

Conception des gammes d'usinage

par **Roland D. WEILL**
*Ingénieur de l'École Polytechnique et de l'École Nationale Supérieure de l'Armement
Professeur Émérite de Génie Mécanique à l'Institut Israélien de Technologie à Haïfa (Israël)*

1.	Fonction production mécanique.....	B 7 025 - 2
2.	Conception générale d'une gamme d'usinage	— 3
3.	Interprétation du dessin de définition	— 9
4.	Description succincte des procédés et des moyens de production.....	— 9
5.	Compléments à la préparation de la gamme d'usinage.....	— 10
6.	Positionnement et montages d'usinage.....	— 15
7.	Analyse des cotes et des tolérances de fabrication	— 16
8.	Éléments de métrologie industrielle et de contrôle statistique en fabrication.....	— 19
9.	Conclusion	— 21
	Pour en savoir plus.....	Doc. B 7 025

En ce qui concerne les symboles et les notations utilisés sur les figures, le lecteur se reportera, dans ce traité, aux articles :
— **Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface** [B 7 010] ;
— **Cotation fonctionnelle** [BM 7 020].

Toutes les cotes données sur les figures sont en millimètres, sauf contre-indications.

1. Fonction production mécanique

La fonction **production mécanique** représente dans le cadre de l'industrie manufacturière un élément majeur qui conditionne le niveau des performances économiques de l'entreprise. On peut schématiquement décrire la structure d'une entreprise industrielle par l'organigramme ci-après (figure 1) où l'on retrouve les principales fonctions contribuant au fonctionnement d'un ensemble industriel :

- la **direction générale** chargée des plannings à long terme, des politiques financières, du personnel, du marketing, etc. ;
- le **bureau d'études BE** chargé des conceptions de produits nouveaux et des projets détaillés ;
- la **gestion de fabrication générale** comprenant la gestion de production (ordonnancement), la maintenance, la gestion des stocks et des en-cours, et la préparation des fabrications ou bureau des méthodes ;
- le **bureau des méthodes BM** qui choisit les techniques de production mécanique, comprenant les techniques de mise en forme, les techniques d'assemblage, le contrôle de qualité, les techniques de manutention et de transport, et la finition.

La **préparation des fabrications (ou bureau des méthodes)** se situe donc entre la fonction de conception (bureau d'études) et la

fonction de production. Elle a pour but de définir les moyens de production (machines, outillages, procédés) qui permettront de réaliser les produits conçus au bureau d'études. Il est clair que cette fonction charnière conditionne toute l'économie de la production dans l'entreprise. L'établissement des gammes de fabrication nécessite une excellente connaissance de toutes les techniques de production à mettre en œuvre et fait de plus en plus appel au traitement informatique des données pour soulager la tâche du préparateur.

Une étude plus fine du processus d'industrialisation est présentée dans le tableau 1, reprise dans une instruction concernant l'enseignement de l'étude de fabrication [1]. Elle détaille notamment les différentes étapes menant du projet de définition du produit jusqu'à son exécution en production de série. On y retrouve les fonctions de choix des techniques de production avec une estimation économique, les calculs des cotes de fabrication aussi bien en usinage qu'en élaboration du brut, les dessins des outillages et, finalement, les fiches de réglage sur site.

Pour mieux faire saisir la logique d'établissement d'une gamme d'usinage, décrivons maintenant sur un exemple la suite des étapes de conception d'une **gamme d'usinage** en insistant sur les aspects qui auront le plus d'importance dans le projet final de fabrication. Il va de soi que la gamme d'usinage s'applique essentiellement à une ébauche obtenue par les techniques d'élaboration du brut (§ 4).

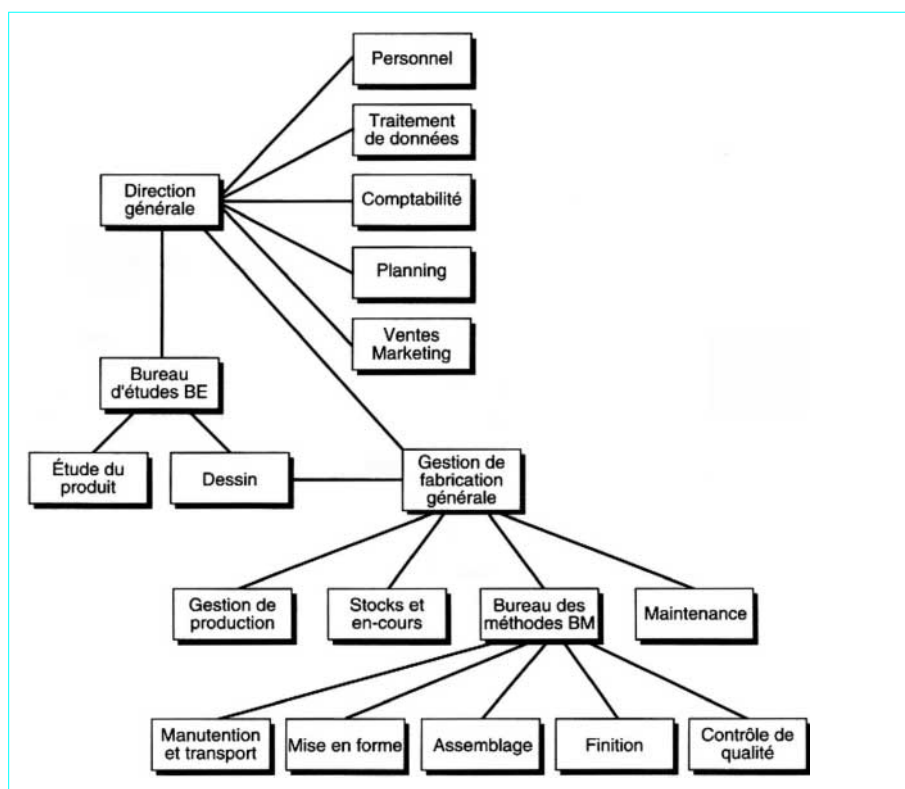
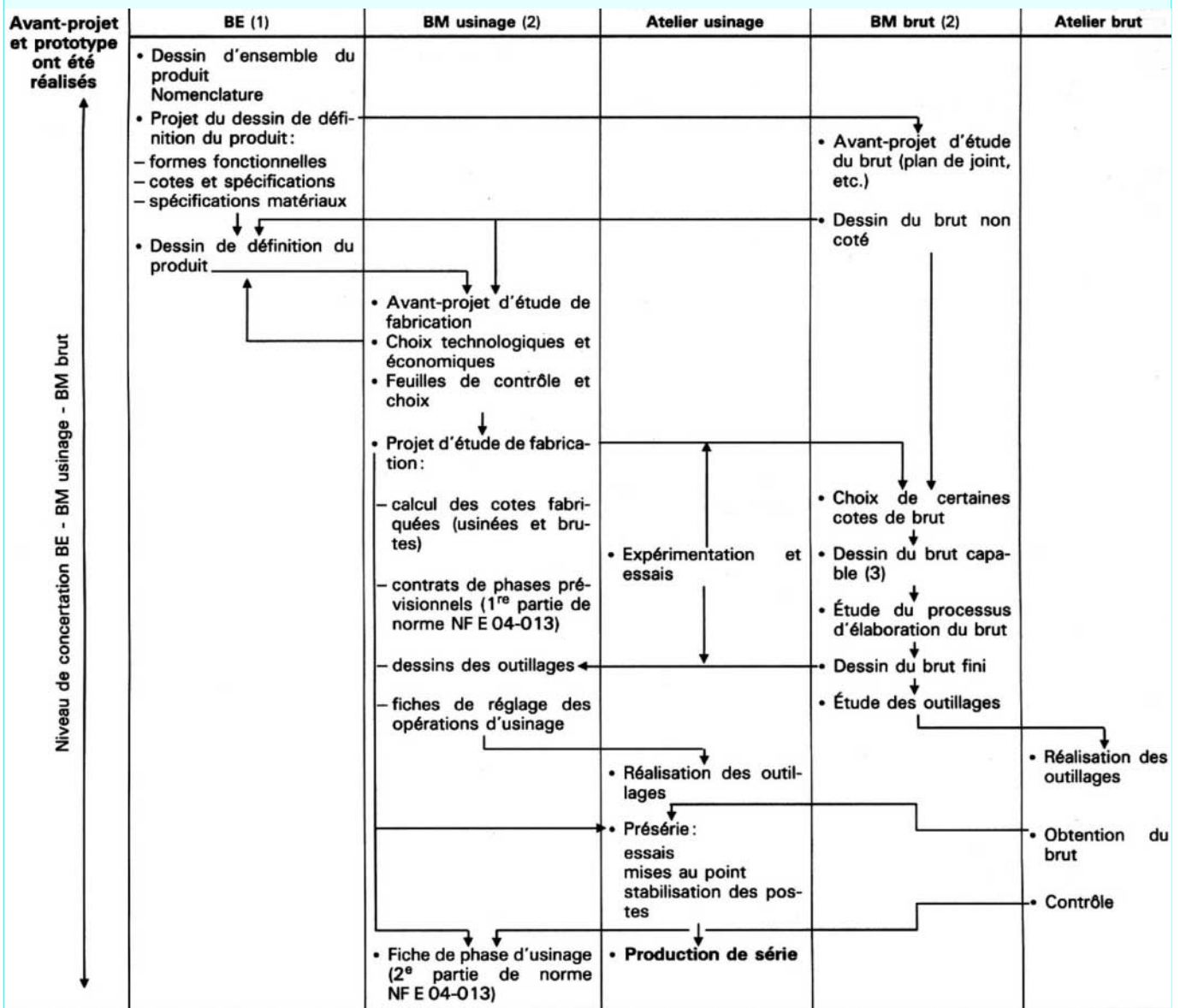


Figure 1 – Structure générale d'une entreprise de l'industrie manufacturière

Tableau 1 – Organigramme du processus d'industrialisation [1]



(1) BE bureau d'études

(2) BM bureau des méthodes

(3) brut capable de contenir la pièce finale.

2. Conception générale d'une gamme d'usinage

Avant de passer à l'analyse logique d'un processus de gamme sur l'exemple d'une pièce mécanique typique, il est utile d'énumérer brièvement la suite des actions à entreprendre pour constituer un dossier de fabrication. La figure 2 [2] donne le graphe des principales opérations à considérer.

— À partir d'un dessin de définition donnant toutes les conditions à respecter (tolérances, quantité, matières premières, etc.), on peut choisir les types d'opérations et les outils convenant aux différentes entités d'usinage (alésages, surface plane, filetage, etc.) et respectant les contraintes imposées.

— En fonction des quantités de pièces à produire et des contraintes technologiques, on peut ensuite choisir un ensemble de machines-outils pouvant convenir aux opérations à exécuter.

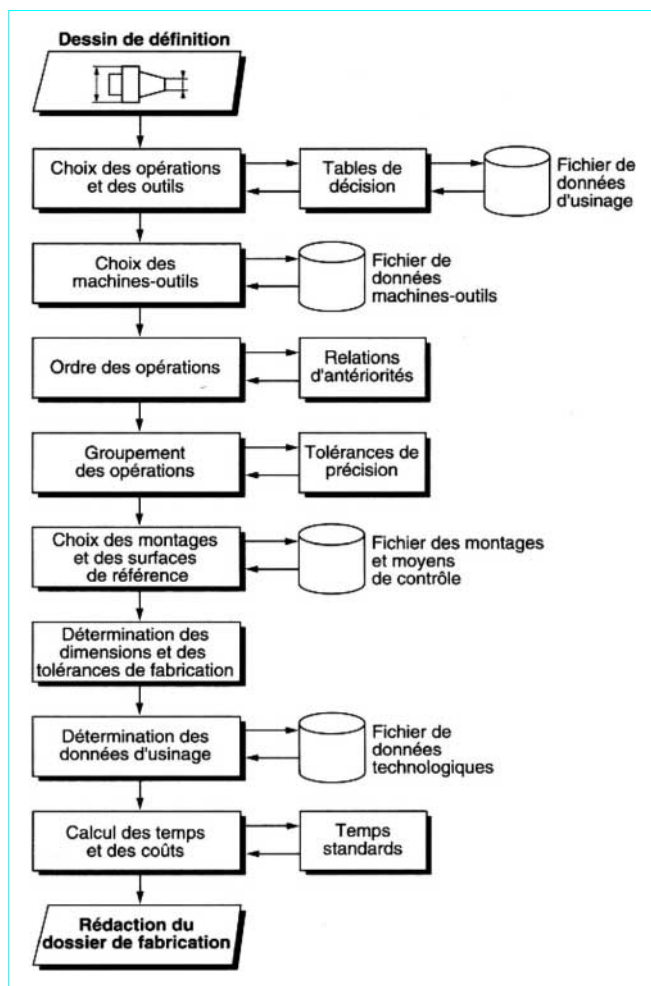


Figure 2 – Étapes du plan de fabrication [2]

— Tenant compte ensuite des tolérances de précision, il est nécessaire d'ordonner les opérations individuelles suivant une séquence bien définie.

— Pour optimiser les temps d'usinage et respecter les tolérances de position (positions relatives des entités de la pièce), on groupe ensuite les opérations de façon optimale.

— On examine les possibilités de mise en position des pièces sur les montages, ainsi que leur bridage pour assurer leur stabilité sous l'effet des forces actives pendant l'usinage (effort de coupe notamment).

— Les différentes dimensions sur la pièce n'étant pas obligatoirement réalisées en cote directe, on doit procéder à un transfert de dimensions et de tolérances en cotes de fabrication satisfaisant aux conditions fonctionnelles et aux conditions de réglage sur site, notamment en fonction des capacités techniques des machines-outils.

— Des contrôles en cours de fabrication (*in-process*) ou, éventuellement, après finition de la pièce, doivent aussi être ajoutés dans le plan de fabrication.

— Il est nécessaire ensuite que, pour chaque phase d'usinage, les conditions de travail (vitesse, avance, profondeur de passe) soient précisées et, de là, un calcul des temps et des coûts des opérations est possible en vue d'arriver à une appréciation économique.

— Enfin, un dossier de fabrication doit être rédigé suivant les données précédentes pour être passé aux services de fabrication pour exécution.

