

Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface

par **Jacques BOULANGER**
Ingénieur des Arts et Métiers
Métrologies et techniques de contrôle aux Automobiles Peugeot

1. Définitions.....	B 7 010 - 2
2. Tolérances dimensionnelles	— 2
2.1 Tolérances, écarts, jeux.....	— 2
2.2 Ajustements	— 2
2.3 Position et qualité	— 2
2.4 Mesure et contrôle.....	— 3
2.5 Procédés d'élaboration des pièces.....	— 4
2.6 Conclusion.....	— 4
3. Tolérances géométriques.....	— 7
3.1 Ordres de grandeur des écarts.....	— 7
3.2 Symboles utilisés et indications sur les dessins techniques	— 8
3.3 Principes de cotation	— 8
3.3.1 Principe de l'enveloppe.....	— 8
3.3.2 Principe de l'indépendance.....	— 8
3.3.3 Principe du maximum de matière.....	— 11
3.3.4 Zone de tolérance projetée.....	— 11
3.4 Relation entre les écarts géométriques et la fonction des pièces	— 12
3.5 Mesure des écarts de forme	— 12
3.6 Conclusion.....	— 14
4. États de surface.....	— 14
4.1 Introduction.....	— 14
4.2 Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe	— 15
4.3 Paramètres liés à la ligne moyenne.....	— 15
4.4 Paramètres liés à la distribution d'amplitude	— 19
4.5 Spécification des états de surface sur les dessins.....	— 19
4.6 Relation entre les paramètres d'état de surface et la fonction des pièces. Procédés d'élaboration.....	— 21
4.7 Mesure des états de surface	— 21
4.8 Évolution des normes d'état de surface	— 22
4.9 Conclusion.....	— 22
Pour en savoir plus.....	Doc. B 7 010

Le présent article constitue une refonte de l'article **Tolérances. États de surface** de A. Grandadam, ingénieur au CETIM.

1. Définitions

■ Forme et dimensions nominales

Une pièce industrielle est définie par les bureaux d'études afin d'assurer une fonction déterminée à un prix de revient minimal. À partir d'un cahier des charges fonctionnel, le concepteur choisit les solutions techniques et définit le dessin d'ensemble, puis le dessin de définition, qui permettra ensuite aux services des méthodes de choisir le procédé d'élaboration et le moyen de vérification (articles *Interchangeabilité dimensionnelle* [R 1 210] dans le traité Mesures et Contrôle et *Cotation fonctionnelle* [BM 7 020] dans ce traité).

Une pièce est ainsi définie par :

- sa **forme nominale**, limitée par des surfaces géométriques simples (plans, cylindres, cônes, etc.) ou complexes (par exemple, surfaces de Bézier) et **définie soit par des dessins conventionnels, soit par des équations mathématiques** dans le cas de la conception assistée par ordinateur (CAO) ;
- ses **dimensions nominales, définies par des valeurs numériques** (appelées aussi **cotes** sur les dessins).

■ Tolérances dimensionnelles

Compte tenu de l'imprécision inévitable des moyens d'élaboration, une pièce ne peut être réalisée à une dimension rigoureuse fixée d'avance. Afin que cette pièce puisse répondre à sa fonction, il suffit que sa **dimension soit comprise entre deux limites admissibles dont la différence constitue la tolérance dimensionnelle**.

La vérification de cette pièce s'effectue soit en calculant l'écart entre la dimension mesurée et la dimension nominale, soit en utilisant des calibres à limites décrits au paragraphe 2.

■ Tolérances géométriques

De même que ses dimensions nominales ne peuvent être réalisées parfaitement, la forme nominale d'une pièce ne peut être parfaite, et il peut être nécessaire pour la fonction de limiter aussi par des tolérances ses **écarts de forme** (par exemple, planéité pour une glissière, cylindricité pour des axes de rotation, etc.), ainsi que l'**orientation** (parallélisme, perpendicularité, etc.) et la **position** des surfaces entre elles (localisation, coaxialité, symétrie pour des pièces destinées à s'assembler, etc.). Pour les pièces en rotation, le **battement** permet de limiter l'ensemble de ces trois clauses par rapport à l'axe de rotation.

L'ensemble de ces tolérances de forme, d'orientation, de position et de battement constitue les tolérances géométriques. Les écarts correspondants sont appelés **écarts du premier ordre**.

■ Tolérances d'états de surface

Alors que les tolérances dimensionnelles et géométriques s'appliquent en général à l'ensemble de la surface, il est souvent nécessaire de limiter aussi les écarts microgéométriques de surface (appelés couramment **états de surface**) que l'on observe en agrandissant l'échelle d'observation :

- l'**ondulation** influe sur l'aspect et l'étanchéité. C'est, par exemple, la *peau d'orange* des surfaces peintes, le grain des surfaces sablées, les facettes de pièces rectifiées, etc. L'ondulation constitue les **écarts du deuxième ordre** ;
- la **rugosité** est en général *sensible à l'ongle* et influe sur le frottement, l'usure, etc. La rugosité constitue les **écarts du troisième ordre**.

Nous ne traiterons pas dans cet article des piqures, arrachements, ni de la microrugosité et de la structure cristallographique visibles au microscope électronique, qui constituent les écarts du quatrième et du cinquième ordre.

2. Tolérances dimensionnelles

2.1 Tolérances, écarts, jeux

Les valeurs des dimensions limites de la pièce réelle sont fixées par les *écarts extrêmes que la dimension réelle peut présenter par rapport à la cote nominale*, ces écarts pouvant être positifs, nuls ou négatifs (figure 1).

La **tolérance dimensionnelle** t est la spécification qui définit la variation admissible de dimension d'un élément. Elle est égale à la différence entre la dimension maximale D_M et la dimension minimale D_m de cet élément (arbre ou alésage). La **zone de tolérance** est la portion d'espace à l'intérieur de laquelle doit se situer l'élément considéré.

Le **jeu** maximal J_M est égal à la différence entre la dimension maximale D_M de l'alésage et la dimension minimale D_m de l'arbre, tandis que le jeu minimal J_m est égal à la dimension minimale D_m de l'alésage moins la dimension maximale D_M de l'arbre :

$$J_M = D_M (\text{alésage}) - D_m (\text{arbre})$$

$$J_m = D_m (\text{alésage}) - D_M (\text{arbre})$$

L'unité courante des dimensions linéaires des dessins de construction mécanique, électrique et électronique est le millimètre.

La température normale de référence des mesures dimensionnelles est fixée à 20 °C.

2.2 Ajustements

Dans le cas de deux pièces ajustées, les écarts et les tolérances sur chacune d'elles doivent être déterminés pour donner dans les cas extrêmes un jeu techniquement admissible.

Suivant la position respective des zones de tolérance de l'alésage et de l'arbre, l'ajustement peut être **avec jeu**, **incertain** ou **avec serrage** (figure 1).

2.3 Position et qualité

Pour pouvoir satisfaire à tous les besoins courants, il est prévu pour chaque dimension nominale, d'une part, une gamme d'écarts et, d'autre part, une gamme de tolérances. Elles sont définies par les normes NF E 02-100 Généralités, NF E 02-101 à 02-118 pour les dimensions jusqu'à 500 mm et par les normes NF E 02-120 à 02-122 pour les dimensions au-delà de 500 mm et jusqu'à 3 150 mm.

Les **écarts définissant la position de la tolérance** par rapport à la ligne d'écart nul, dite *ligne zéro*, fonction de la dimension nominale sont symbolisés par une lettre (ou parfois par deux lettres) majuscule pour les alésages et minuscule pour les arbres (figure 2).

La **tolérance**, dont la valeur est fonction de la dimension nominale, est symbolisée par un numéro dit **qualité**.

La dimension tolérancée est ainsi définie par sa valeur nominale suivie d'un **symbole** comprenant une – ou deux – lettres et un numéro.

Exemple :

45 g 7 (arbre) ou 45 G 7 (alésage)
avec 45 mm cote nominale,
g ou G position,
7 qualité.

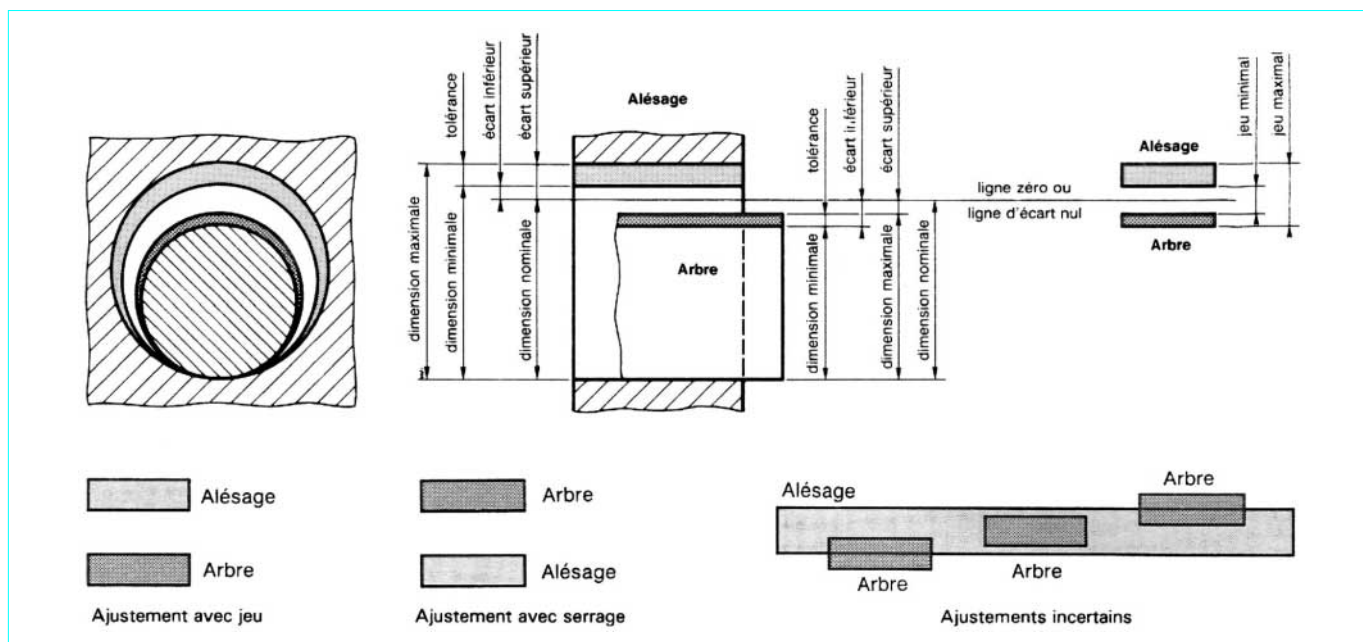


Figure 1 – Dimensions, écarts, tolérances, jeux et ajustements

Il est prévu plusieurs qualités : 18 pour les dimensions jusqu'à 500 mm et 11 seulement de 500 à 3 150 mm, correspondant aux tolérances fondamentales et appelées IT 01, IT 0, IT 1 à IT 16.

