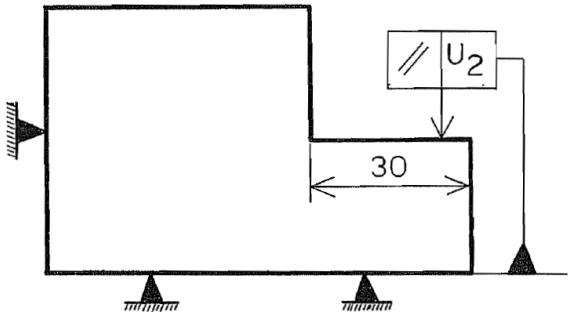


Figure III.15: Fraisage de la face F2 (2ème étape).

ce qui signifie que $\alpha_2 = 0^{\pm\Delta\alpha_2}$

$$\Delta\alpha_2 = \frac{U_2}{30}$$

Comme le montre la Figure III.16, l'angle α_{12} entre les deux faces est donné par

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2$$

ce qui implique, vu l'indétermination des sens des deux angles du second membre,

$$\Delta\alpha_{12} = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2$$

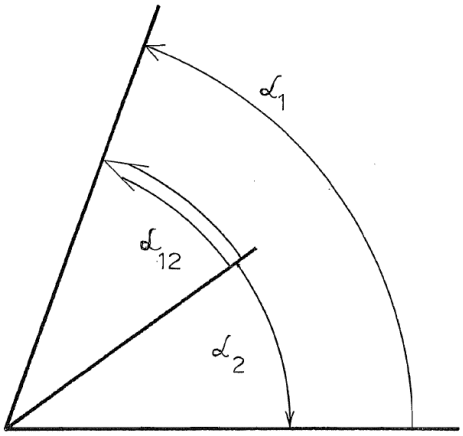


Figure III.16: Transfert d'une tolérance de parallélisme.

avec ici,

$$\Delta\alpha_{12} = \frac{F_2| \parallel |F_1|}{30} = \frac{0{,}06}{30} = 0{,}002$$

Comme la difficulté de réalisation des deux faces est comparable, il est naturel de poser

$$\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 = \Delta^*$$

Ce qui mène à la condition

$$\Delta^* = \frac{1}{2}\Delta\alpha_{12} = \frac{1}{2}.0{,}002 = 0{,}001$$

Finalement,

$$U_1 = \Delta^*.80\ mm = 0{,}08\ mm$$

$$U_2 = \Delta^*.30\ mm = 0{,}03\ mm$$

III.3.3. Transfert d'une tolérance de perpendicularité

Continuant la fabrication de la pièce précédente, il faut à présent faire un trou, avec une condition de perpendicularité par rapport à F2 (Figure III.17). Cette condition sera à nouveau transférée en une tolérance de perpendicularité U3 avec la référence (Figure III.18). La condition imposée est $\boxed{axe_3| \perp |0{,}1|F_2}$ ce qui signifie que l'angle α_{23} doit vérifier

$$\alpha_{23} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\pm\Delta\alpha_{23}}$$

Avec

$$\Delta\alpha_{23} = \frac{0{,}1}{20} = 0{,}005$$

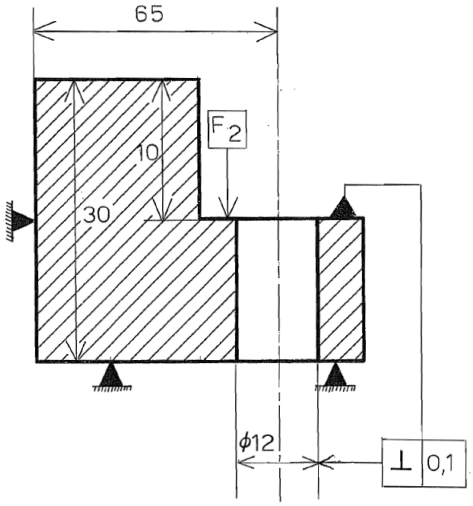


Figure III.17: Réalisation du trou avec une condition de perpendicularité par rapport à F2.

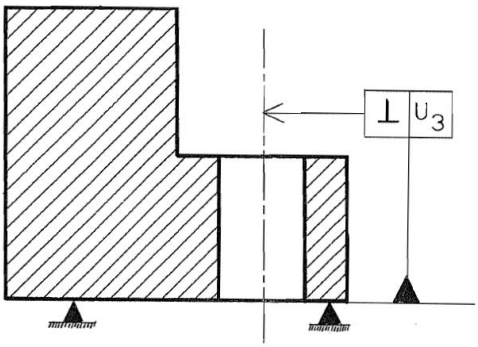


Figure III.18: Transfert en une tolérance de perpendicularité U3 avec la référence.

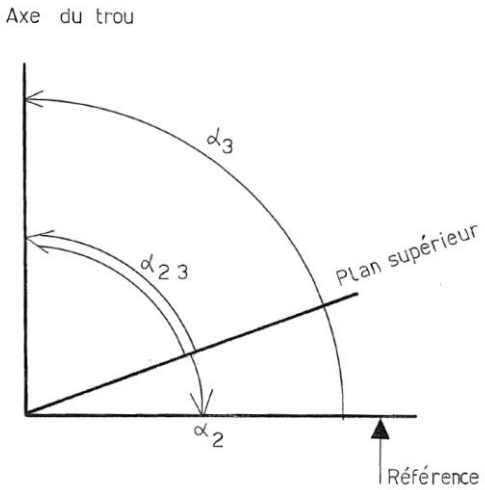


Figure III.19: Transfert d'une tolérance de perpendicularité.

Puisque la longueur du trou est de 20 mm. La Figure III.19 montre que si α_3 est l'angle entre la face de référence et l'axe du trou, on a la relation

$$\alpha_{23} = \alpha_3 - \alpha_2$$

Si bien que :

$$\Delta\alpha_{23} = \Delta\alpha_3 + \Delta\alpha_2$$

En se rappelant que l'on avait ci-dessus $\Delta\alpha_2 = 0{,}001$, on obtient donc

$$\Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_{23} - \Delta\alpha_2 = 0{,}005 - 0{,}001 = 0{,}004$$

et, par conséquent,

$$U_3 = 0{,}004.20\ mm = 0{,}08\ mm$$

Là encore, si le transfert avait été impossible (U_3 trop petit ou même négatif), il aurait fallu resserrer U_2 ou revoir les spécifications avec le bureau d'études.