Cette énumération des principales opérations à exécuter montre bien la complexité d'un plan de fabrication du point de vue des informations à y intégrer et tend à démontrer que la **possibilité d'un traitement complètement automatique d'une gamme d'usinage (Computer Aided Process Planning, CAPP) paraît ressortir actuellement de l'utopie.**

Pour illustrer plus concrètement la démarche en vue de choisir une gamme d'usinage, analysons maintenant la séquence des choix à définir pour la réalisation d'une pièce mécanique telle que celle représentée sur la figure 3 [3]. Auparavant, précisons que par **opération** on entend un processus élémentaire d'usinage (tel qu'un dressage de face), par **phase** un ensemble d'opérations exécutées sur une unité d'usinage bien définie (machine-outil, centre d'usinage) et par **sous-phase**, on entend une partie de phase exécutée avec le même montage.

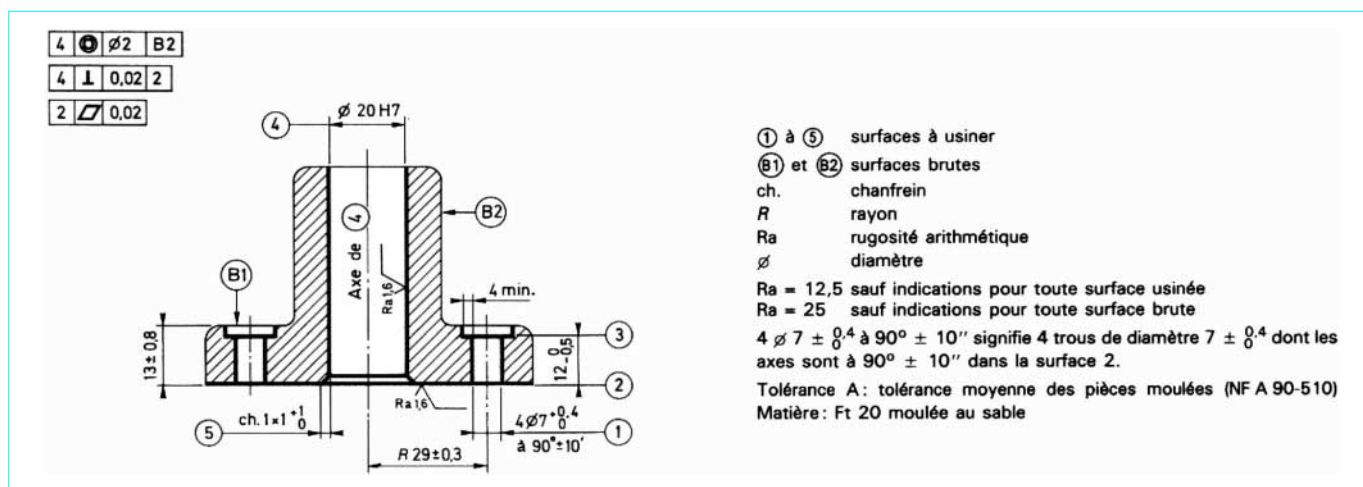


Figure 3 – Exemple de pièce mécanique avec son dessin de définition [3]

Comme indiqué dans la figure 3, le dessin de définition de la pièce donne les informations concernant les dimensions et tolérances dimensionnelles, les rugosités de surface, les tolérances géométriques, la nature de la matière à usiner, les dimensions approximatives du brut. Compte tenu de ces informations, ainsi que des renseignements sur les moyens de production disponibles dans l'entreprise ou, éventuellement, sur le marché, on peut, pour chaque spécification d'entité d'usinage, faire un **choix de possibilités technologiques de mise en forme**. Le tableau 2 donne les détails des opérations pour chaque entité de la pièce avec le nombre de passes d'usinage, ainsi que les types d'outils à utiliser de préférence. Ce choix n'est pas à considérer comme absolument définitif et peut être remis en cause en fonction des exigences apparaissant dans les étapes ultérieures d'établissement de la gamme. Par exemple, la réalisation de la surface plane ② peut être obtenue par fraisage ou par tournage avec une passe de finition exigée par les conditions de tolérances et d'état de surface. Une même logique peut être appliquée à toutes les surfaces en se basant sur des banques de données technologiques [4] qui donnent les limites de performances des procédés d'usinage usuels permettant de garantir l'obtention d'une qualité de réalisation satisfaisante.

À ce stade de la gamme, chaque entité d'usinage est considérée séparément, ce qui ne tient pas compte des relations de position et d'orientation entre éléments d'usinage. Par exemple, la perpendicularité de 0,02 entre les surfaces ② et ④ exige un usinage dans un même montage pour assurer la précision, c'est-à-dire un groupement de surfaces (appelées aussi surfaces associées) dans une même sous-phase. On est amené, en plus, pour des raisons d'économie à associer d'autres surfaces au groupe précédent en dehors de raisons géométriques. Par exemple, il est judicieux d'associer la surface ⑤ aux surfaces ② et ④ de manière à former une sous-phase unique qui permet une économie de temps et de coût. Ces opérations de regroupement vont conditionner les choix des machines-outils.

Les critères généraux pour la **sélection des machines-outils** sont de trois ordres :

- le nombre d'outils choisis pour exécuter les opérations individuelles comme indiqué dans le tableau 2 ;
- l'importance du nombre de pièces, en relation avec le temps de préparation de l'unité de production ;
- la précision d'usinage.

En principe, on dispose d'un fichier de données sur les machines-outils qui permet l'association optimale machine-opération. Ainsi, dans le groupe d'usinage des surfaces ②-④-⑤, il est préférable de choisir un tour au lieu d'une aléseuse, car le nombre d'outils étant élevé, les réglages sont plus simples en tournage qu'en alésage. Le type particulier de tour dépend de l'importance du lot de pièces, soit un tour à butées réglables, soit un tour revolver, etc. De même, le groupe ①-③ peut être usiné par des machines à percer de types différents : perceuse sensitive, perceuse à tête revolver, perceuse à tête multibroches, perceuses en ligne, etc. Le choix dépend de considérations économiques et du savoir-faire du préparateur. Des aides informatiques sont actuellement à sa disposition pour la détermination des temps et des coûts par exemple et, de plus en plus, pour l'aider à faire des choix raisonnés en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle ou d'un système d'experts [9].

Après avoir choisi les opérations à effectuer, il faut les **ordonner** en tenant compte d'antériorités technologiques et économiques (figure 4) et, plus particulièrement, d'exigences de tolérances. Le tableau 3 donne les antériorités correspondant à la pièce de la figure 3. Elles ont été classées suivant des critères techniques (dimensionnels, géométriques, technologiques) et économiques. Par exemple, pour la surface 4F (finition de ④), les antériorités viennent des surfaces 2F et B2 pour des raisons géométriques, de la surface 4 1/2 F (semi-finition de ④) pour des raisons technologiques, de la surface 2F pour protéger l'outil d'alésage ultérieur (critère économique) et de la surface 5F pour éviter les bavures provenant du chanfrein de l'alésage de ④ (critère économique). En représentant les priorités dans une matrice (figure 5), on détermine l'ordre d'exécution des opérations tenant compte des antériorités. Il suffit de compter dans chaque ligne de la matrice le nombre d'antériorités pour la surface en question et, après exécution de ces antériorités dans l'ordre, usiner la surface considérée au niveau où elle n'exige plus d'antériorités. On trouve ainsi que la surface 4F ne peut être exécutée qu'au rang 6 alors qu'aux rangs précédents, il restait des antériorités au nombre de 3, 3, 2, 2 et 1. Ce choix des ordres de priorités peut être rendu aisément automatique en calculateur. Il n'en est toutefois pas de même pour la définition des antériorités elles-mêmes qui demande une réflexion s'appuyant sur une bonne connaissance des techniques d'usinage de la part du *gammiste*.

Tableau 2 – Opérations élémentaires d'usinage de la pièce de la figure 3 [3]

Surface à usiner	Spécifications BE	Outils prévus			Nombre d'outils
		Écroûtage	1/2 Finition	Finition	
①	$\varnothing 7^{+0,4}_0$; Ra 12,5 R 29 ± 0,3			foret	1
②	13 ± 0,8 ; Ra 1,6 planéité 0,02	éventuellement fraise ou outil à dresser		fraise ou outil à dresser	1 ou 2
③	12 $^{0}_{-0,5}$; Ra 12,5 4 min.			fraise à lamer ou foret étagé	1
④	$\varnothing 20H7$ - Ra 1,6 coaxialité $\varnothing 2$ perpendicularité 0,02	cas avec noyau de fonderie			3
		outil-grain	outil-grain (1)	alésoir	
		foret	cas sans noyau outil-grain (1)	alésoir	
⑤	chanfrein $1 \times 1^{+1}_0$			outil à chanfrein ou à aléser	1

Ra rugosité arithmétique.

\varnothing diamètre.

(1) L'avant-trou existe après écroûtage par un foret.

Tableau 3 – Antériorités des opérations à effectuer pour la pièce de la figure 3 [2]				
Opérations	Antériorités			
	Dimensionnelle	Géométrique	Technologique	Économique
1F	4F	2F (perpendicularité)	4F (mise en position montage)	
2R				4 1/2 F (économie de l'usinage) (1)
2F	B1		2R	
3F	2F	1F (centrage de 3F dans 1F)		
4R				
4 1/2 F			4R	
4F		B2 (coaxialité) 2F (perpendicularité)	4 1/2 F	2F (protection de l'outil, figure 4c) 5F (pas de bavures en 4)
5F	2F			4 1/2 F (économie d'usinage)

(1) Pas d'usinage du centre déjà percé.
F finition, 1/2 F demi-finition, R ébauche.

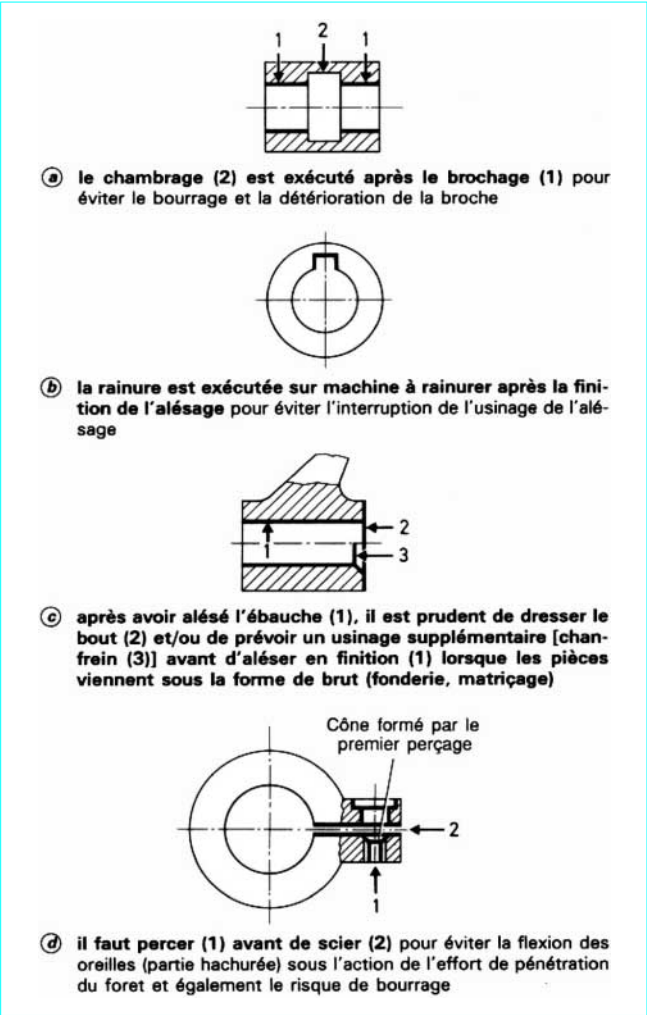


Figure 4 – Exemples d'antériorités économiques (a et c) et d'antériorités technologiques (b et d) [5]

Une fois l'ordre des opérations déterminé, on revient aux **regroupements** nécessités par le respect des positions relatives des entités d'usinage. Par exemple, les surfaces 2-4-5 pourront être regroupées, comme déjà indiqué, en une seule phase à exécuter sur une machine de tournage. Le choix des regroupements est à l'initiative du préparateur qui devra tenir compte des machines disponibles et de facteurs économiques.

Pour exécuter les opérations retenues, il faut enfin choisir un **système de positionnement de la pièce dans la machine** qui soit optimal du point de vue du respect des tolérances dimensionnelles et de la stabilité du bridage contre l'action des forces extérieures. Les surfaces de référence (surfaces d'appui servant d'origine à la cotation) doivent être choisies dans un ordre qui garantisse au mieux la précision de la pièce. C'est ainsi qu'il est plus judicieux de réaliser d'abord les surfaces les plus critiques du point de vue des tolérances pour ne pas additionner des tolérances provenant d'opérations précédentes. À titre d'exemple, pour la pièce de la figure 3, on usine d'abord les surfaces ② et ④ qui exigent le plus de précision puis, dans une deuxième phase, les surfaces ① et ③. En plus, pour respecter le principe de l'isostatisme (figure 6) c'est-à-dire le positionnement d'une pièce sans ambiguïté dans l'espace (en 6 points d'appui généralement), on place 3 points (1, 2, 3) sur la surface (B1) et 2 points (4 et 5) sur la surface (B2) parce que les tolérances de position entre les surfaces ② et (B1) sont plus sévères qu'entre les surfaces ④ et (B2) :

- en translation : 1,6 mm (2 × 0,8) comparé à 2 mm (coaxialité) ;
- en rotation : 1,6/80 = 0,02 comparé à 2/38 = 0,053.

Le point de contact 6 est un point de blocage qui n'intervient pas dans le positionnement.

En fait, pour l'instant, le choix du système de positionnement reste encore très empirique malgré le développement d'algorithmes permettant une optimisation partielle de la localisation des points d'appui [6].

Le choix des surfaces de référence conditionne la détermination des cotes de fabrication qui ne sont pas nécessairement identiques aux cotes fonctionnelles du dessin de définition (§ 7) pour des raisons techniques et économiques. Le calcul et l'optimisation de ces cotes, tenant compte des tolérances imposées et des capacités des moyens de production, ont donné lieu au développement de nombreux algorithmes qui permettent une **détermination automatique des dimensions et des tolérances de fabrication** [7].