Pour les qualités 5 à 16, les valeurs numériques des tolérances fondamentales sont déterminées à partir de l'unité de tolérance i (exprimée en μm) en fonction de la dimension nominale D (exprimée en mm) par la formule :

$$i = 0,45 \sqrt[3]{D} + 0,001 D$$

On a, par exemple, IT 6 = 10 i et IT 7 = 16 i , etc.

Pour les qualités 01, 0 et 1, les valeurs fondamentales sont calculées par les formules suivantes :

$$\text{IT } 01 = 0,3 + 0,008 D$$

$$\text{IT } 0 = 0,5 + 0,012 D$$

$$\text{IT } 1 = 0,8 + 0,020 D$$

Pour les qualités 2 à 4, les valeurs sont approximativement échelonnées en progression géométrique entre les valeurs IT 1 à IT 5.

Ces différentes valeurs exprimées en micromètres sont données par le tableau 1, suivant les normes conformes à la recommandation ISO R 286.

2.4 Mesure et contrôle

La mesure des dimensions d'une pièce relève de la métrologie (rubrique *Mesures dimensionnelles* dans le traité Mesures et Contrôle). Dans l'industrie, on utilise couramment les **calibres dits**

à limites, se présentant sous forme de mâchoires pour les pièces mâles et de tampons lisses ou jauges plates pour les pièces femelles. Le calibre ENTRE ou maxi doit passer et le calibre N'ENTRE PAS ou mini ne doit pas passer pour les pièces mâles et inversement pour les pièces femelles (figure 3).

Afin de garantir au maximum le respect des exigences fonctionnelles des ajustements, ces calibres exécutés avec beaucoup de soin, suivant des tolérances très réduites, au moins un quart de la tolérance pièce (d'après NF E 02-204), doivent demeurer stables dans le temps.

Il existe différents types de calibres *à limites* (par exemple, bague lisse, broche à bouts sphériques) dont les domaines d'application (tableau 2) et les tolérances d'exécution sont fixés par les normes NF E 02-200 à 02-203.

Remarque : l'emploi de ces calibres est déconseillé pour les qualités plus précises que IT 6 et pour les grandes dimensions : on doit alors utiliser des instruments de mesure à lecture.

Il faut toutefois noter que le développement de la démarche qualité dans les entreprises se traduit par la **recherche de la maîtrise du processus de production** : la mesure participe au plan de surveillance afin de détecter les dérives avant la production de pièces défectueuses, évitant ainsi le « contrôle-tri » et les retouches coûteuses.

Les **instruments de mesure** se développent donc, même dans les ateliers, avec l'application du **contrôle statistique intégré**, dont l'extension est permise par l'utilisation de micro-ordinateurs pour l'exploitation des résultats.

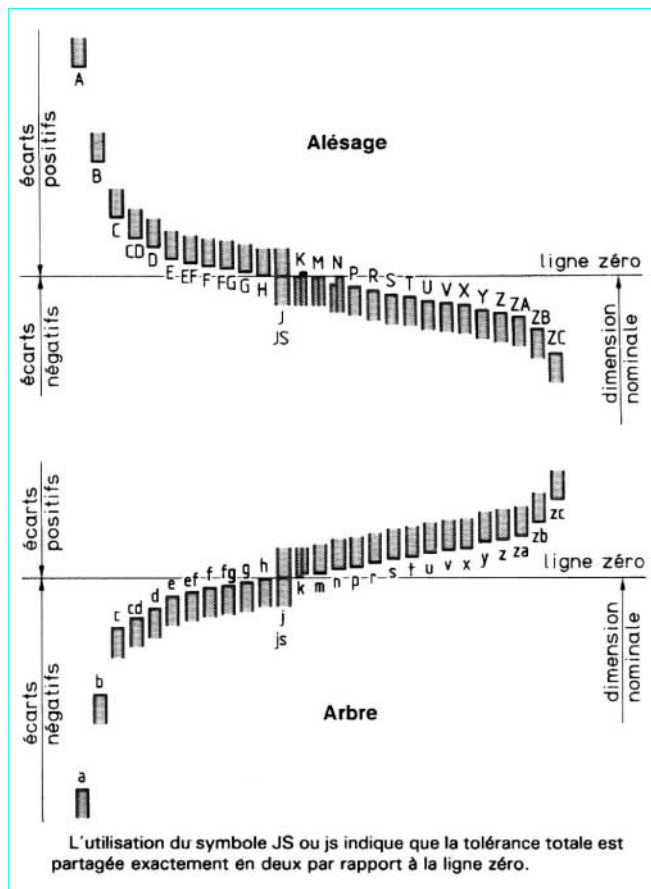


Figure 2 – Positions respectives des zones de tolérance dans un palier de diamètre donné

Les **machines à mesurer tridimensionnelles** permettent de mesurer plus facilement des pièces complexes, mais leur palpeur électronique réalise des mesures ponctuelles, ce qui peut, dans le cas de déterminations de grande précision, donner des résultats légèrement différents de ceux des calibres à limites, si la pièce présente des écarts de forme importants.

Une attention toute particulière doit être portée sur l'importance des incertitudes de mesure (NF E 02-204 et NF X 06-044).

2.5 Procédés d'élaboration des pièces

Le choix du procédé d'élaboration est fait par le bureau des méthodes en fonction du niveau de qualité souhaité, d'une part, et du parc machines, d'autre part. Du choix de ce procédé d'élaboration dépendent la précision des dimensions réalisées, mais aussi les écarts géométriques et l'état des surfaces (tableau 3, donné à titre indicatif). Le procédé d'élaboration étant retenu, il ne faut pas négliger pour autant le bridage, la flexion, les traitements thermiques, les revêtements, etc. qui peuvent provoquer des déformations sur les pièces.

2.6 Conclusion

Ce système de tolérancement géométrique est universellement connu et appliqué. Cependant, l'aptitude fonctionnelle d'une pièce ou d'un ajustement donné n'est pas déterminée uniquement par la précision de ses dimensions. Elle dépend aussi des écarts géométriques et de l'état de surface, objet des paragraphes suivants.

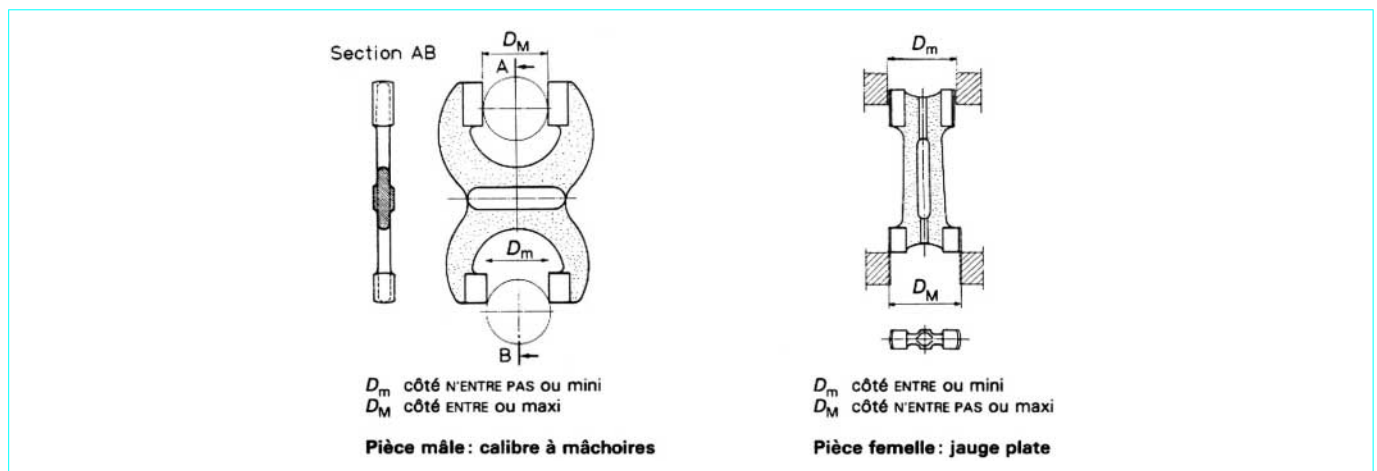


Figure 3 – Calibres à limites

Tableau 1 – Valeurs des tolérances fondamentales (en μm) en fonction des dimensions (en mm)

Dimension	Qualité IT																	
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 (1)	15 (1)	16 (1)
≤ 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
> 3 à 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
> 6 à 10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
> 10 à 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1 100
> 18 à 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1 300
> 30 à 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1 000	1 600
> 50 à 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1 200	1 900
> 80 à 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1 400	2 200
> 120 à 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1 000	1 600	2 500
> 180 à 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1 150	1 850	2 900
> 250 à 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1 300	2 100	3 200
> 315 à 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1 400	2 300	3 600
> 400 à 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1 550	2 500	4 000
> 500 à 630								44	70	110	175	280	440	700	1 100	1 750	2 800	4 400
> 630 à 800								50	80	125	200	320	500	800	1 250	2 000	3 200	5 000
> 800 à 1 000								56	90	140	230	360	560	900	1 400	2 300	3 600	5 600
> 1 000 à 1 250								66	105	165	260	420	660	1 050	1 650	2 600	4 200	6 600
> 1 250 à 1 600								78	125	195	310	500	780	1 250	1 950	3 100	5 000	7 800
> 1 600 à 2 000								92	150	230	370	600	920	1 500	2 300	3 700	6 000	9 200
> 2 000 à 2 500								110	175	280	440	700	1 100	1 750	2 800	4 400	7 000	11 000
> 2 500 à 3 150								135	210	330	540	860	1 350	2 100	3 300	5 400	8 600	13 500

(1) Les qualités 14 à 16 ne sont prévues qu'au-delà de 1 mm.