Les résultats de toutes les décisions précédentes n'étant pas nécessairement fiables, on doit aussi prévoir dans un plan de fabrication des **moyens de contrôle appropriés**. En plus des instruments de vérification traditionnels, il y a maintenant un

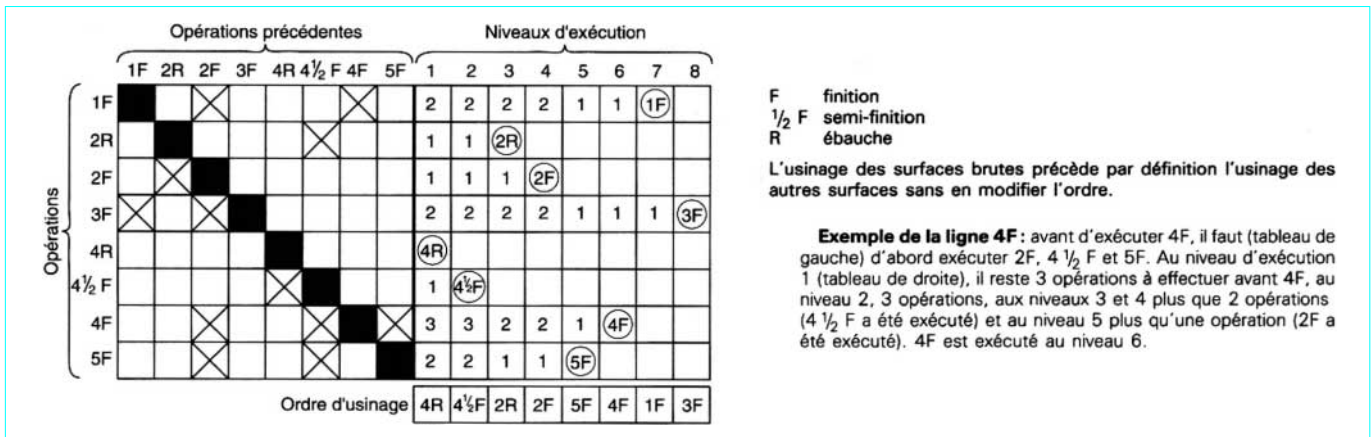


Figure 5 – Méthode matricielle d'établissement de l'ordre d'usinage [2]

Surface à usiner	Liaison au brut à obtenir (1)	Surface de contact	Degrés de liberté (2)	Intervalle de tolérance IT ou tangente de rotation maximale TRM (3)	Nombre de contacts possibles	Degrés de liberté empêchés	Liaison
②	13 ± 0,8	ⓑ1	Tz Ry Rx	IT = 1,6 TRM = 1,6/80 = 0,02 TRM = 1,6/80 = 0,02	3	3 { Tz Ry Rx	Appui plan sur ⓑ1
④	Coaxialité ∅ 2	ⓑ2	Tx Ty Rx Ry	IT = 2 IT = 2 TRM = 2/38 = 0,053 TRM = 2/38 = 0,053	4	2 { Tx Ty	Centrage court sur ⓑ2

Tx, Ty et Tz translations suivant x, y et z.

Rx, Ry et Rz rotations suivant l'axe des x, y et z

(1) distances aux surfaces brutes ⓑ1 et ⓑ2.

(2) Les traits de liaison indiquent la redondance dans les contraintes de position.

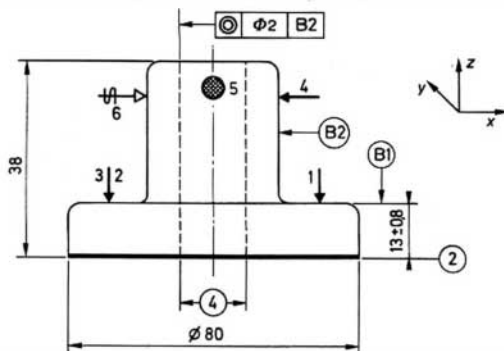
(3) Pour une surface considérée TRM = IT/L_{max} avec L_{max} longueur maximale de la surface considérée.

Figure 6 – Mise en position de la pièce mécanique de la figure 3 de façon isostatique [2] (pour les symboles de mise en position, se reporter à la figure 14)

développement très intensif de machines à mesurer tridimensionnelles informatisées qui sont susceptibles d'évaluer toutes les caractéristiques dimensionnelles d'une pièce mécanique à partir d'une seule et unique mise en position. On obtient ainsi directement un contrôle des cotes fonctionnelles.

Enfin, au niveau de chaque opération et de chaque sous-phase, la gamme doit prévoir la définition des conditions d'usinage (avance, vitesse, profondeur de passe, types d'outil) qui conviennent le mieux. Dans ce domaine, il existe aussi des algorithmes permettant

d'optimiser les conditions d'usinage en vue de réaliser un coût minimal ou un temps minimal. Les banques de données technologiques délivrent les valeurs des paramètres qui optimisent les opérations d'usinage [4] [10].

Une fois les conditions technologiques déterminées, il est aisé de calculer par phase et pour la gamme entière les **temps et coûts de fabrication**. Des programmes rapides ont été développés à cet usage qui sont très performants.

De même, la mise en page et la rédaction du **dossier de fabrication** peuvent maintenant être exécutées sur ordinateur et se prêtent à des corrections de détail très souples. À titre d'exemple, la figure 7 montre un extrait d'une description de phase pour l'usinage d'une pièce comportant l'indication des opérations, cotes de fabrication,

machine-outil, positionnement, bridage, outillage, contrôles nécessaires. Naturellement dans l'application industrielle, chaque entreprise aime développer sa propre présentation incluant une foule de détails techniques (outils, repérage, etc.) facilitant à l'opérateur l'exécution du travail.

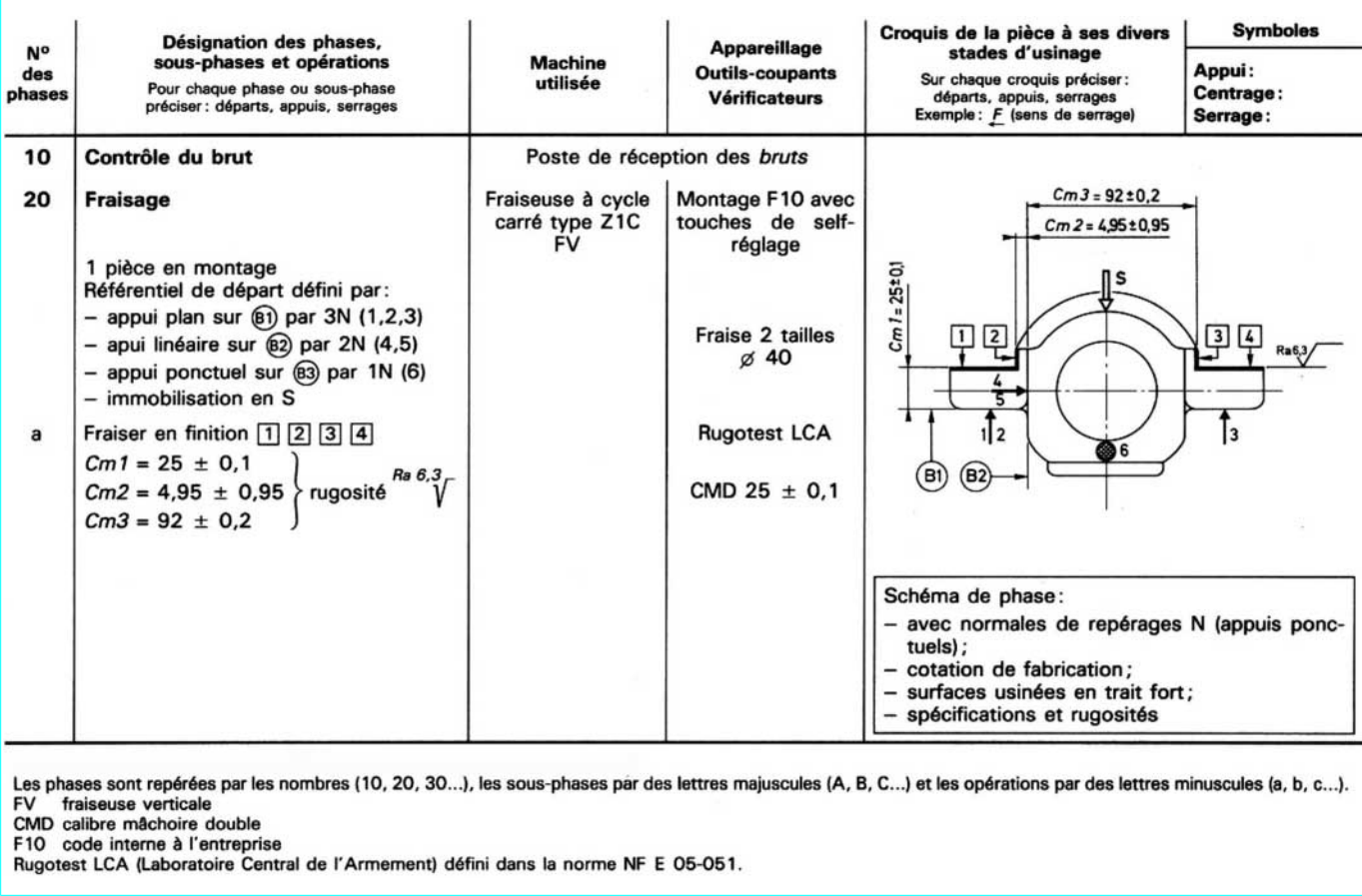



Figure 7 – Exemple d'une fiche de phase d'usinage [11] (pour les symboles de mise en position, se reporter à la figure 14)

3. Interprétation du dessin de définition

L'élaboration d'une gamme commence par une analyse géométrique du dessin de définition de la pièce à produire. Par exemple, la pièce de la figure 8 comporte de nombreuses indications relatives aux dimensions des entités géométriques et à leurs tolérances dimensionnelles comme $45^{\circ} \pm 1^{\circ}$ ou $\varnothing 12^{+0,5}_0$, aux tolérances géométriques comme la localisation  ou le parallélisme //, aux plans de référence comme P, des précisions sur l'interprétation d'éléments géométriques comme l'axe XX' ou l'axe YY' en relation avec leurs références exactes et, enfin, des indications sur la rugosité comme $Ra\ 3,2\sqrt{\text{ }}$. En outre, on trouve aussi sur le dessin des renseignements d'ordre plus général comme le nombre de pièces à produire (ici 1), la nature de la matière à travailler (ici alliage d'aluminium A-U8S) ainsi que la masse, le repère numérique (ici 9), le nom de la pièce, etc.

Toutes ces informations constituent un contrat à respecter rigoureusement par les services de fabrication, sauf si un accord dûment homologué intervient entre le bureau d'études et le bureau des méthodes pour des modifications, en général, de détails. Les dimensions et les tolérances portées sur le dessin ont, en effet, une justification fonctionnelle qu'il ne faut en aucun cas transgresser. Le bureau d'études a, notamment, choisi les tolérances de manière à satisfaire aux conditions de fonctionnement d'un produit composé de plusieurs pièces et aux conditions d'assemblage des différentes parties de l'ensemble fonctionnel. Pour le détail de cette analyse, le lecteur se reportera utilement, dans ce traité, à l'article *Cotation fonctionnelle* [BM 7 020] qui explique les principes de cette approche.

En outre, une partie importante de l'analyse géométrique concerne l'**interprétation des indications de tolérances**, notamment des tolérances géométriques (article *Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface* [B 7 010] dans ce traité, et article *Interchangeabilité dimensionnelle* [R 1 210] dans le traité Mesures et Contrôle). Au fil des années, tout un corps de **normes nationales et internationales** a vu le jour. Il faut toutefois ajouter de nombreux commentaires d'interprétation qui ne figuraient pas dans les définitions originales si on veut les appliquer convenablement. C'est pourquoi, au cours des dernières années, une série de nouvelles normes ont été introduites dans ce but. Il s'agit de normes concernant le principe de l'indépendance, le principe du maximum de matière, la définition exacte des surfaces de référence, le principe de l'enveloppe (principe de Taylor). Le travail continue dans l'organisme international de normalisation (ISO), pour compléter cette œuvre, par exemple dans le domaine des définitions géométriques nécessaires à l'exécution de mesures à l'aide de machines tridimensionnelles informatisées (suivant la norme allemande DIN 32880). Sur un plan scientifique, des études sur l'évaluation exacte des résultats des algorithmes de calcul des critères géométriques des entités fabriquées sont effectuées, notamment en ce qui concerne les procédures de traitement en calculeur [8].

Ayant fait l'interprétation exacte des informations contenues dans le dessin de définition, liberté entière est donnée au bureau des méthodes pour générer une gamme d'usinage qui soit optimale du point de vue des moyens de production dont il dispose (machines et outillages). Il a aussi toute latitude pour choisir ses moyens de contrôle en fabrication lui assurant la conformité des pièces produites aux cotes de fabrication. Il n'est toutefois pas responsable du contrôle final des pièces qui s'appuie sur des considérations d'aptitude à l'emploi définies par le bureau d'études (cotes fonctionnelles) (§ 7).

En **conclusion**, il faut souligner l'importance d'une analyse approfondie du dessin de définition qui permet pour un préparateur expérimenté de concevoir dès ce stade le déroulement général de la gamme d'usinage.

4. Description succincte des procédés et des moyens de production

Avant d'aborder la mise au point de la gamme d'usage proprement dite, passons en revue très brièvement les moyens de production que le préparateur met en œuvre pour composer sa gamme de travail. Schématiquement, il doit posséder des connaissances techniques dans les domaines suivants : les différents types de machines-outils et leurs commandes, les différents procédés de travail des matériaux (usinage, formage, procédés électriques, etc.), les différents types d'outils et porte-outils, les moyens de montage et de fixation des pièces sur les unités de production, les moyens de contrôle de la qualité. En ce qui concerne ces deux dernières catégories de moyens, on en fait une description plus détaillée dans les paragraphes 6 et 8.

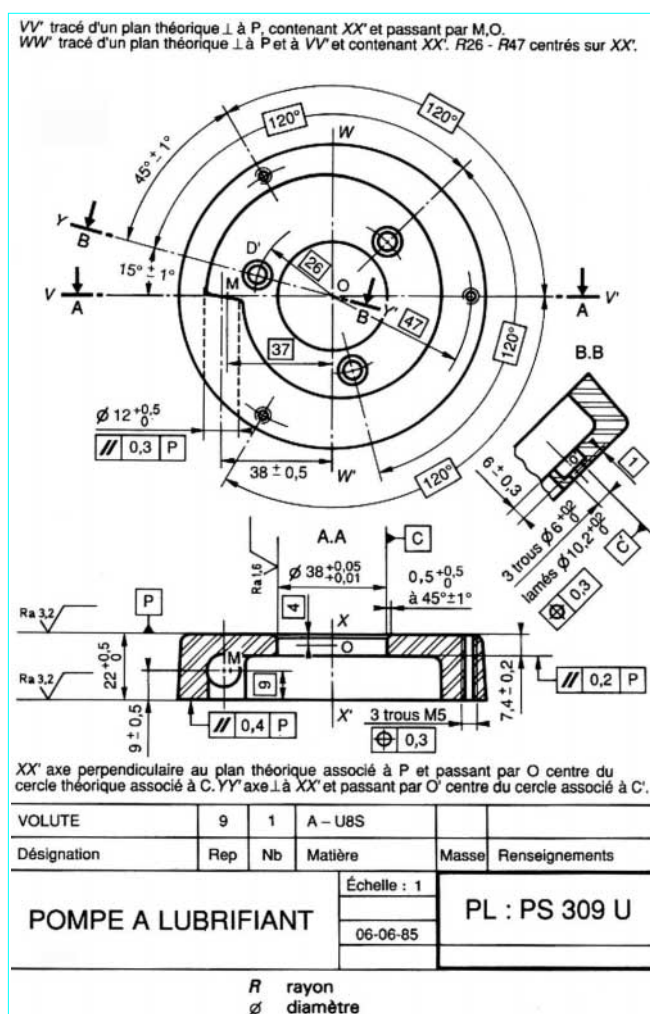


Figure 8 – Dessin de définition d’une volute de pompe à lubrifiant [23]

Cette somme de renseignements, qui dépasse nettement le cadre de cet article ne saurait évidemment être reproduite ici. On se contentera donc de donner quelques exemples représentatifs des moyens concernés, en renvoyant à des ouvrages spécialisés pour connaître les caractéristiques des principaux équipements sur le marché.

Dans une première phase, on choisit le **procédé de fabrication de la pièce brute** qui influe ensuite sur la gamme d'usinage. Traditionnellement, les deux principaux procédés industriels de série sont la **fonderie** et le **forgeage à chaud ou à froid**. On trouve une description détaillée de leurs propriétés dans les articles de la rubrique *Mise en forme* pour le forgeage et de la rubrique *Fonderie et moulage* pour la fonderie dans le traité Matériaux métalliques. La fonderie est un procédé économique pour la grande série, mais n'a pas, sauf pour des procédés spéciaux comme le moulage à la cire perdue, les propriétés de précision requises pour les pièces finies. Le forgeage donne de bonnes caractéristiques mécaniques, possède des délais de production courts, mais ne peut assurer la précision en finition sauf pour des procédés particuliers de forgeage de précision. Il existe une grande variété d'autres procédés plus spécialisés comme la **soudure** et le **brasage**, le **travail sans enlèvement de matière** (emboutissage, filage, fluotournage), le frittage, etc. qui répondent à des besoins particuliers, comme la production en petite série (articles spécialisés sur la mise en forme du traité Matériaux métalliques).

À ce jour, les **procédés d'usinage** les plus classiques qui restent les plus utilisés (dans 80 % des cas) sont les **procédés mécaniques** par enlèvement de matière comme le brochage, le perçage, le trépanage, le forage, l'alésage, le chambrage, le fraisage, le taraudage, le filetage, le sciage, le taillage (articles spécialisés de la rubrique *Usinage* dans ce traité). Les **procédés physico-chimiques**, comme l'usinage chimique, électrochimique, par ultrasons, par électro-érosion, par jet de fluide, sont apparus plus récemment (articles spécialisés de la rubrique *Usinage* dans ce traité).

L'importance relative des **procédés de rectification et de finition** (article *Abrasifs* [B 7 050] dans ce traité) croît avec la précision industrielle recherchée.

Une connaissance détaillée des caractéristiques fonctionnelles des **machines de production**, c'est-à-dire des machines-outils (articles spécialisés [B 7 120] [B 7 121] [B 7 122] [B 7 123] dans ce traité) et, aujourd'hui, de plus en plus, des unités d'usinage multifonctions comme les centres d'usinage, est naturellement à la base d'une bonne préparation de gamme. Les machines à commande numérique sont de plus en plus utilisées en production en raison du développement des petites séries.

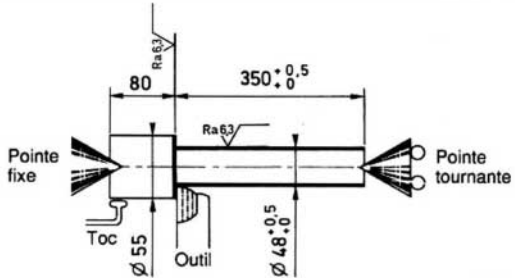
Enfin, à cause de l'automatisation des fabrications, les **moyens de transfert entre machines et d'approvisionnement des machines** ont pris de plus en plus d'importance et se développent rapidement dans différentes directions. On se contente de citer ici des moyens courants comme les palettes pour fixation préalable des pièces, les convoyeurs linéaires ou circulaires et, enfin, les robots industriels qui ajoutent aux moyens de manutention le facteur flexibilité nécessaire à la mise en œuvre des systèmes automatisés de fabrication (article *Aspects mécaniques en robotique* [B 7 190] dans ce traité, et rubrique *Robotique* dans le traité Informatique industrielle). À signaler aussi l'utilisation croissante de chariots de manutention autoguidés (généralement par fils conducteurs scellés dans le sol) qui améliorent sensiblement la productivité en fabrication (rubrique *Manutention et stockage* dans le traité L'entreprise industrielle).

5. Compléments à la préparation de la gamme d'usinage

Comme on l'a indiqué au paragraphe 2, chaque entité fait l'objet d'une analyse technologique qui propose des procédés d'usinage satisfaisant les spécifications exigées. Il s'agit essentiellement du choix des machines-outils, des outils et du nombre de passes d'usinage. Pour compléter la gamme d'usinage, il faut y ajouter des **données technologiques** comme l'avance, la profondeur de passe, la vitesse de coupe, la longueur d'usinage, etc. qui sont enregistrées sur une feuille d'opérations très détaillée (figure 9). Cette feuille sert aussi à évaluer les **temps d'usinage** et, en y ajoutant les temps de manutention, à calculer les temps totaux de fabrication. De là, on peut déduire les coûts des opérations et essayer d'arriver à des frais minimaux grâce à un choix optimal des conditions de travail. Dans la pratique, on se contente d'utiliser les données d'usinage fournies par les banques de données technologiques [4] qui fournissent des valeurs réalistes des paramètres conduisant à une faisabilité acceptable du processus d'usinage.

Comme il faut réaliser les différentes surfaces élémentaires suivant une séquence, il faut aussi tenir compte de contraintes d'antériorité, comme celles de la figure 4. Si la définition des **antériorités dimensionnelles et géométriques** est assez aisée à établir, il n'en va pas de même des **antériorités qualifiées de technologiques et d'économiques** qui font appel au jugement du préparateur. Celui-ci est amené, en outre, à ajouter des contraintes qui ne figurent pas sur le dessin afin de garantir une exécution correcte de la pièce. Ainsi, dans le cas de la pièce de la figure 3 (tableau 3), si l'usinage de la surface 1F demande d'abord la finition de 4F pour des raisons de positionnement (critère dimensionnel), l'antériorité géométrique de la surface 2F, non exigée par les tolérances géométriques du dessin de définition, a été ajoutée pour respecter la qualité géométrique de la pièce. D'autres additions dans cet esprit sont intégrées à la gamme par le préparateur qui s'appuie alors sur son expérience passée pour arriver à un usinage optimal et dispose de nombreuses règles d'origine technologique existant dans la pratique industrielle dont on doit tenir compte pour décider de la séquence des opérations. À titre d'exemple, la figure 10 montre le cas de deux alésages de diamètres différents sécants. La règle technologique courante s'appliquant à ce cas donne la priorité à l'alésage le plus long, car il a plus de risques d'être déformé par le passage d'un autre alésage ou à l'alésage de plus petit diamètre, car il demande plus de précision. Dans la figure 10, la priorité est donnée à l'alésage Ø H 7 parce qu'il est plus précis que l'alésage Ø H 11. De façon plus générale, les règles de priorité ont fait l'objet d'une analyse systématique en vue de la mise au point de gammes automatiques par application des techniques de l'intelligence artificielle [9]. On se heurte dans ce cas au problème difficile des résolutions de conflit provenant de règles contradictoires. Une fois le tableau de toutes les antériorités établi (tableau 3), il n'est pas difficile de trouver l'ordonnancement rationnel des opérations par des techniques de matrice (figure 5) ou des techniques de graphes [3].

Le **groupement des opérations** en phases se fait suivant des considérations de précision à respecter entre différentes entités (perpendicularité entre deux surfaces par exemple) ou des considérations économiques en vue de diminuer les temps de

N° de pièce : 41-00-02		Phase: 2 - Tournage Sous-phase: B - Ébauche $\varnothing 48^{+0,5}_0$		Matière : XC 38 recuit		Quantité : 500 pièces en 1 fois		Folio 1/2				
<p>L (mm) longueur de passe a (mm) profondeur de passe f (mm) avance par dent, par tour, par coup p nombre de pièces t_c (centiheure) temps de coupe t_m (centiheure) temps manuel t_t (centiheure) temps technologique t_{tm} (centiheure) temps techno-manuel t_s (centiheure) temps série (préparation) t_z (centiheure) temps masqué v (m/min) vitesse de coupe v_f (mm/min) vitesse d'avance n (tr/min) vitesse de rotation</p>		<p>CROQUIS (1)</p> <p>Centres (2) exécutés en sous-phase A</p>										
temps total = t _s + [p(t _t + t _c + t _m + t _{tm})]												
Opérations, éléments de travail, gestes... codifiés ou non		Éléments de coupe et de passe						Temps par pièce				t _s
		v	f	n	a	v _f	L	t _t ou t _c	t _{tm}	t _m	t _z	
Préparation de la machine :												
– Monter plateau pousse-toc												1
– Monter pointes fixe et tournante												1,2
– Monter outil - Régler hauteur												1,5
– Régler vitesse et avance												0,4
Réglage 1^{re} pièce :												
– Prendre pièce et monter toc												0,4
– Monter pièce entre pointes												0,2
– Approcher et serrer contrepointe												0,5
– Mettre en marche 2 fois												0,2
– Prendre passe et repérer 2 fois												2
– Embrayer avance 2 fois												0,2
– Tourner - Surveiller longueur		125	0,3	800	3,5	250	353					2,5
– Débrayer avance 2 fois												0,2
– Ramener outil 2 fois												0,4
– Arrêter tour 2 fois												0,2
– Vérifier cote au pied à coulisse .. 2 fois												1
– Vérifier longueur au réglet												0,4
– Placer et régler butée débrayable												0,8
– Démonter pièce												0,1
– Démonter toc et poser pièce												0,4
Usinage de chaque pièce :												
– Prendre pièce											0,1	
– Monter toc											0,3	
– Monter pièce entre pointes										0,2		
– Serrer contrepointe										0,1		
– Mettre en marche										0,1		
– Prendre passe au repère										0,2		
– Embrayer avance										0,1		
– Tourner		125	0,3	800	3,5	250	353	2,5				
Majorations :												
– t _t ou t _c : 5 à 10 %												
– t _{tm} et t _m : sans fatigue : 8 % manœuvres délicates, fatigue : 10 à 30 % grande fatigue musculaire, nerveuse : 30 à 50 %												
– t _s : 10 à 40 % selon les réglages												
		Totaux (ou reports)						2,5	0	0,7	0,4	13,6
		Majorations										
		Totaux majorés										
		Temps alloué pour la série									heures	

(1) Croquis de montage de la pièce entre pointe fixe et pointe tournante. Le toc entraîne la pièce sur l'outil de tour.
(2) Centres pour le positionnement des pointes.

Figure 9 – Fiche d'opérations [22]

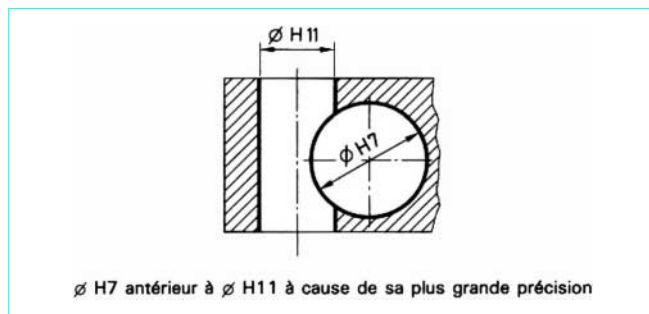


Figure 10 – Exemple de deux alésages sécants [5]

transfert de la pièce. C'est ainsi que pour la pièce étudiée (figure 3), on groupe les surfaces ② et ④ pour observer la tolérance de perpendicularité entre elles et on y ajoute la surface ⑤ par mesure d'économie de temps.

Après le regroupement des opérations en phases, la gamme d'usinage de la pièce est définitivement établie en tant que suite des opérations. Il reste à trouver encore le **positionnement le plus propice de la pièce** et à **calculer les tolérances de fabrication et de réglage** (§ 6 et 7). Dès ce stade, on peut établir un dossier de fabrication dont un exemple est donné par les figures 11 et 12 [11]. On y retrouve la description des opérations d'usinage, leur séquence, les machines utilisées, les positionnements et bridages des pièces, les moyens de contrôle, le tout accompagné de croquis simplifiés de la pièce pour faciliter la compréhension de l'opérateur. En ce qui concerne le calcul des cotes machines $Cm1$ et $Cm4$ indiqué dans ce dossier, le lecteur se reportera au paragraphe 7.