Tableau 2 – Domaine d'application des calibres à limites

Dimension nominale		jusqu'à 120 mm	> 120 à 315 mm	> 315 à 500 mm
pour alésage	côté ENTRE	tampons cylindriques (ou éventuellement jauges plates à bouts sphériques)	jauges plates cylindriques	broches à bouts sphériques
	côté N'ENTRE PAS	disques sphériques ou jauges plates réduites (ou éventuellement broches à bouts sphériques) (1)		
pour arbre	côté ENTRE	calibres à mâchoires (ou bagues cylindriques aux petites dimensions)		instruments à lecture (2)
	côté N'ENTRE PAS	calibres à mâchoires		

(1) Par exception, tampons cylindriques jusqu'à 6 mm.

(2) Les calibres à mâchoires ne s'emploient pratiquement pas aux grandes dimensions.

Tableau 3 – Qualité dimensionnelle, écarts géométriques et rugosité obtenus avec différents procédés d'élaboration des pièces

Dimensions	Fonction des surfaces.....	sans contact	contact fixe	centrage contact mobile guidage	étanchéité trajectoire précise	Abréviation	Écarts géométriques (mm)									
	Nature des surfaces	brute	précision moyenne	bonne précision	haute précision											
	Qualité IT	16-15-14- 13-12	11-10-9	8-7-6	5-4-3-2-1-0-01											
Rugosité	Aspect.....	terne	gris acier		brillant	glacé	///	⊥	⊙	∕						
	Anciens signes de façonnage	~	▽	▽▽	▽▽▽											
	Qualité	grossière		moyenne	fine	très fine										
	N° classe (ISO 1302).....	N11	N10	N9	N8	N7					N6	N5	N4	N3	N2	N1
	R (µm)	120	55	27	12	5,7					2,8	1,4	0,6	0,25	0,1	0,05
	Ra (µm).....	25	12,5	6,3	3,2	1,6					0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025
moulage au sable.....							mos									
moulage cire perdue shaw.....							mo									
moulage moule métallique																
moulage sous pression																
matriçage à chaud.....							ma									
laminage filage extrusion à chaud.....							lac									
laminage tréfilage extrusion à froid...							laf									
sciage							sc									
oxycoupage.....																
frittage								0,02		0,02						
rabotage							rb	0,05	0,1		0,1					
fraisage acier rapide							fr	0,05-0,01	0,03	0,005-0,02	0,01					
fraisage carbure								0,02-0,01	0,02		0,01					
tournage ébauche							to									
tournage finition								0,02-0,01	0,02	0,005-0,01	0,01					
tournage outil diamant carbure.....								0,01	0,02	0,01	0,01					
perçage au foret							pe	0,2	0,1	0,1	0,1					
alésage à l'outil.....							al	0,005	0,01	0,01	0,01					
alésage à l'alésoir																
alésage outil diamant carbure																
brochage.....							br	0,002		0,002						
taillage																
rectification ébauche							rc									
rectification de production.....																
rectification de précision								0,001	0,001	0,002	0,002					
rodage à la pierre (honing)							pi	0,0005	0,001	0,002	0,002					
rodage au rodoir (lapping).....							rd									
polissage mécanique.....							po									
polissage électrolytique							ep									
superfinition							sf	0,0005	0,001	0,005	0,002					
usinage électrolytique							ée									
galetage							ga									
finition au tonneau																

valeurs économiques

valeurs possibles

■ valeurs économiques

□ valeurs possibles

3. Tolérances géométriques

Il est souvent nécessaire, pour remplir la fonction de la pièce, que la forme géométrique de la surface et sa position par rapport à d'autres surfaces fonctionnelles soient spécifiées avec plus de précision : c'est le rôle des tolérances de forme, d'orientation, de position et de battement.

Les **tolérances de forme** délimitent les déviations d'un élément individuel de sa forme géométrique idéale.

Les **tolérances d'orientation, position et battement** délimitent les déviations d'orientation et/ou de position relative de deux ou plusieurs éléments. Par rapport à une référence fonctionnelle, un ou plusieurs éléments peuvent être indiqués. La forme d'un élément

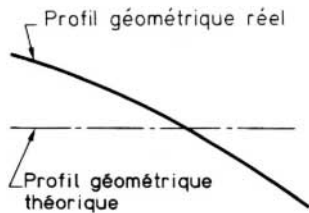
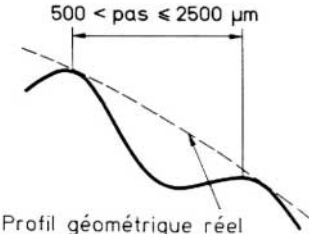
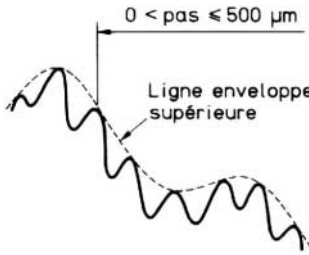
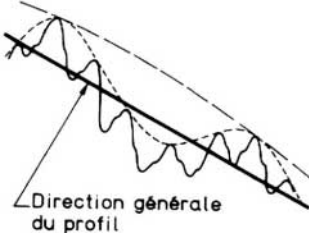
de référence doit être suffisamment précise pour qu'il puisse être utilisé comme tel ; il est nécessaire d'indiquer des tolérances de forme pour les éléments de référence.

3.1 Ordres de grandeur des écarts

Les écarts géométriques sont, par définition, d'ordre de grandeur supérieur aux irrégularités géométriques de surface appelées états de surface, comprenant la rugosité et l'ondulation (tableau 4).

Alors que les *états de surface sont mesurés sur une longueur d'évaluation limitée* (généralement de quelques millimètres à 50 mm), les *écarts géométriques sont mesurés sur toute la longueur de la surface considérée* (sauf spécification particulière portée au plan).

Tableau 4 – Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques [4]

Numéro d'ordre	Type d'irrégularités	Croquis	Origines possibles
1	Écarts géométriques Défauts de planéité ; de rectitude ; de circularité ; de cylindricité, etc.		Qualité de la machine. Fixation imparfaite de la pièce ou de l'outil. Déformation en cours de travail de la pièce ou de l'outil.
2	Ondulation Irrégularités géométriques telles que la distance entre deux sommets d'irrégularités soit comprise entre 500 µm et 2 500 µm (1).		Vibrations de basse fréquence de la pièce, de l'outil ou des deux. Avance par tour de fraise quand celle-ci est comprise entre 0,5 et 2,5 mm.
3	Rugosité Irrégularités géométriques telles que la distance entre deux pics de ces irrégularités soit comprise entre 0 et 500 µm (1).		Trace géométrique de l'outil : avance par tour (tournage) ou avance par dent (fraisage) si celles-ci sont comprises entre 0 et 0,5 mm. Trace des grains de meulage, de grenailage, etc.
	Profil total (somme des écarts)		Ensemble des écarts de profil dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une ou plusieurs fonctions données.

(1) Limites données pour l'automobile.

Il sera donc nécessaire d'éliminer les écarts du deuxième et du troisième ordre par filtrage mécanique, électrique ou mathématique.

Les limites pour la séparation entre l'ondulation et les écarts géométriques ne sont pas normalisées. Les appareils de circularité permettent de filtrer électriquement un certain nombre d'ondulations par tour, tandis que les touches à pointe sphérique ou toroïdale permettent de filtrer mécaniquement la rugosité. La norme NF E 10-103 préconise d'utiliser une touche de rayon « aussi grand que possible ».

En attendant que cette lacune de la normalisation soit comblée, il est donc indispensable que toute mesure géométrique soit accompagnée des conditions de filtrage ou de séparation.

3.2 Symboles utilisés et indications sur les dessins techniques

Les définitions, symboles et inscriptions sont donnés par les normes françaises et ISO citées dans la fiche documentaire [Doc. B 7 010]. Le lecteur pourra s'y reporter utilement pour plus de précision, car nous avons constaté que de nombreux problèmes et litiges étaient dus à une méconnaissance de ces normes aussi bien par les concepteurs que par les métrologues (tableau 5).

La tolérance géométrique se rapporte toujours à la totalité de l'élément tolérancé, sauf autres spécifications, par exemple : 0,02/50 signifie qu'une tolérance de 0,02 mm est permise pour toute longueur de 50 mm placée à n'importe quel endroit de l'élément tolérancé.

Si une tolérance géométrique s'applique à l'axe ou à un plan médian, la ligne de repère est terminée par une flèche aboutissant dans le prolongement de la ligne de cote (figure 4a).

Si la tolérance géométrique s'applique à la ligne ou à la surface elle-même, la ligne de repère terminée par une flèche aboutissant sur le contour de l'élément doit être clairement séparée de la ligne de cote (figure 4a).

La même méthode d'indication est utilisée pour le triangle de référence.

La figure 4b donne un exemple uniquement dans un but pédagogique.

Ces tolérances ne doivent figurer sur le dessin que si elles répondent réellement à une nécessité fonctionnelle, car des spécifications de valeurs inutilement serrées augmentent le coût de la production.

Les termes du tableau 6 sont à proscrire, car ils ne correspondent pas à des définitions normalisées. Nous donnons, à titre d'information, les termes normalisés à utiliser à la place de ces anciennes notions. Certaines d'entre elles, repérées par un astérisque, peuvent cependant être utilisées comme complément qualitatif des termes normalisés.

3.3 Principes de cotation

Selon le **principe de l'enveloppe**, les tolérances dimensionnelles définissent deux surfaces enveloppes entre lesquelles doit être comprise la surface réelle : **d'après les normes française actuelles, c'est ce principe qui s'applique si aucune spécification particulière n'est portée au plan**. Le principe du maximum de matière est un cas particulier que nous développerons au paragraphe 3.3.3. Cependant, il n'est pas toujours nécessaire, pour la fonction de la pièce, de lier la tolérance dimensionnelle et la tolérance de forme : il est alors possible d'utiliser le **principe de l'indépendance** comme expliqué plus loin.

Nota : dans les normes ISO, c'est le principe de l'indépendance qui s'applique sauf spécification particulière.

3.3.1 Principe de l'enveloppe

Selon ce principe, **les écarts de forme et les écarts dimensionnels sont liés**, l'ensemble de ces écarts ne devant pas dépasser l'enveloppe théorique donnée par la tolérance dimensionnelle portée au plan (figure 5). Ce principe limite seulement la forme de l'entité et n'affecte pas l'orientation, la position et le battement. **Il est particulièrement adapté à la cotation des pièces destinées à s'assembler**.

Ce principe correspond au contrôle par calibre ENTRE - N'ENTRE PAS. Pour vérifier l'alésage, le tampon ENTRE devrait avoir théoriquement une forme cylindrique parfaite de diamètre égal au diamètre minimal de l'alésage et de longueur égale à celle de cet alésage ; le tampon N'ENTRE PAS serait réduit à deux pointes dont la distance correspondrait au diamètre maximal de l'alésage (principe de Taylor et d'Aboville).

3.3.2 Principe de l'indépendance

Selon ce principe, **les tolérances dimensionnelles et les tolérances géométriques (écarts de forme) sont totalement indépendantes**. En conséquence, les tolérances géométriques et dimensionnelles doivent être spécifiées et mesurées séparément (figure 5). Ce principe est **destiné à coter les éléments non destinés à s'assembler et les éléments de grande longueur**. Il s'applique dans les cas où la dimension elle-même a moins d'importance fonctionnelle que l'écart de forme.

Tout dessin coté suivant le principe de l'indépendance doit comporter dans ou près du cartouche la spécification « *cotation suivant le principe de l'indépendance selon la norme EXP E 04-542, sauf cotes notées (E)* » (les cotes notées (E) étant cotées suivant le principe de l'enveloppe).


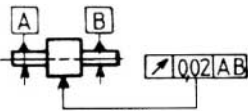
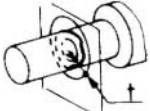

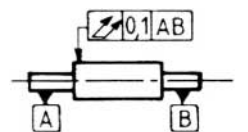
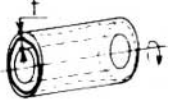
Pour plus de détails sur ces deux principes, le lecteur pourra se reporter aux normes E 04-541 et E 04-542, dont la remarque suivante est extraite :

« Une même indication sur les dessins entraîne des interprétations différentes suivant le principe considéré donc des pièces différentes bien que conformes à l'un ou l'autre principe. Par ailleurs, l'ensemble des dessins réalisés jusqu'à maintenant l'a été en suivant une règle proche du principe de l'enveloppe. Il est prudent d'analyser l'opportunité de changer le système de raisonnement antérieurement adopté, le principe retenu devant par ailleurs être le mieux adapté aux exigences fonctionnelles. »

Tableau 5 – Tolérancement géométrique (d'après NF E 04-552)

Symboles et caractéristiques à tolérer			Exemples d'indication et d'interprétation		
			Indication sur le dessin	Zone de tolérance	Interprétation
Tolérances de forme	Éléments isolés	— Rectitude d'une ligne ou d'un axe			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de la tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de 0,03 de diamètre.
		□ Planéité d'une surface			La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05.
		○ Circularité d'un disque, d'un cylindre, d'un cône, etc.			Le pourtour de chaque section droite doit être compris dans une couronne circulaire de largeur 0,02.
		⊘ Cylindricité			La surface considérée doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de 0,05.
	Éléments isolés ou associés	⌒ Forme d'une ligne quelconque (profil ou contour)			Dans chaque section parallèle au plan de la projection, le profil considéré doit être compris entre deux lignes enveloppes des cercles de diamètre 0,04 dont les centres sont situés sur une ligne avant le profil géométrique correct.
		⌒ Forme d'une surface quelconque			La surface considérée doit être comprise entre deux surfaces enveloppes des sphères de diamètre 0,03 dont les centres sont situés sur une surface ayant la forme géométrique théorique.
Tolérances d'orientation	Éléments associés	// Parallélisme d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite de référence ou un plan de référence			L'axe supérieur doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 parallèle à l'axe inférieur A (droite de référence).
		⊥ Perpendicularité d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris entre deux droites parallèles distantes de 0,06 perpendiculaires au plan de référence et se trouvant dans le plan indiqué sur le dessin.
		∠ Inclinaison d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence			L'axe du trou doit être compris entre deux droites parallèles distantes de 0,1 et formant avec le plan de référence un angle de 60°.
Tolérances de position	Éléments associés	⊕ Localisation de lignes, axes ou surfaces entre eux ou par rapport à un ou plusieurs éléments			L'axe du trou doit être compris dans une zone cylindrique d'un diamètre de 0,05 dont l'axe est dans la position théorique spécifique de la ligne.
		◎ Coaxialité (concentricité) d'un axe ou d'un point par rapport à un axe ou un point de référence			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,03 coaxiale à l'axe commun de référence A.
		≡ Symétrie d'un plan médian ou d'une ligne médiane (axe) par rapport à une droite ou un plan de référence			Le plan médian de la rainure doit être compris entre deux plans parallèles distants de 0,06 et disposés symétriquement par rapport au plan médian de l'élément de référence A.

Tableau 5 – Tolérancement géométrique (d’après NF E 04-552) (suite)

Symboles et caractéristiques à tolérer			Exemples d’indication et d’interprétation		
			Indication sur le dessin	Zone de tolérance	Interprétation
Tolérances de battement	Éléments associés	 Battement simple d’un élément sur l’axe de révolution			Le battement simple radial ne doit pas dépasser 0,02 dans chaque plan de mesure pendant une révolution complète autour de l’axe de référence A-B.
		 Battement total d’un élément sur l’axe de révolution			Le battement total radial ne doit pas dépasser 0,1 en chaque point de la surface spécifiée durant plusieurs révolutions autour de l’axe de référence A-B et avec un mouvement axial relatif entre la pièce et l’instrument de mesure. Le mouvement doit être guidé le long d’une ligne de contour de forme théoriquement parfaite, étant en position correcte par rapport à l’axe de référence.

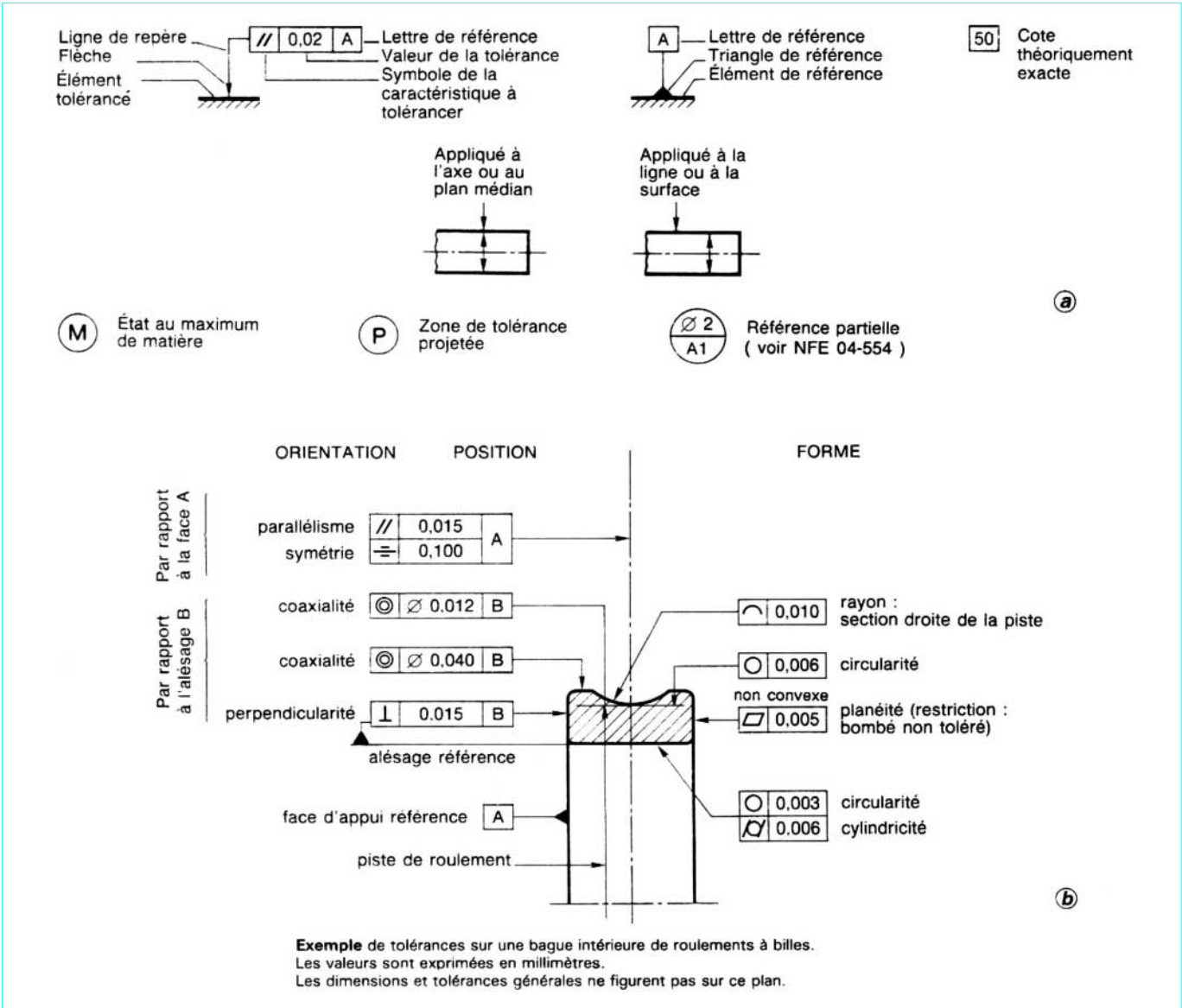


Figure 4 – Dessins techniques avec un exemple de tolérances

Tableau 6 – Termes anciennement utilisés pour désigner les écarts géométriques
(d'après guide CNOMO GE 40-009 N, avril 1991)