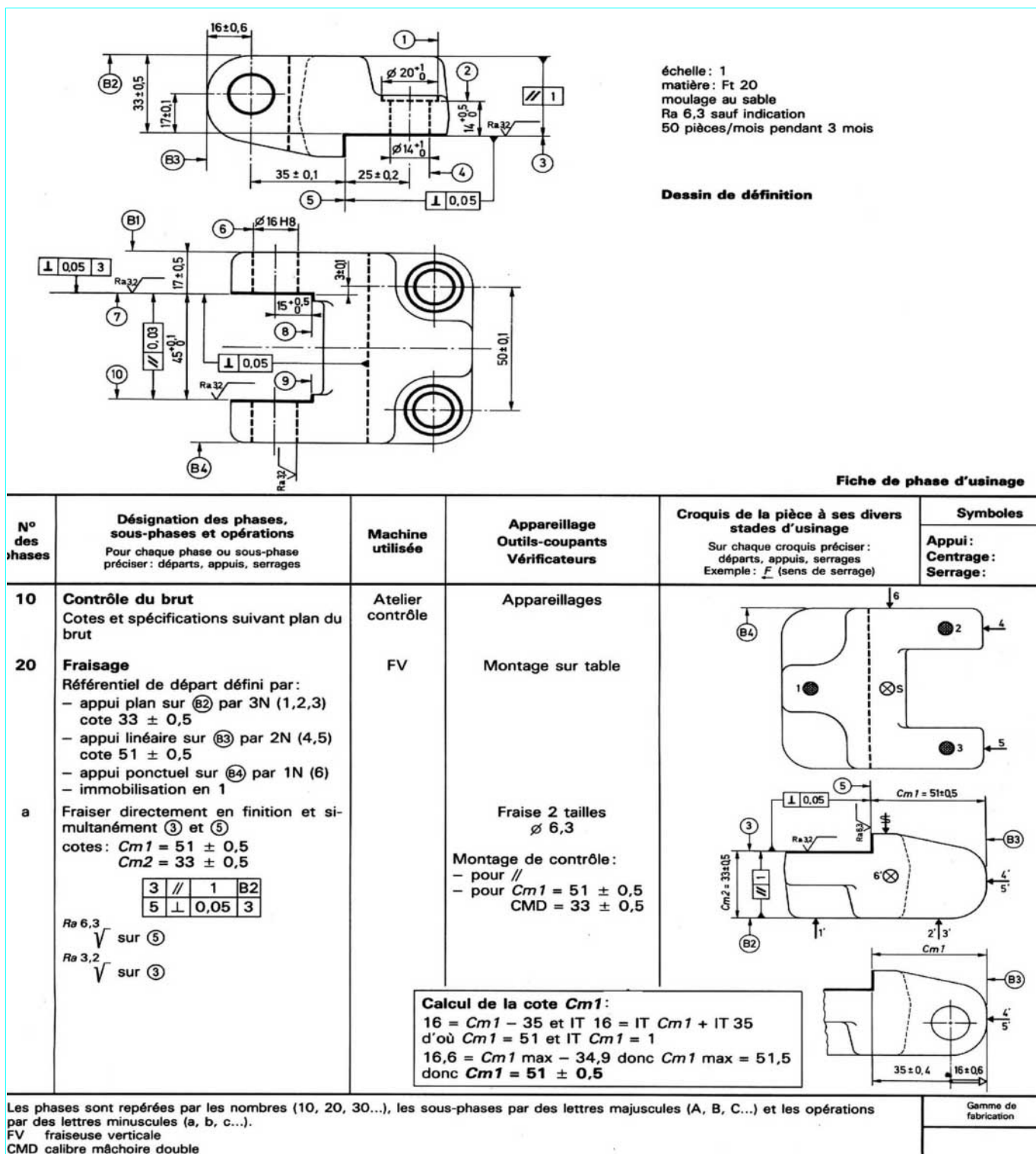


Figure 11 - Exemple du dossier de la gamme complète d'usinage [11] (pour les symboles de mise en position, se reporter à la figure 15 et pour le calcul de la cote $Cm1$, se reporter au paragraphe 7)

N° des phases	Désignation des phases, sous-phases et opérations Pour chaque phase ou sous-phase préciser : départs, appuis, serrages	Machine utilisée	Appareillage Outils-coupants Vérificateurs	Croquis de la pièce à ses divers stades d'usinage Sur chaque croquis préciser : départs, appuis, serrages Exemple : \vec{F} (sens de serrage)	Symboles Appui : Centrage : Serrage :												
30	Fraisage Référentiel de reprise défini par : – appui plan sur ③ en 3N (1,2,3) – appui linéaire sur ⑤ en 2N (4,5) – appui ponctuel sur ⑧ en 1N (6) – immobilisation en S_2 a Fraiser simultanément en finition ⑦, ⑧, ⑨, ⑩ cotes : $Cm4 = 20 \pm 0,1$ $Cm3 = 17 \pm 0,5$ $Ca = 45 \pm 0,1$ <table><tr><td>10</td><td>//</td><td>0,03</td><td>7</td></tr><tr><td>10</td><td>⊥</td><td>0,05</td><td>5</td></tr><tr><td>10</td><td>⊥</td><td>0,05</td><td>3</td></tr></table> $Ra_{3,2}$ sur ⑦ et ⑩ $Ra_{6,3}$ sur ⑧ et ⑨	10	//	0,03	7	10	⊥	0,05	5	10	⊥	0,05	3	FH	Montage F30 Train de 2 fraises 3 tailles en ARS $\varnothing 125$ Montage de contrôle pour $Cm4$ et \perp		
10	//	0,03	7														
10	⊥	0,05	5														
10	⊥	0,05	3														
<div>Calcul de la cote $Cm4$: $15 = 35 - Cm4$ et $IT\ 15 = IT\ 35 + IT\ Cm4$ d'où $Cm4 = 20$ et $IT\ Cm4 = 0,3$ $Cm4\ max = 19,9$ donc $Cm4 = 20 \pm 0,1$</div>																	
40	Perçage Référentiel de reprise défini par : – appui plan sur ③ en 3N (1,2,3) – appui linéaire sur ⑤ en 2N (4,5) – appui ponctuel sur ⑦ en 1N (6) – immobilisation en 1 point I_1 a Percer 2 trous débouchants : cotes : $2Cm1 = \varnothing 14 \pm 0,1$ $Ca1 = 25 \pm 0,2$ $Ca2 = 3 \pm 0,1$ $Ca3 = 50 \pm 0,1$ b Lamer 2 trous ① et ② cotes : $Cm2 = 14 \pm 0,5$ $2Cm3 = \varnothing 20 \pm 0,1$ c Basculer le montage d Percer 2 trous en ligne ⑥ : cotes : $2Cm4 = \varnothing 15,8 \pm 0,1$ $Ca4 = 17 \pm 0,1$ $Ca5 = 35 \pm 0,1$ e Aléser ⑥ cotes : $2Cm4 = \varnothing 16H8$	PC	Montage PAQ à canons amovibles Foret $\varnothing 14$ Fraise à lamer $\varnothing 20$ avec pilote $\varnothing 14$ Foret $\varnothing 15,8$ Alésoir $\varnothing 16H8$ appareil type Presto Poste de contrôle														
50	Contrôle final A Dimensionnel B Géométrique C États de surface																
ARS acier rapide supérieur F30, PAQ codes internes à l'entreprise		FH fraiseuse horizontale PC perceuse à colonne															

Figure 12 – Exemple de dossier de la gamme complète d'usinage [11] (pour les symboles de mise en position, se reporter à la figure 15 et pour le calcul de la cote $Cm4$, se reporter au paragraphe 2) (suite)

6. Positionnement et montages d'usinage

Comme on l'a vu au paragraphe 3, les dimensions des éléments d'usinage et leurs tolérances géométriques sont définies par rapport à des surfaces de référence qu'il faut matérialiser dans le montage de la pièce à usiner sur la machine-outil. On s'appuie autant que possible sur le principe de l'isostatisme pour positionner la pièce de façon univoque dans un référentiel absolu lié à la machine-outil ou, éventuellement, au montage d'usinage. Ce principe consiste à éliminer les 6 degrés de liberté d'une pièce solide dans l'espace généralement en appuyant la pièce sur 6 points répartis judicieusement dans l'espace. La figure 13 montre l'application du principe de l'isostatisme dans le cas de pièces prismatiques. Naturellement, dans la réalité, les supports de pièces ne sont généralement pas ponctuels et l'on se contente de surfaces de petites dimensions finies qui s'approchent du cas idéal des 6 points. On réduit ainsi notablement les erreurs de fabrication des pièces qui résultent des erreurs de positionnement dont l'influence peut être déterminante. Un exemple de montage d'usinage industriel qui obéit au principe de l'isostatisme est donné par la figure 14.

Le choix des **surfaces d'appui** (surfaces de départ pour le premier positionnement et surfaces de référence en cours d'usinage) se fait suivant des critères de précision et de faisabilité, en particulier :

- les surfaces d'appui doivent être aussi étendues que possible et doivent être pleines, sans trous ni rainures ;
- les surfaces de référence pour des usinages précis doivent être les surfaces de départ de manière à ne pas cumuler les erreurs par transfert de cotes ;
- le choix des six points d'appui sur les surfaces d'appui doit se faire selon des critères de précision qui ont déjà été évoqués au paragraphe 2 pour le cas de la pièce de la figure 3 ;
- l'utilisation d'un alésage comme surface de référence est moins précise du fait de l'accumulation d'erreurs venant de la tolérance sur le diamètre de l'alésage, du jeu entre l'alésage et la butée de centrage et d'erreurs de position de la butée ;
- la stabilité du montage sous l'effet des forces de coupe et d'inertie doit être vérifiée ;
- une bonne accessibilité à la machine-outil pour positionner la pièce sur le montage est très importante ;
- un dispositif de montage économique, si possible standard, est préférable à l'utilisation de montages particuliers.

La représentation des **appuis et maintiens en position des pièces** a fait l'objet d'une normalisation (NFE 04-013) qui schématise la mise en position des pièces sur leurs montages et définit aussi les moyens courants de bridage. La figure 15 donne un extrait de la norme qui est très utile pour la préparation des feuilles de gamme et pour l'enseignement technique.

Le principe du calcul des erreurs de positionnement, rappelé par la figure 16, est fondé sur l'utilisation du torseur des petits déplacements compte tenu des erreurs de position ξ_i des 6 points d'appui normalement à la surface de contact. En fonction des 6 valeurs de ξ_i , les équations de la cinématique donnent les valeurs des déplacements élémentaires dans l'espace en translation et en rotation. De là, on peut calculer les erreurs de déplacement pour les points ou les surfaces fonctionnelles de la pièce et avoir une estimation des erreurs dimensionnelles et angulaires sur la pièce après usinage.

Si le calcul des erreurs dues au positionnement dans le cas de points d'appui connus sur des surfaces de référence données est assez facile, il n'en est pas de même du choix optimal des surfaces de référence elles-mêmes, compte tenu de leur importance fonctionnelle.

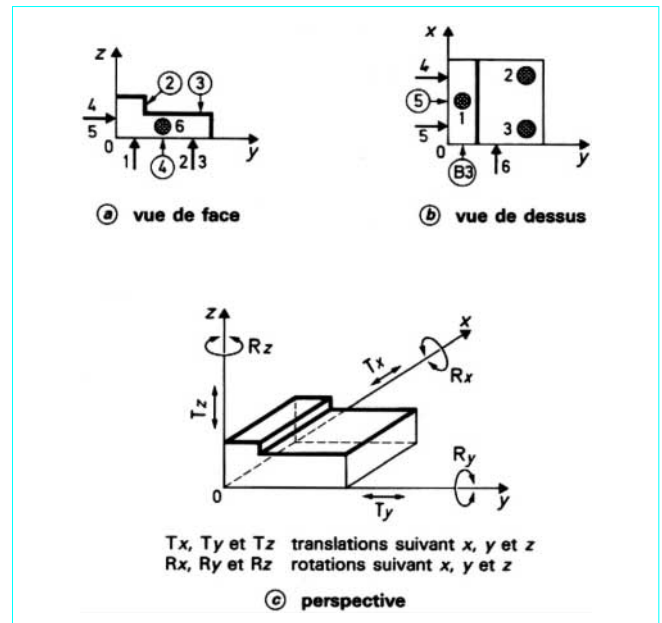


Figure 13 – Principe de la mise en position isostatique [3]
(pour les symboles de mise en position, se reporter à la figure 15)

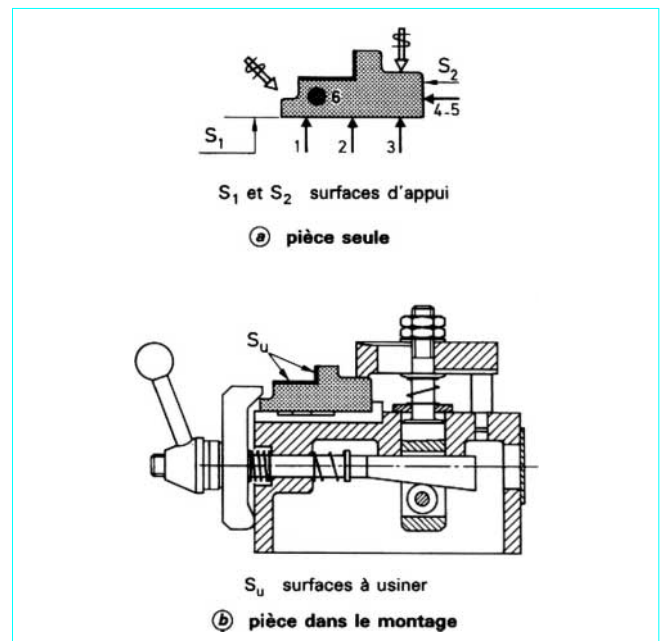


Figure 14 – Exemple de montage isostatique industriel [24]
(pour les symboles de mise en position, se reporter à la figure 15)

Symboles de base essentiels						
Mise en position rigoureuse		Immobilisation, ou prélocalisation, ou opposition aux déformations ou aux vibrations	Centreurs			
Départ de cotation	ou autre forme		complet	dégagé (locating)		
Flèche double sur surface brute Flèche simple sur surface usinée						
Symboles composés les plus courants						
sur surfaces brutes		sur surface usinées				
		contact fixe bombé		appui fixe avec touche plate		précentrage
		mors strié à serrage concentrique ou coaxial		centrage fixe		pointe fixe
	vé fixe		cuvette axiale et serrage, réalisant un centrage court		contrepointe tournante	
	vé mobile guidé et serrage		vé fixe		système de soutien irréversible	
	2 ou 3 points guidés, touches bombées, avec serrage		contact éclipsable dégagé		action réversible (élastique)	
	cuvette axiale avec serrage, réalisant un centrage court		système concentrique ou coaxial		serrage simple	
	serrage simple		système symétrique	palonnier de serrage à 2 ou 3 touches plates		
	serrage sur palonnier (articulé)		sym. sym.			