Anciens termes	Signification (correspondance avec nouvelle appellation)	Facteur de conversion (à titre indicatif)	Cotation recommandée avec les normes actuelles
Faux-rond (2)	Battement simple radial en une ou plusieurs sections	= battement simple	Battement simple ou total, radial ou oblique
Voilage	Battement simple axial en une ou plusieurs sections	= battement simple	Battement simple axial, battement total axial, perpendicularité
Conicité d'un cylindre	Différence de deux diamètres dans des sections différentes	1 × parallélisme 2 × cylindricité 2 × battement total	Parallélisme de génératrices, cylindricité, battement total radial
Diabolo (1) Tonneau (1)	Comparaison de diamètres dans trois sections différentes	2 × cylindricité 2 × rectitude 2 × battement total	Cylindricité, battement total radial, rectitude d'une génératrice
Concavité (1) Convexité (1) Gauchissement Vrillage Ondulation	D'un plan : planéité D'une ligne : rectitude	= planéité ou rectitude	Planéité ou rectitude
Déformation polygonale Ovalisation Triangulation	Circularité	dépend de la méthode de mesure	Circularité
Excentrage		= 1/2 concentricité	Concentricité
Désaxage		= 1/2 coaxialité	Coaxialité
Déport	Symétrie	= 1/2 symétrie	Symétrie
Flèche	Rectitude	= rectitude	Rectitude d'un axe

(1) Termes pouvant être utilisés en complément qualitatif des termes normalisés.

(2) Dans certains cas, le concepteur utilisait le terme faux-rond pour désigner une concentricité.

Si les écarts de forme et de position sont fonctionnellement importants, les services d'études doivent spécifier ceux-ci sur le plan. Sinon, quand il n'y a pas de clause de forme et de position portée au plan, suivant la norme EXP E 04-541 : « à défaut d'indication de norme, les dessins seront interprétés selon le principe de l'enveloppe ». Donc, dans ce cas, la surface de l'élément ne devra pas dépasser l'enveloppe de forme parfaite de dimension égale à la dimension maximale, et aucune dimension locale ne devra être inférieure à la dimension minimale.

— pour les éléments contenant ou alésages :

$$\text{Dimension de l'enveloppe virtuelle} = \text{Limite minimale de dimension} - \text{Tolérance géométrique}$$

Ce principe permet d'accepter une valeur de défaut géométrique plus grande si la dimension de la pièce, tout en restant dans la tolérance, est différente de la dimension au maximum de matière. Pour un arbre, par exemple :

$$\text{Valeur maximale admissible du défaut géométrique} = \text{Dimension de l'enveloppe virtuelle} - \text{Dimension effective de l'élément considéré}$$

Il permet le contrôle d'une spécification géométrique à l'aide d'un calibre de dimension fixe (figure 6).

3.3.4 Zone de tolérance projetée

La zone de tolérance projetée est une zone qui s'étend au-delà de l'élément considéré de telle façon que la tolérance géométrique spécifiée soit appliquée sur l'élément et son **prolongement** ou sur le prolongement seulement.

3.3.3 Principe du maximum de matière

Le principe du maximum de matière est un **principe fonctionnel qui permet d'accepter des écarts géométriques plus importants** si la dimension de la pièce n'atteint pas la limite maximale pour un arbre ou la limite minimale pour un alésage. **Il s'applique bien à la fonction de montabilité** (aptitude à pouvoir s'assembler). Ce principe définit une surface limite acceptable, appelée *enveloppe virtuelle*, pour chaque élément toléré. Une pièce est à son maximum de matière lorsque sa masse est maximale tout en respectant les tolérances spécifiées.

La dimension de cette enveloppe virtuelle est donc :

— pour les éléments contenus ou arbres :

$$\text{Dimension de l'enveloppe virtuelle} = \text{Limite maximale de dimension} + \text{Tolérance géométrique}$$

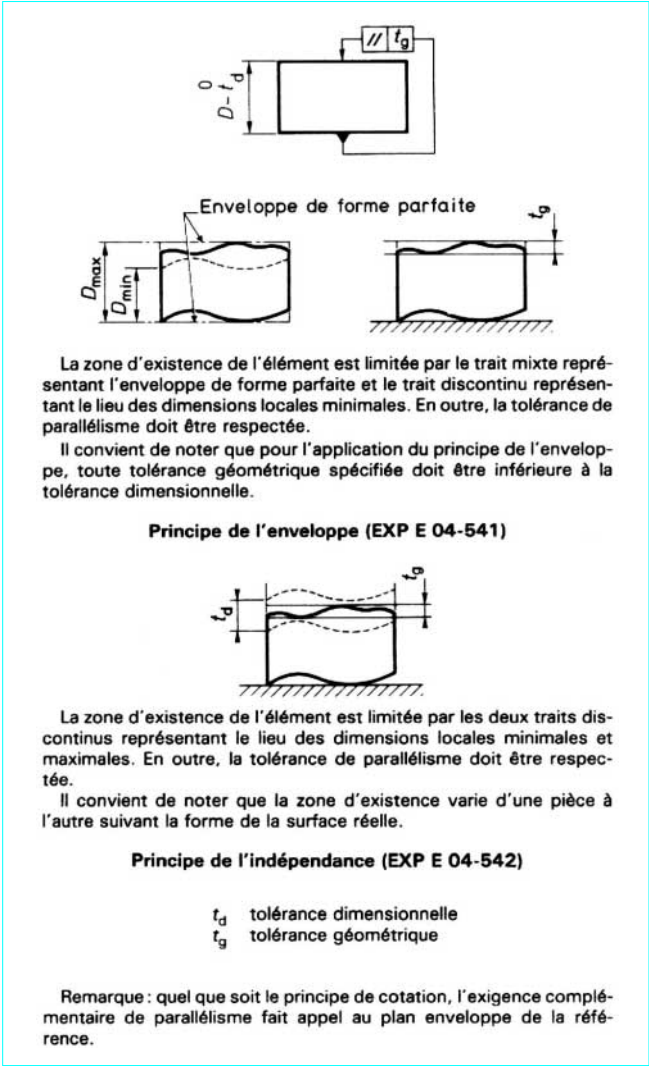


Figure 5 – Comparaison entre le principe de l'enveloppe et le principe de l'indépendance

Ce mode de tolérancement s'applique aux tolérances géométriques d'orientation, de position et de battement, lorsque c'est le prolongement de l'élément qui est fonctionnel (figure 7), par exemple lorsqu'il est amené à recevoir une pièce intermédiaire (vis, goujon, clavette, etc.).

3.4 Relation entre les écarts géométriques et la fonction des pièces

Les services d'études doivent spécifier si nécessaire les tolérances géométriques et l'application du principe de l'enveloppe ou de l'indépendance, selon la fonction de la pièce. Le tableau 7 constitue un guide pour ce choix ainsi que pour celui de la méthode de mesure. Il n'est donné qu'à titre indicatif.

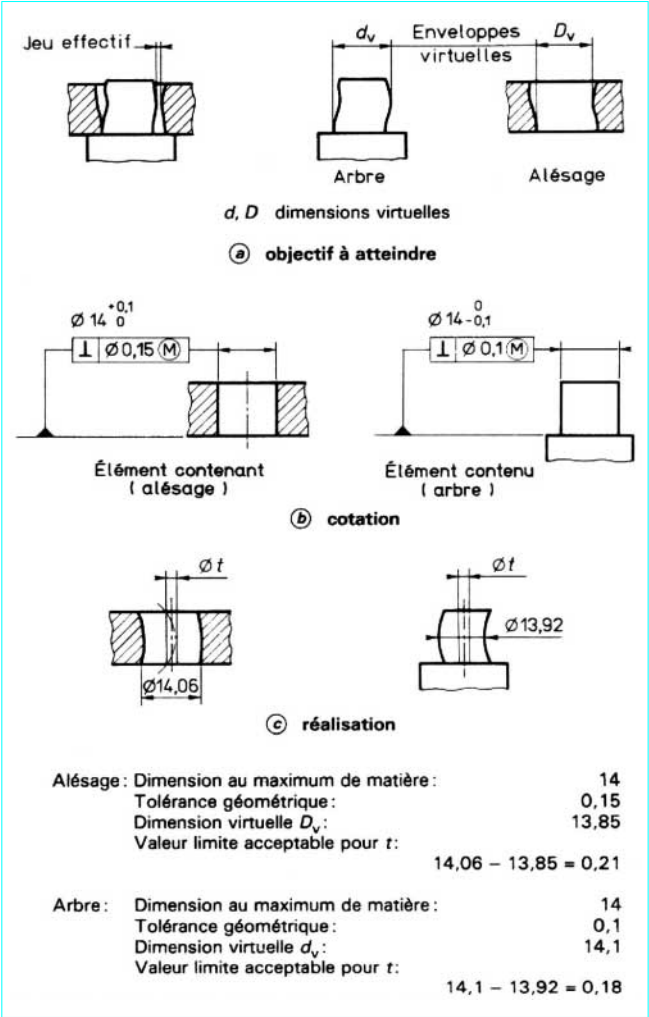


Figure 6 – Principe du maximum de matière [1]

3.5 Mesure des écarts de forme

Les normes de tolérancement géométrique définissent d'une façon purement géométrique et théorique les limites des écarts admissibles (deux surfaces parallèles distantes de t , cylindre de diamètre t , etc.) sans préjuger du processus de mesure ou de contrôle.