Figure 15 – Symboles de mise en position et de bridage [3] (norme NF E 04-013)

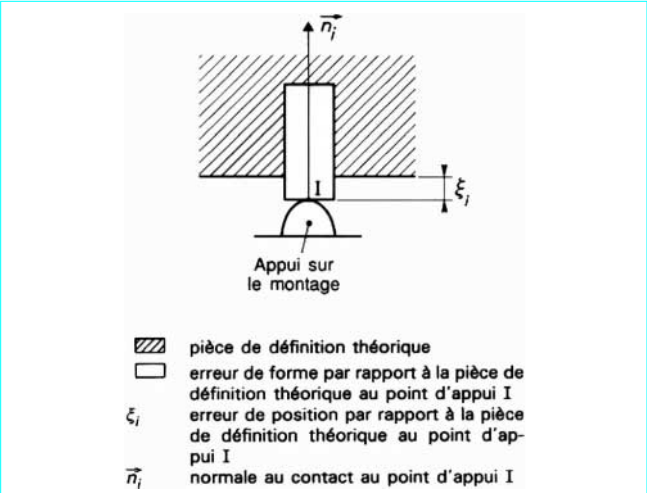


Figure 16 – Calcul des erreurs de positionnement dues au montage [25]

7. Analyse des cotes et des tolérances de fabrication

■ Étudions d'abord le cas de **cotes unidirectionnelles**. Les dimensions portées sur les dessins de définition ne sont pas obligatoirement exécutées directement en fabrication. Les *dimensions fonctionnelles* exigées par le dessin, et qu'il faut respecter absolument, sont transférées en des dimensions résultantes qui sont affectées par les tolérances de toutes les cotes composantes d'une chaîne de *cotes de fabrication*. Les tolérances résultantes étant la somme des tolérances composantes, il est clair que le respect des tolérances fonctionnelles exige alors de diminuer les tolérances composantes qui sont généralement le résultat d'opérations de fabrication ayant des tolérances données. Pour illustrer ce principe du transfert de tolérances sur un exemple simple, la figure 17 montre le cas de l'usinage d'un épaulement en fraisage où le dessin de définition impose les dimensions fonctionnelles *BE1* et *BE2*. Toutefois, pour des raisons de commodité et de disponibilité, ainsi que d'économie, on a décidé d'usiner l'épaulement par un train de fraises où intervient une cote (de fabrication) outil *Co* ayant son propre

intervalle de tolérance IT_{Co} et une cote (de fabrication) machine $Cm1$ affectée d'une tolérance IT_{Cm1} . La cote $BE2$ est transférée en une cote de fabrication C dont la tolérance est la somme arithmétique des tolérances de Co et de $Cm1$. On a la relation :

$$IT_C = IT_{Co} + IT_{Cm1} \quad (1)$$

Si on veut être sûr que dans tous les cas, quelles que soient les valeurs des tolérances des cotes Co et $Cm1$, on respecte la tolérance IT_{BE2} ($IT_C \leq IT_{BE2}$), il faut appliquer la relation (1). En réalité, il n'est pas nécessaire d'appliquer une relation aussi restrictive en fabrication parce qu'il est peu probable que les valeurs extrêmes des tolérances se produisent simultanément. En prenant le risque d'accepter une proportion donnée de pièces mauvaises, le contrôle statistique des cotes permet d'élargir notablement les intervalles de tolérances des cotes composantes (ici IT_{Co} et IT_{Cm1}). Naturellement, la relation (1) suppose que **les cotes soient indépendantes statistiquement**, ce qui n'est pas toujours le cas dans les usinages particuliers. On remarque aussi que les valeurs moyennes des cotes sur une fabrication s'additionnent toujours algébriquement sans restriction d'indépendance statistique. Dans le cas de la figure 16, il vient (avec moy pour valeur moyenne) :

$$BE2_{moy} = C_{moy} = Cm1_{moy} - Co_{moy} \quad (2)$$

qui est particulièrement facile à employer quand les cotes sont tolérancées symétriquement (par exemple, $29 \pm 0,3$).

Une cotation plus correcte prenant en compte le problème des **cotes dépendantes** ou non a été proposée par P. Bourdet [12] et a fait l'objet d'une informatisation [7]. Elle consiste à prendre comme variables indépendantes les *cotes de réglage sur la machine* ainsi que les erreurs de positionnement de la pièce dans son support. La figure 18 montre les cotes de réglage machine Li et leurs tolérances IT_{Li} pour une pièce simplifiée. Il faut mettre à part la cote $L1'$ qui désigne la cote de mise en position sur la machine et sa tolérance $IT_{L1'}$ qui n'était pas prise en compte dans le modèle classique de chaîne de cotes.

Le modèle classique admettait comme cotes indépendantes les cotes de fabrication Cmi qui sont des cotes résultantes apparaissant sur la pièce et les utilisait pour appliquer la relation fondamentale (1) qui, dans le cas de la figure 18, devient :

$$IT_{Cm2-3} = IT_{Cm1-2} + IT_{Cm1-3} \quad (3)$$

Il en résultait des erreurs, parce que ces cotes ne sont pas indépendantes, et des tolérancements trop restrictifs dans un certain nombre de cas.

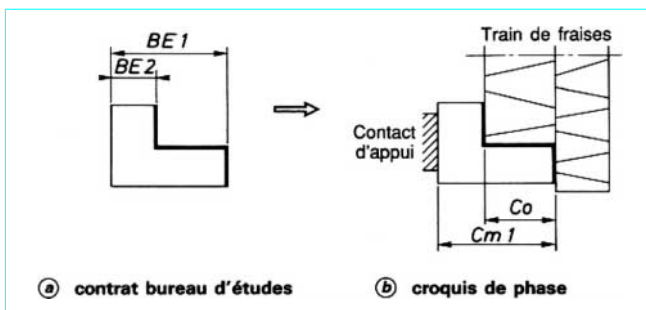


Figure 17 - Principe du transfert de cotes fonctionnelles en cotes de fabrication [3]

Dans le modèle corrigé de P. Bourdet (figure 18), on obtient les relations suivantes :

$$IT_{Cm1-2} = IT_{L1'} + IT_{L2}$$

$$IT_{Cm1-3} = IT_{L1'} + IT_{L3}$$

$$IT_{Cm2-3} = IT_{L2} + IT_{L3}$$

qui montrent que la cote résultante $Cm2-3$ n'est pas conditionnée par la relation (3), utilisée dans le modèle simplifié classique, mais par la relation :

$$IT_{Cm2-3} = IT_{Cm1-2} + IT_{Cm1-3} - 2 IT_{L1'} \quad (4)$$

Partant du modèle corrigé, on peut simuler le calcul des dimensions et des tolérances de réglage de manière à respecter les tolérances fonctionnelles :

$$IT_C \leq IT_{BE} \text{ (ou } C \leq BE \text{)} \quad (5)$$

Par des méthodes d'optimisation s'appuyant sur des critères comme la facilité de réglage, on peut fixer les tolérances des cotes de réglage les plus grandes possible, c'est-à-dire les plus économiques possible. Comme ces intervalles sont le résultat de nombreuses causes d'erreurs provenant des courses de chariot, de l'imprécision des butées, des erreurs de réglage et des défauts d'usinage (usure d'outil), on diminue les risques d'erreur sur la cote finale en élargissant l'intervalle de tolérance de chaque cote composante du processus d'usinage. En plus des tolérances, les nouvelles méthodes informatisées [7] permettent aussi de calculer automatiquement les dimensions moyennes, par des procédés dérivés de la théorie des graphes [13]. Les principes énoncés ci-avant sont illustrés par l'exemple d'une pièce de tournage [14] pour laquelle on a établi les dimensions moyennes et les tolérances depuis l'ébauche jusqu'à la finition à partir des dimensions du brut et en y ajoutant des contraintes de fabrication telles que les épaisseurs minimales et maximales de copeaux obtenues au cours des opérations d'usinage ou la localisation du plan de jauge (norme NF E 04-557) pour le positionnement correct de la pièce entre pointes. Le résultat des calculs est résumé sur la figure 19 qui reproduit la gamme d'usinage, ainsi que les cotes de réglage Li avec leurs tolérances optimisées. Les cotes résultantes Cmi sont obtenues par des calculs (non reportés sur la figure 19). Ce document, appelé simulation d'usinage, est transmis aux services de fabrication pour faire le réglage des machines-outils.

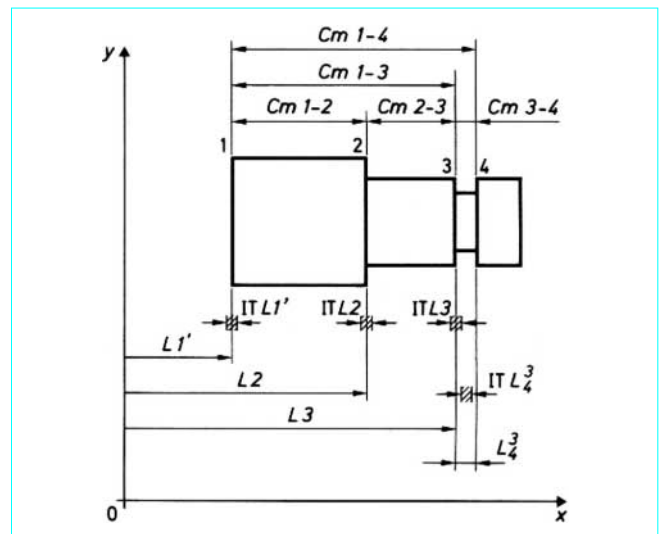


Figure 18 - Principe du calcul de cotes de fabrication à partir de cotes de réglage (selon P. Bourdet [12])

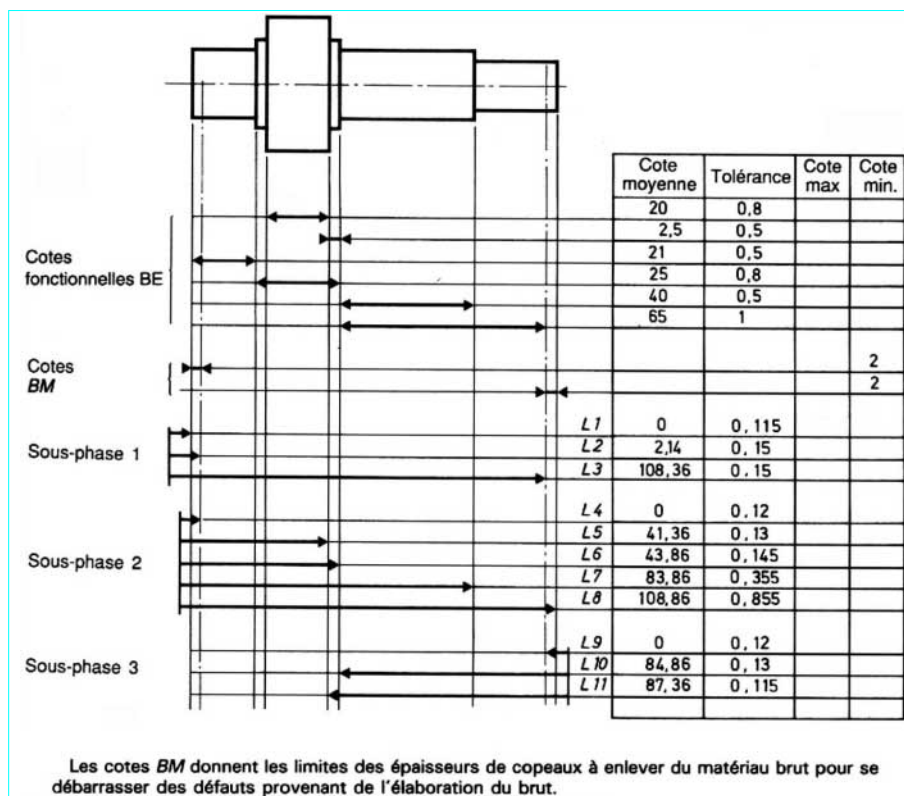


Figure 19 – Simulation complète d'une gamme d'usinage

■ Si l'étude des cotes unidirectionnelles, comme on vient de le voir, est très avancée, il faut reconnaître qu'il n'en est pas de même des **cotes bi ou tridimensionnelles**. Celles-ci sont liées à l'interprétation des tolérances géométriques pour lesquelles des progrès sensibles ont été accomplis dans les dernières années sur le plan de la normalisation internationale (§ 3). En particulier, les travaux concernant les tolérances de position, y compris les tolérances de position entre des groupes d'alésages (pattern) comme dans l'exemple de la figure 20, ont été effectués récemment. En général, on exploite les avantages de la notion de maximum de matière. Des analyses statistiques approfondies ont été élaborées sur ce problème qui est d'importance primordiale pour l'assemblage des pièces [15].

Les solutions trouvées restent cependant **bidimensionnelles** avec des corrections pour tenir compte d'erreurs dans la troisième dimension (par exemple, correction de l'inclinaison d'un axe de cylindre quand l'analyse a été limitée à une section du cylindre dans un plan normal, c'est-à-dire à un cercle).