En pratique, toutes les méthodes de mesure introduisent une **erreur de méthode** plus ou moins importante, la méthode choisie sera donc fonction de la précision recherchée. Pour plus de détails, se reporter aux normes E 10-101 à 10-107.

Remarque sur l'utilisation des machines à mesurer tridimensionnelles pour la mesure des écarts de forme : la plupart des machines à mesurer tridimensionnelles palpent un nombre de points limité, mais peuvent donner une valeur de l'écart de forme (ou un écart-type). Il convient de considérer cette valeur seulement comme une indication invitant, si cet écart est important, à le mesurer avec plus de précision sur une machine de mesure de forme.

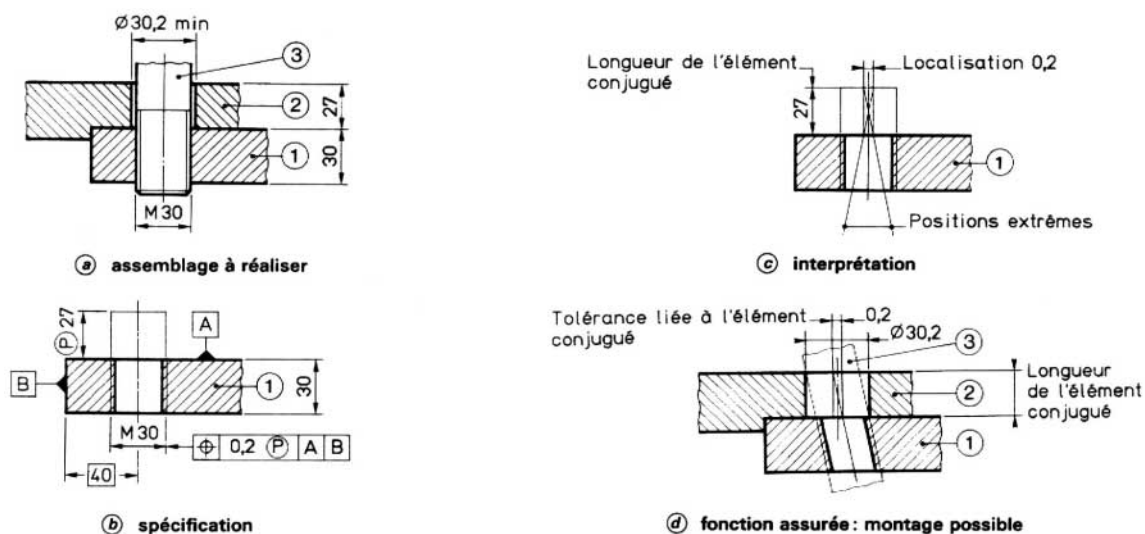


Figure 7 – Zone de tolérance projetée (d'après NF E 04-558)

Tableau 7 – Relation entre les écarts géométriques et la fonction des pièces

(d'après guide CNOMO GE 40-009 N, avril 1991)

Fonction		Forme	Orientation	Position	Battement	E/I/M (3)
Glissement Frottement Coussin d'air	mâle-femelle	(1)	(2)	(1)	(2)	E
	plan sur plan	(1)				I
Roulement	à billes	(1)		(1)		E
	chemin billes	(1)				I
Étanchéité avec joint acceptant les variations de diamètre	assemblage coulissant	(1)		(1)		I
	assemblage tournant	(1)			(1)	I
Étanchéité sans joint ou avec joint n'acceptant pas les variations de diamètre	assemblage coulissant	(1)		(1)		E
	assemblage tournant	(1)			(1)	E
Assemblage ou ajustement fixe	avec contrainte	(1)	(1)	(2)		E
	ajusté	(1)	(1)			E
	avec jeu			(1)		M
Guidage	en translation	(1)	(1)			E
	en rotation	(1)			(1)	E
Positionnement statique				(1)		E
Adhérence avec collage		(1)				I
Résistance au matage		(1)				I
Écoulement des fluides		(1)				I
Outils coupants		(1)			(1)	I
Aspect		(1)				I
Stigmatisme		(1)				I
Équilibrage					(1)	I

(1) Tolérances importantes pour la fonction.

(2) À spécifier si nécessaire.

(3) E principe de l'enveloppe ;

I principe de l'indépendance ;

M principe du maximum de matière.

De plus, la plupart des machines 3D calculent par exemple le cylindre (ou le cercle, le plan, etc.) des moindres carrés, et l'écart des points mesurés par rapport à cet élément. Donc, elles calculent indépendamment le diamètre et l'écart de forme, sans tenir compte de la position de la surface réelle. Ce principe de mesure se rapproche du principe de l'indépendance, mais sans le respecter rigoureusement, car l'écart de forme normalisé reste toujours la distance minimale t de deux éléments contenant la surface réelle.

Les machines 3D pouvant mesurer en *scanning* rejoignent le principe des machines de mesure de forme si l'on enregistre un nombre suffisant de points, mais il convient de s'assurer que le logiciel est conforme aux normes NF et ISO.

■ **Remarque sur les pièces déformables** : les normes considèrent toujours les pièces rigides ; en pratique, erreurs de mesure et litiges ont souvent pour origine la déformation de la pièce lors du bridage ou même sous son propre poids. La définition d'une pièce déformable devrait donc comporter l'indication des points ou zones d'appui qui serviront à **conformer** celle-ci, ainsi que les conditions dans lesquelles sa forme est définie (à l'état libre dans telle position, fixée dans des conditions représentatives de sa fonction, etc.). Les points qui serviront au conformage de la pièce doivent être situés à l'origine des cotes fonctionnelles.

3.6 Conclusion

La spécification des tolérances géométriques doit être faite **suivant la fonction à assurer** par la pièce. Pour la mesure, on choisit la méthode se rapprochant le plus de la définition théorique, en ayant toujours à l'esprit que le but de cette mesure est de déterminer si la pièce est apte à remplir cette fonction, et en sachant que la présence d'un écart géométrique peut influencer fortement sur la précision d'une mesure dimensionnelle.

4. États de surface

4.1 Introduction

On appelle **états de surface** les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Il sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés *profilomètres*, qui relèvent le **profil** de la surface (figure 8). Ces appareils impriment un graphique anamorphosé du profil réel palpé (c'est-à-dire que l'agrandissement vertical est plus important que l'agrandissement horizontal). Ce graphique permet de **visualiser la forme des irrégularités et d'estimer leur profondeur et leur espacement**.

Nota : l'unité courante des paramètres d'état de surface est le micromètre ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$).

L'état de surface comprend les irrégularités d'ordre deux (ondulation) et trois (rugosité) (tableau 4).

■ **L'ondulation** comprend des irrégularités de pas relativement grand (par exemple, supérieur à $500 \mu\text{m}$), parfois visibles à l'œil nu : par exemple, *peau d'orange* des peintures, *facettes* des pièces rectifiées, trace de l'avance par tour de fraise sur une pièce fraisée en bout, etc. Le ratio largeur/profondeur est généralement dans la plage 1 000/1 à 100/1.

L'ondulation influe sur l'étanchéité, le roulement, le glissement, l'aspect, la conduction thermique et électrique, etc.

Lors de l'usinage, l'ondulation peut être provoquée par des vibrations de basse fréquence de la pièce ou de l'outil, dues à un mauvais guidage, un mauvais équilibrage ou une mauvaise isolation, à une fraise mal réglée ou altérée par des inclusions dans la pièce usinée, au diamantage de la meule en rectification, etc.

Les valeurs de pas de 500 et $2\,500 \mu\text{m}$ indiquées sur le tableau 4 sont utilisées dans l'industrie automobile française et sont issues d'une banque de données techniques de plus de 27 000 relevés. Elles conviennent pour toutes les pièces mécaniques, mais, si nécessaire, pour des investigations particulières (par exemple, tôles peintes), les normes françaises permettent de choisir ces deux limites parmi les valeurs suivantes :

4 - 20 - 100 - 500 - 2 500 - 12 500 μm

■ La **rugosité** comprend les irrégularités le plus souvent *sensibles à l'ongle* : par exemple, traces d'outil d'une pièce usinée, « grain » d'une surface sablée ou revêtue. Pour les pièces mécaniques, ce sont généralement des irrégularités de pas inférieur à $500 \mu\text{m}$, avec un ratio largeur/profondeur dans la plage 100/1 à 5/1.

La rugosité influe sur l'aptitude au frottement (particulièrement pendant la période de rodage), l'usure, l'adhésivité des revêtements, la résistance à la flexion et aux efforts alternés, à la corrosion, etc.

Lors de l'usinage, les facteurs influant sur la rugosité sont l'avance de l'outil, son affûtage, les ondulations de sa face de coupe, le brise-copeau, le rayon de pointe, la qualité et le filtrage du lubrifiant, le diamantage de la meule en rectification, les vibrations de haute fréquence, etc.

■ La prescription d'un état de surface implique que les écarts géométriques soient maintenus dans des limites admissibles.