Pour le cas du vrai **tridimensionnel**, des algorithmes existent pour évaluer les erreurs géométriques sur des pièces à l'aide de machines à mesurer tridimensionnelles informatisées [16]. Les relations entre ces mesures fonctionnelles et les cotes de réglage à afficher sur les machines-outils commencent seulement à être étudiées et n'ont pas encore fait l'objet de techniques d'application industrielle semblables à celles évoquées par le cas des cotes unidimensionnelles.

■ Entre les cotes de fabrication C obtenues sur la pièce comme on l'a vu précédemment et les cotes de réglage sur machine L, il y a des différences qui proviennent des **incertitudes du réglage** et dont il faut tenir compte pour positionner l'outil par rapport à la pièce de façon optimale. L'analyse suivante précise les différents facteurs qui entrent en jeu. À titre d'exemple, sur la figure 21, le **principe du réglage dans une direction donnée** est rappelé schématiquement. La cote fonctionnelle BE est transférée en une cote de fabrication C dont

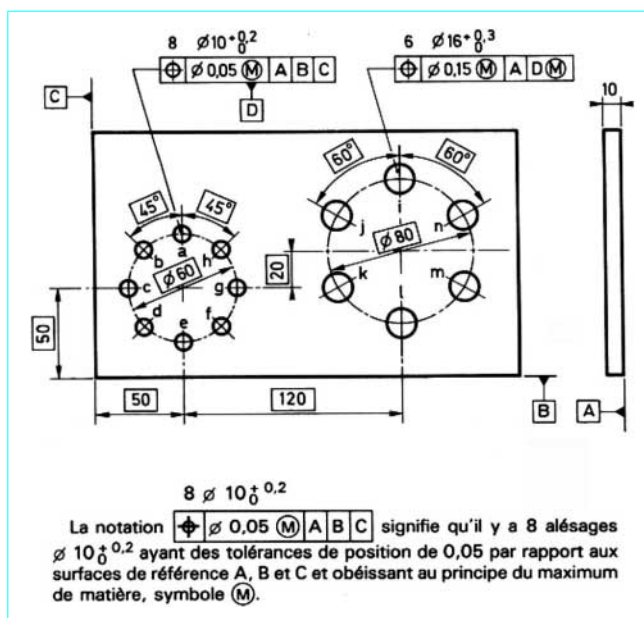


Figure 20 – Groupes d'alésages tolérancés en position (pattern) [8] (norme ISO 5429)

la tolérance IT C doit, pour une cote directe, uniquement respecter $IT C \leq IT BE$. La cote de fabrication C est toutefois obtenue par un réglage de cote machine L qui, pour un montage donné, a une

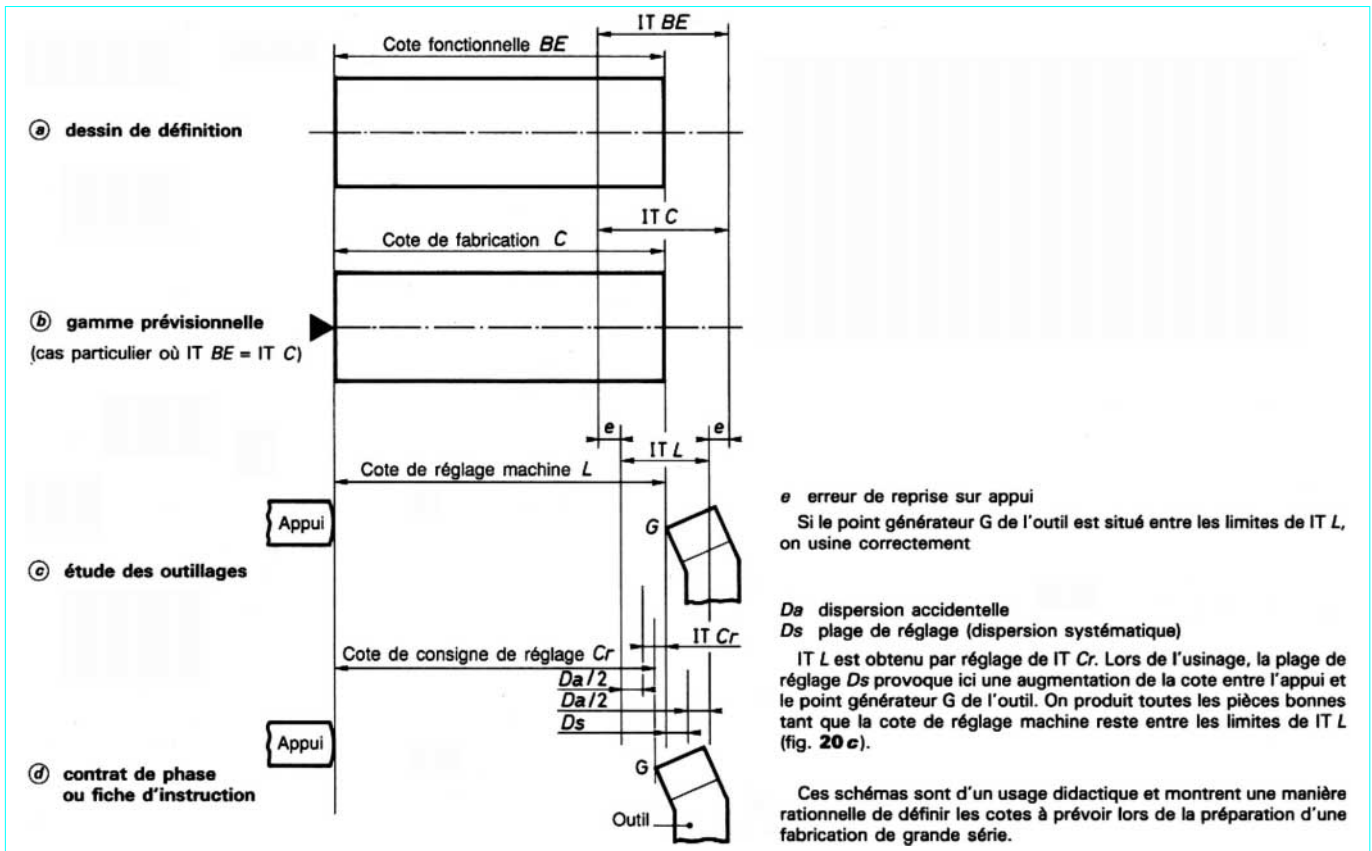


Figure 21 – Principe du réglage unidirectionnel [26]

tolérance réduite par la tolérance de positionnement, dans ce cas e . L'intervalle de tolérance machine $IT\ L$ doit être obtenu sur le site par un réglage qui tienne compte des erreurs de fabrication Da et des erreurs de réglage proprement dites $IT\ Cr$ (butée réglable, instrument de mesure, etc.). Il reste finalement une plage totale de réglage ayant comme valeur :

$$Ds = IT\ L - Da - IT\ Cr \quad (6)$$

La cote de réglage L à choisir dans cette plage dépend des conditions de travail. Dans l'exemple d'une usure d'outil, il faudra régler l'outil à la limite inférieure (comme dans la figure 21 d) ou à la limite supérieure de la plage de réglage selon le sens de l'usure. Quand l'évolution de la cote est mal connue, on effectue le réglage au milieu de la plage. Pratiquement, les corrections de réglage sont effectuées après usinage d'une pièce d'essai ou d'une petite série qui donne la valeur de la correction à apporter au réglage pour produire un maximum de pièces avant un nouveau réglage. Des considérations statistiques interviennent pour déterminer le réglage optimal (§ 8). Il faut aussi envisager les différents cas résultant de la relation (6). Si la valeur de la plage de réglage Ds devient négative, on ne peut pas garantir une fabrication sans pièces défectueuses. Il est néanmoins possible de déterminer sur une série de pièces la position moyenne et de corriger le réglage en conséquence. Mais, il faut en plus essayer de réduire la dispersion due au réglage lui-même, soit $IT\ Cr$, en améliorant les moyens de contrôle pour assurer une production dans les tolérances.

Dans le cas d'un **usinage tridimensionnel**, il faut considérer les erreurs suivant les 6 degrés de liberté qui déterminent la posture (position et orientation) de la pièce dans le cas général. Les corrections à effectuer deviennent alors plus complexes, car il faut repositionner la pièce ou l'outil par des réglages à 6 degrés de liberté et s'assurer que les cotes fonctionnelles sont bien respectées. Les

corrections peuvent s'effectuer par un repositionnement à l'aide des chariots de la machine-outil si elle possède le nombre suffisant de degrés de liberté ou par des réglages sur le montage à l'aide des relations matricielles entre les valeurs des réglages et les erreurs de position de la pièce dans le système de référence de la machine [17].

8. Éléments de métrologie industrielle et de contrôle statistique en fabrication

Comme on l'a indiqué précédemment (§ 2), l'exécution du plan de fabrication exige l'utilisation d'instruments de contrôle dimensionnel, éventuellement de contrôles physiques ou chimiques comme la détection de fissures dans les pièces, la détection de l'altération des sous-couches superficielles à la suite d'actions mécaniques et thermiques, etc. Les contrôles peuvent être prévus en cours de fabrication soit pour procéder à nouveau à des réglages, soit pour changer certains traitements, comme les traitements thermiques. Cependant, il est souvent nécessaire aussi de prévoir un contrôle final qui garantisse l'aptitude de la pièce à l'emploi, indépendamment de tout le processus de mise en forme subi par la pièce. Enfin, se juxtaposant aux différentes formes de contrôle, il faut mentionner les techniques de contrôle statistique des fabrications qui garantissent avec une probabilité très élevée la qualité dimensionnelle de la pièce tout en faisant l'économie d'un contrôle exhaustif des produits qui reviendrait forcément beaucoup plus cher.

En ce qui concerne les instruments courants de métrologie utilisés en production (pied à coulisse, palmer, calibres fixes ENTRE et N'ENTRE PAS, montre comparateur, cales Johansson, marbre d'étalement, barres sinus, rapporteur, etc.), on renverra à leur description et limites d'utilisation dans des ouvrages spécialisés [18] ou dans les articles suivants du traité Mesures et Contrôle :

- *Interchangeabilité dimensionnelle* [R 1 210] ;
- *Calibres à limites pour vérification des pièces lisses* [R 1 270] ;
- *Contrôle dimensionnel en production de série* [R 1 305] ;
- *Contrôle d'épaisseur* [R 1 370].

Pour ce qui concerne la production, il faut surtout insister sur les différences fondamentales entre contrôles en travail et contrôle final. Le contrôle final par calibres fixes doit être moins restrictif que le contrôle en fabrication de manière à ne pas rejeter des pièces dans les tolérances, malgré des mesures apparemment hors tolérances. Une règle pratique consiste à utiliser des calibres neufs en fabrication et des calibres usagés en contrôle. Si d'autres discordances apparaissent entre le service contrôle et l'utilisateur, par exemple au sujet des jeux de fonctionnement, il faudrait prendre le soin d'arriver à un compromis.

Une catégorie particulière de mesures concerne la **rugosité superficielle**, quelquefois appelée à tort état de surface, car ce dernier concept englobe non seulement les aberrations géométriques de surface, mais également les transformations de nature physico-chimique produites à la surface des pièces. L'examen détaillé des microgéométries de surface est fait dans l'article *Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface* [B 7 010] de ce traité, ce dernier donnant aussi les définitions des paramètres normalisés de rugosité superficielle. Des appareils de mesure basés sur des mesures électroniques ont été développés au fil des ans pour les mesures en laboratoire et fournissent automatiquement les valeurs des critères de rugosité différents exigés par l'utilisateur. Malheureusement, il n'existe qu'une corrélation très vague entre ces critères et l'aptitude à l'emploi des pièces, ce qui oblige à un choix de critères très particuliers pour chaque application.

Pour compléter cette revue des moyens conventionnels de mesure, il faut signaler le développement de techniques très particulières de **contrôle des surfaces spéciales**, telles que les filetages, les engrenages, les angles, qui font l'objet des articles suivants du traité Mesures et Contrôle :

- *Étalons de filetage et calcul d'incertitude* [R 1 288] ;
- *Contrôle des angles* [R 1 300] ;
- *Contrôle d'épaisseur* [R 1 370].

Également, le **contrôle des erreurs géométriques de forme, de position et d'orientation** fait appel à des méthodes particulières, souvent indirectes, décrites dans cet article *Erreurs de forme et de position* [R 1 220] du traité Mesures et Contrôle. Ces méthodes de contrôle assez laborieuses et affectées d'erreurs intrinsèques (notamment, le manque de précision sur les surfaces de référence) sont peu à peu remplacées par des méthodes plus fonctionnelles utilisant toutes les possibilités des machines à mesurer tridimensionnelles informatisées. Déjà évoquées en relation avec les évaluations des tolérances géométriques (§ 3 et 7), les nouvelles machines à mesurer automatiques, intégrant des fonctions de calculs multiples pour connaître les valeurs des erreurs géométriques, sont connues sous le sigle CMM (*Coordinate Measuring Machines*). Elles font l'objet d'un développement rapide dans les départements de métrologie industrielle et commencent aussi à s'intégrer dans les lignes de production [16]. Bien que différant dans les détails, les CMM adoptent généralement une structure basée sur un système de coordonnées orthonormé et leur principe de mesure dimensionnelle repose sur la fermeture d'un circuit électrique, c'est-à-dire sans effort mécanique, utilisant une touche Renishaw à positionnement isostatique extrêmement précis (figure 22). Les mesures ne sont pas seulement exécutées dans le système de référence de la machine à mesurer, mais dans n'importe quel autre système de référence défini selon des considérations fonctionnelles et, notamment, dans des systèmes liés à la pièce elle-même. L'élégance des mesures sur CMM ne doit cependant pas cacher les problèmes liés à

l'interprétation des résultats fournis par les algorithmes de calcul des paramètres géométriques des entités d'usinage. De nombreuses incertitudes, liées aux définitions adoptées dans les normes, aux stratégies de calcul, aux précisions des ordinateurs, expliquent les différences significatives entre les résultats obtenus sur CMM et ceux que donneraient les contrôles classiques par calibres fonctionnels [19]. Par exemple, se référant à la figure 20, on peut définir un calibre fixe qui puisse vérifier la conformité de la pièce aux tolérances géométriques de position exigées et, de plus, l'utilisation du principe du maximum de matière permet de simplifier la conception du calibre fonctionnel. Mais il est difficile de garantir un accord parfait entre les résultats par emploi d'un calibre fonctionnel et les résultats obtenus par les algorithmes des machines à mesurer, car ces derniers se basent sur des mesures ponctuelles alors que le calibre fonctionnel est un vérificateur total.