De même que pour les tolérances géométriques, un état de surface ne doit pas être demandé s'il n'est pas **essentiel pour la fonction** du produit, car des spécifications de valeurs anormalement serrées augmentent inutilement le **coût** de la production (figure 9).

Remarque : la mesure d'un profil n'est représentative de la surface que si celle-ci est homogène (même état de surface en différents endroits) et isotrope (même état de surface dans toutes les directions). Quand ce n'est pas le cas, il faut faire plusieurs mesures, qui sont caractérisées par leur moyenne et leur écart-type. En pratique, ces profils sont relevés perpendiculairement aux stries d'usinage, dans la zone présentant à l'examen visuel la rugosité maximale.

Dans cet article, nous ne traitons que des paramètres les plus couramment utilisés (tableau 8) et de leur rapport avec la fonction des pièces. Pour plus de précisions, se reporter aux normes françaises et ISO citées dans la fiche documentaire [Doc. B 7 010].

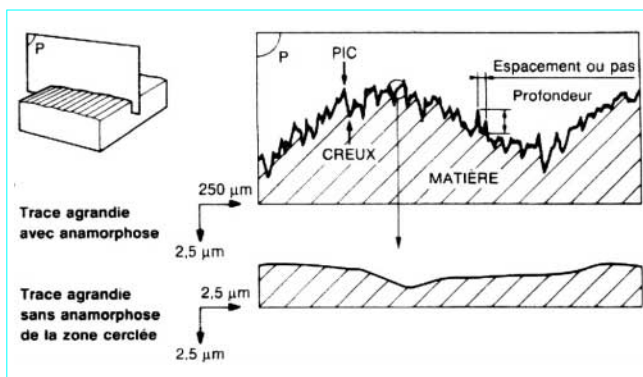


Figure 8 – Relevé d'un profil d'état de surface [4]

4.2 Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe

On appelle **motif de profil** une portion de profil comprise entre deux pics (figure 10). Il est caractérisé par sa **largeur ou pas** et par la **profondeur** de chacun de ses côtés. Les paramètres liés aux motifs peuvent être évalués graphiquement en traçant la ligne enveloppe supérieure et la ligne enveloppe inférieure, en ne descendant pas dans les creux de pas inférieur à 500 μm (figure 10). La profondeur moyenne de rugosité R représente la distance moyenne entre les deux courbes enveloppes. La ligne enveloppe supérieure permet l'évaluation de la profondeur moyenne d'ondulation W , et de son pas moyen AW .

En pratique, les motifs caractéristiques sont déterminés avec plus de précision par un algorithme programmé sur ordinateur qui recherche les plus grands motifs possibles répondant à quatre conditions (figure 11 d'après norme EXP E 05-052) :

- une *condition enveloppe*, qui sélectionne les pics plus élevés que les pics avoisinants qui peuvent être porteurs de la ligne enveloppe supérieure (évite que la ligne enveloppe coupe le profil) ;
- une *condition de largeur*, qui limite la largeur des motifs à la valeur A (limite conventionnelle entre la rugosité et l'ondulation) ou B (limite conventionnelle entre l'ondulation et l'écart de forme) ;
- une *condition d'agrandissement*, qui sert à éliminer les plus petits pics, en recherchant le plus grand motif possible. Elle n'autorise pas la combinaison de deux motifs en un seul, plus long, si le résultat est un motif de caractéristique T plus faible que celle de l'un des deux motifs d'origine (élimine les petits pics encadrés par les grands pics) ;
- une *condition de profondeur relative*, qui permet de limiter la combinaison des motifs de profondeurs sensiblement égales, en particulier sur les surfaces périodiques (évite l'élimination des pics de profondeur voisine de celle des pics adjacents).

Ces motifs déterminent la profondeur moyenne de rugosité R et son pas moyen AR . Les pics retenus sont les extrémités des motifs caractéristiques.

La ligne enveloppe supérieure est la ligne joignant ces pics caractéristiques. Elle permet de déterminer les motifs d'ondulation et de calculer la profondeur moyenne d'ondulation W et son pas moyen AW .

Ce traitement effectue une reconnaissance de forme du profil comme l'effectuerait un opérateur entraîné qui tracerait la ligne enveloppe supérieure sur le graphique enregistré sans filtrage, mais sans interprétation subjective (figure 12).

4.3 Paramètres liés à la ligne moyenne

■ Détermination de la ligne moyenne

Dans la définition ISO 4287/1, la référence pour le calcul des paramètres est la **ligne des moindres carrés calculée sur une longueur de base**. La valeur moyenne des paramètres est calculée en effectuant la moyenne des valeurs trouvées sur cinq longueurs de base (figure 13).

Cependant, beaucoup d'appareils actuels déterminent encore la ligne moyenne par **filtrage électrique**, qui peut introduire des distorsions et des déphasages (distorsions asymétriques du profil).

Le choix d'une longueur de base trop faible atténue les amplitudes mesurées (figure 14) : en pratique, il est conseillé que la longueur de base soit au minimum égale à cinq fois le pas de rugosité (figure 15).

Ces appareils introduisent donc une erreur de méthode qui peut cependant être acceptable pour des mesures courantes.

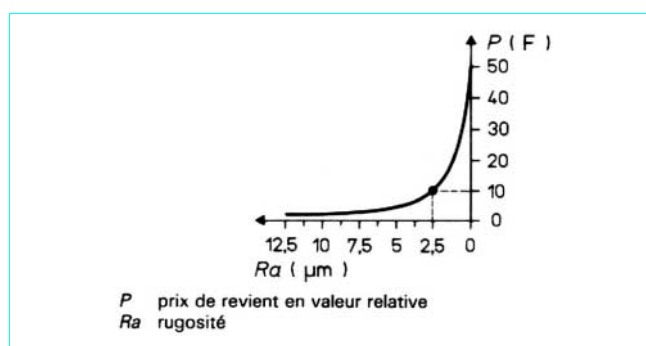


Figure 9 – Variation relative des prix de revient en fonction de la rugosité réalisée

Tableau 8 – Définition des paramètres d'état de surface les plus couramment utilisés
[d'après E 05-015 sauf (1) et (2)]

	Caractéristiques	Rugosité	Ondulation	Profil total
liées aux motifs	Profondeur moyenne des motifs..... Profondeur maximale des motifs..... Profondeur totale du profil Pas moyen des motifs	R R_{max} AR	W W_{max} W_t AW	P_t
liées à la ligne moyenne	Hauteur de saillie maximale Moyenne des R_y sur cinq longueurs de base Hauteur de pic maximale Profondeur de vallée maximale Écart moyen arithmétique Écart moyen quadratique..... Pas moyen au niveau de la ligne moyenne.....	R_y R_z (2) R_p R_v (1) R_a R_q R_m	W_t W_p W_v (1) W_a W_q (1) Sw_m (1)	
liées à la distribution des amplitudes	Taux de longueur portante			T_p (c)

(1) Projet de révision ISO 4287/1.

(2) Norme DIN 4768.

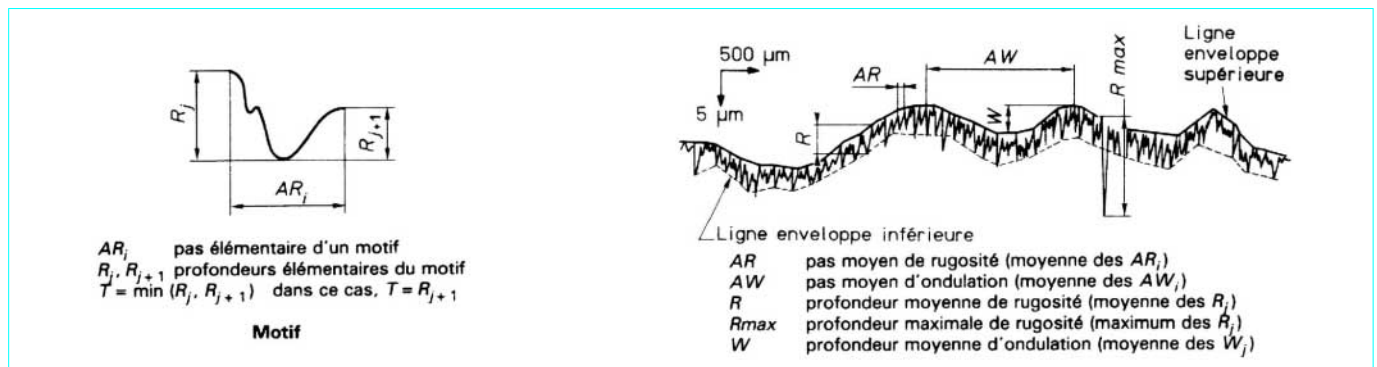


Figure 10 – Évaluation des pas et des profondeurs des irrégularités caractéristiques d'un profil