Pour être vraiment significatives, toutes les mesures décrites précédemment doivent être soumises à une **interprétation statistique qui garantisse leurs limites de confiance**. Une première application des méthodes statistiques peut être faite dans le cadre des calculs des chaînes de tolérances vues au paragraphe 7. L'intérêt des méthodes statistiques est de permettre un élargissement des tolérances de fabrication pour le réglage des machines et pour l'assemblage des pièces dans un ensemble. Les bases générales des techniques à utiliser se trouvent dans l'article *Incertitudes de mesure et tolérances* [R 285] du traité Mesures et Contrôle, de sorte qu'il suffit d'indiquer ici quelques exemples d'application pratique.

À titre d'illustration [20], si on se pose la question de savoir si un **réglage de production** de moyenne initiale $m = 40$ n'a pas varié au cours du temps, on peut considérer la moyenne de la cote d'un échantillon de 17 pièces m_1 (soit $m_1 = 39,99$) avec une dispersion S_1 (soit $S_1 = 0,02$) et vérifier si la moyenne de l'ensemble de la production (soit M_1 , de valeur inconnue) dans un intervalle donné (par exemple, durant une journée) justifie à nouveau un réglage. Par un test de confiance de niveau donné, on peut vérifier que pour un échantillon de 17 pièces, il y a 95 chances sur 100 que la moyenne réelle M_1 de la série se trouve dans un intervalle de confiance $2i$ tel que :

$$m_1 - i = 39,979 \ 4 < M_1 < m_1 + i = 40,000 \ 6$$

Dans l'exemple cité, ce résultat tend à montrer que la production n'est pas décalée, étant donné que la moyenne initiale $m = 40$ est bien comprise dans l'intervalle de confiance.

Sur la base de cette approche, des cartes de contrôle de fabrication [27] ont été développées qui permettent de suivre graphiquement l'évolution d'une fabrication et de procéder à nouveau à des réglages en cas de nécessité (figure 23).

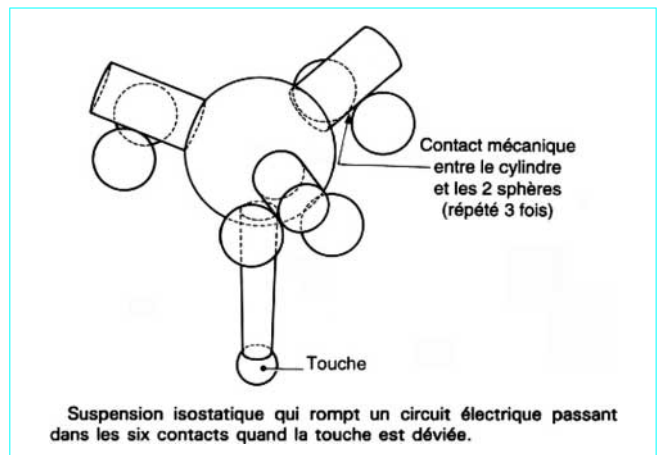


Figure 22 – Principe du palpeur Renishaw [16]

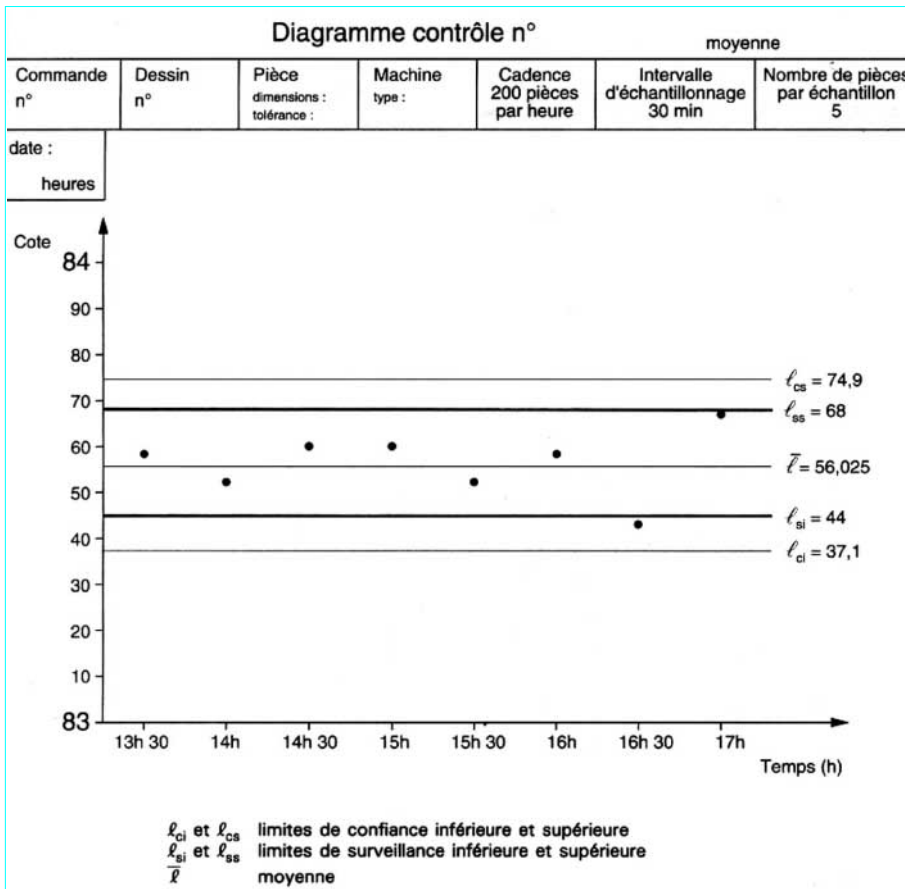


Figure 23 – Exemple de cartes de contrôle statistique de fabrication [27]

Enfin, la **détermination statistique des tolérances qui s'applique à l'assemblage de pièces et aux chaînes de cotes** assure un gain de tolérance que l'on peut va démontrer sur un exemple.

Exemple : soit une chaîne cinématique composée de 4 éléments ayant chacun un écart-type $\sigma_k = 0,02$ en production et dont l'assemblage doit avoir un intervalle de tolérance $IT = 0,24$. La méthode arithmétique impose, pour chaque élément, $IT_k = 0,24/4 = 0,06$, soit un rapport r_k :

$$r_k = \frac{IT_k}{2\sigma_k} = \frac{0,06}{0,04} = 1,5$$

ce qui conduit à éliminer par tri 13,2 % des pièces fabriquées pour une dispersion de type normal et centrée.

Si, en revanche, on applique la règle statistique, on obtient comme écart-type de l'assemblage (pour 4 éléments) :

$$\sigma = 0,02 \cdot \sqrt{4} = 0,04$$

soit un rapport r :

$$r = \frac{0,24}{0,08} = 3$$

ou, pour une dispersion normale et centrée, un pourcentage de rejets de 3 % seulement d'assemblages avec une tolérance de chaque élément doublée (soit $IT_k = 6 \times 0,02 = 0,12$). En outre, on n'est pas tenu de trier la production des éléments individuels.

Ces divers résultats illustrent l'intérêt des méthodes statistiques pour la détermination des tolérances de fabrication et pour le contrôle de fabrication et justifient leur emploi généralisé dans la pratique industrielle.

9. Conclusion

Cette brève revue d'un vaste domaine technique faisant appel à des techniques très variées et en constante évolution a fait sentir l'ampleur du processus d'établissement d'une gamme de fabrication. Aussi l'optimisation technique et économique d'une gamme ressort-elle plutôt de l'art que de la science. Traditionnellement, les préparateurs de fabrication avaient derrière eux une longue expérience, généralement acquise en fabrication, et savaient intégrer leurs connaissances intelligemment sans avoir besoin de recourir à des moyens informatisés. Aujourd'hui où la rotation des personnels est de plus en plus rapide, il va être de plus en plus difficile de trouver des préparateurs de bureau de méthodes expérimentés et restant à leur poste une période prolongée. On doit donc chercher à développer des techniques nouvelles de gammes automatiques, essentiellement basées sur les ressources de l'intelligence artificielle. Au fil des années, des efforts continus dans ce sens se développent dans tous les pays avancés industriellement et donnent lieu à de nombreuses publications qui laissent présager l'apparition de solutions, au moins partielles, aux nombreux problèmes à résoudre par le développement des gammes automatiques CAPP [21].

Conception des gammes d'usinage

par **Roland D. WEILL**

Ingénieur de l'École Polytechnique et de l'École Nationale Supérieure de l'Armement
Professeur Émérite de Génie Mécanique à l'Institut Israélien de Technologie à Haïfa (Israël)

Références bibliographiques

- [1] Enseignement de l'étude de fabrication (Inspection générale des sciences et techniques industrielles sur l'enseignement de la construction et de la fabrication), Techniques Industrielles n° 107, nov. 1979.
- [2] WEILL (R.), SPUR (G.) et EVERSHEIM (W.). – *Survey of Computer-Aided Process Planning Systems*. CIRP Annals, vol. 31/2 (1982).
- [3] KARR (J.). – *Méthodes et Analyses de Fabrication Mécanique*, Dunod (1979).
- [4] WEILL (R.), LEMAITRE (F.) et AGAISE (C.). – *The development of technological data banks for small manufacturing systems*. Proceedings of the CIRP Seminars on Manufacturing Systems, vol. 7/1 (1978).
- [5] MERCIER (J.). – *De l'étude de fabrication à l'analyse d'usinage*. Technique Moderne Pierron (1975).
- [6] WEILL (R.), DAREL (E.) et LALOUM (M.). – *Influence of Positioning Errors in a Fixture on the Accuracy of a Mechanical Part*. CIRP Conference on Precision Engineering and Manufacturing Engineering, Tianjin, China, 12-14 sept. 1991.
- [7] FAINGUELERNT (D.), WEILL (R.) et BOURDET (P.). – *Computer Aided Tolerancing and Dimensioning in Process Planning*. CIRP Annals, vol. 35/1 (1986).
- [8] WEILL (R.). – *Tolerancing for Function*. CIRP Annals, vol. 37/2 (1988).
- [9] TSANG (J.P.). – *Conception Automatique de Gammes d'Usinage*. Point de Vue Intelligence Artificielle. La gamme automatique en usinage Hermès (1990).
- [10] WEILL (R.). – *Optimisation des opérations d'usinage à l'aide de modèles*. Mécanique Matériaux Électricité, fév. 1972.
- [11] BRANGER (G.). – *Guide du Bureau des Méthodes*. Desforges (1978).
- [12] BOURDET (P.). – *Les Chaînes de cotes de fabrication*. L'Ingénieur et le Technicien de l'Enseignement Technique, n° 191, mai-juin 1975.
- [13] DURET (D.). – *Simulation de Gamme d'Usinage*. L'Ingénieur et le Technicien de l'Enseignement Technique, n° 220 et 230, mars-avril 1981.
- [14] BOURDET (P.). – *Cotation de Fabrication*. Cours de l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Cachan (1978).
- [15] LEHTIHET (E.A.) et GUNASENA (N.U.). – *On the Composite Position Tolerance for Patterns of Holes*. CIRP Annals, vol. 40/1 (1991).
- [16] DAVID (J.M.). – *Apports de la machine à mesurer tridimensionnelle dans une politique moderne de cotation et de contrôle dimensionnel des pièces mécaniques*. Bulletin BNM, n° 55, janv. 1984.
- [17] MATTHIEU (L.) et WEILL (R.). – *A Model for Machine Tool Setting as a Function of Positioning Errors*. CIRP International Working Seminar on Computer-Aided Tolerancing, The Pennsylvania State University, 16-17 mai 1991.
- [18] CASTELL (A.) et DUPONT (A.). – *Métrologie appliquée aux fabrications mécaniques*. Desforges (1978).
- [19] BOURDET (P.) et CLEMENT (A.). – *Study of Optimal Criteria Identification Based on the Small Displacement Screw Model*. CIRP Annals, vol. 37/1 (1988).
- [20] TROUSSEU (M.). – *Les statistiques à l'atelier*. Travail et Maîtrise n° 5 et 6, mai-juin-juil. 1974.
- [21] *La Gamme Automatique en Usinage* (texte P. BOURDET et F. VILLENEUVE). Hermès (1990).
- [22] KARR (J.). – *Gammes d'Usinage et Analyses de Phases*. Dunod (1971).
- [23] PADILLA (P.), ANSELMETTI (B.), MATHIEU (L.) et RABOYEAU (M.). – *Production Mécanique*. Génie Mécanique, Dunod (1986).
- [24] PADILLA (P.) et THELY (A.). – *Guide des Fabrications Mécaniques*. Dunod (1978).
- [25] BOURDET (P.) et CLEMENT (A.). – *Optimisation des Montages d'Usinage*. L'Ingénieur et le Technicien de l'Enseignement Technique, juil.-août 1974.
- [26] SOURSOU (G.). – *Calcul de Cotes et Statistiques - Application de la Méthode à la RNUR*. Techniques Industrielles n° 122-123, mai-juin 1981.
- [27] CAVE (R.). – *Le contrôle statistique des fabrications*. Eyrolles (1970).

Normalisation

France

Association Française de Normalisation AFNOR

A 90-510	9-90	Produits de fonderie. Tolérances dimensionnelles des pièces moulées. Surépaisseurs d'usinage (ISO 8062).
NF E 04-013	8-85	Dessins techniques. Dessins d'opérations. Symbolisation des prises de pièces.
NF E 04-557	12-91	Dessins techniques. Cotation et tolérancement. Cones.
NF E 05-051	9-81	États de surface des produits. Moyens de mesure. Échantillons de comparaison viso-tactile (ISO 2632).

Allemagne

DIN Deutsches Institut für Normung eV Deutscher Verband Elektrotechniker VDE

32880/1	12-86	Koordinatenmeßtechnik ; Geometrische Grundlagen und Begriffe.
---------	-------	---

International

International Organization for Standardization ISO

5459	1981	Dessins techniques. Tolérancement géométrique. Références spécifiées et systèmes de références spécifiées pour tolérances géométriques.
------	------	---