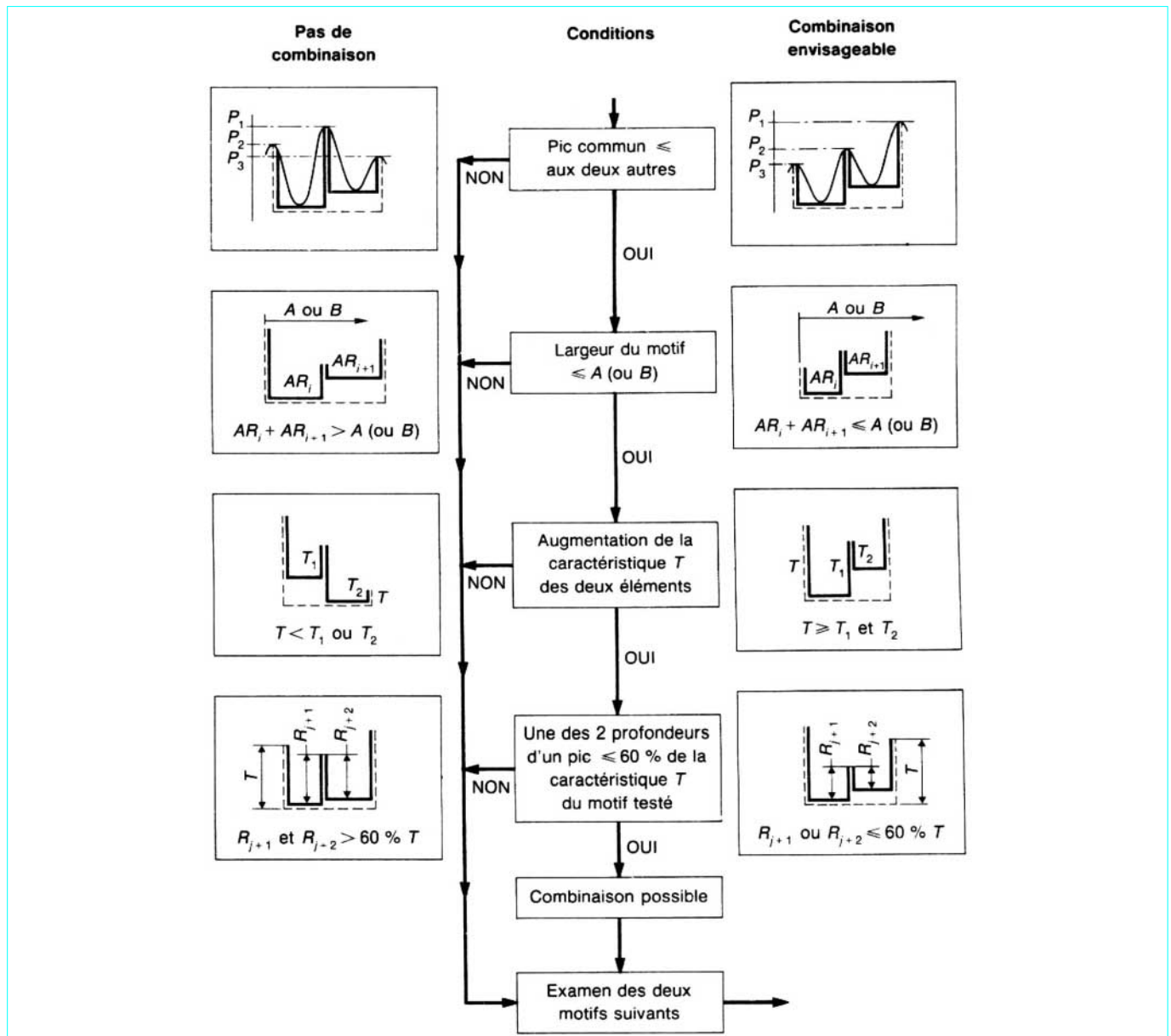
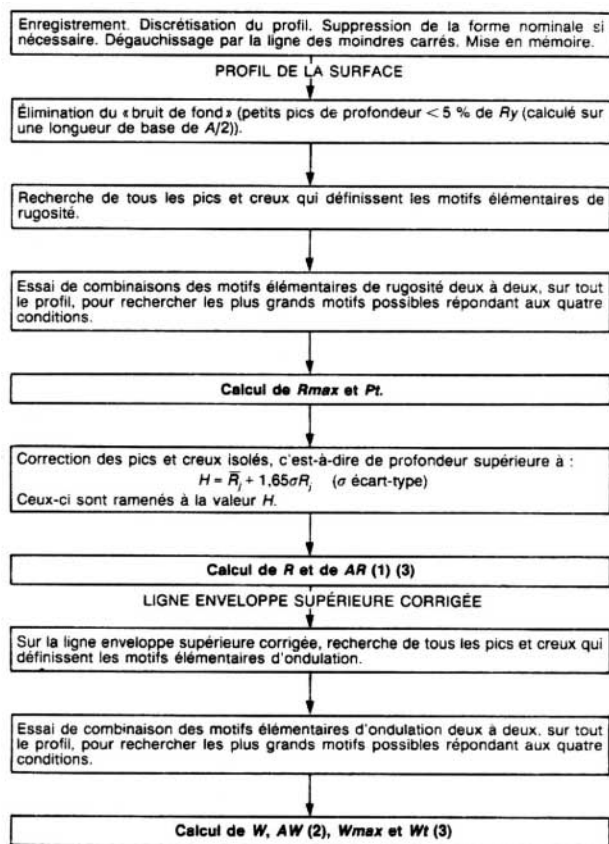


Figure 11 – Identification des motifs caractéristiques du profil par la combinaison des motifs locaux du profil (d'après EXP E 05-052)



- (1) Les paramètres R et AR sont calculés sur un minimum de trois motifs.
 (2) Les paramètres W et AW sont calculés sur un minimum de trois motifs.
 (3) R_{max} et W_{max} sont calculés même s'il y a moins de trois motifs.

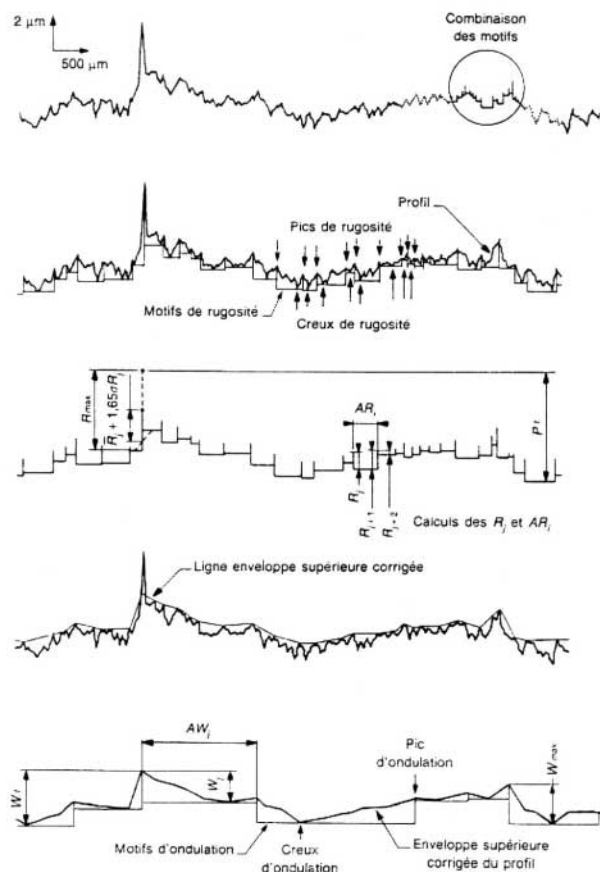


Figure 12 – Procédure permettant de calculer les paramètres liés aux motifs (d'après EXP E 05-052)

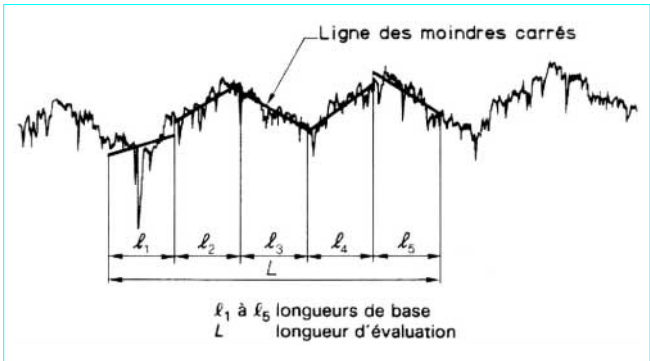


Figure 13 – Ligne de référence ISO des moindres carrés sur la longueur de base

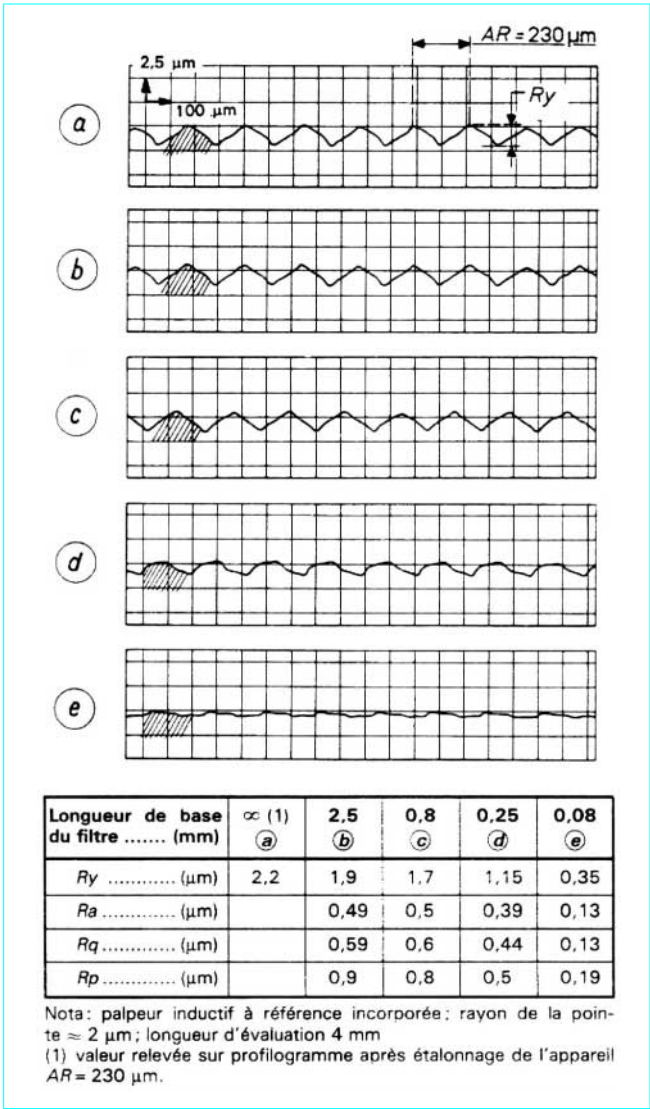


Figure 14 – Effet de filtres électriques de différentes longueurs de base (cut-off) sur un même profil

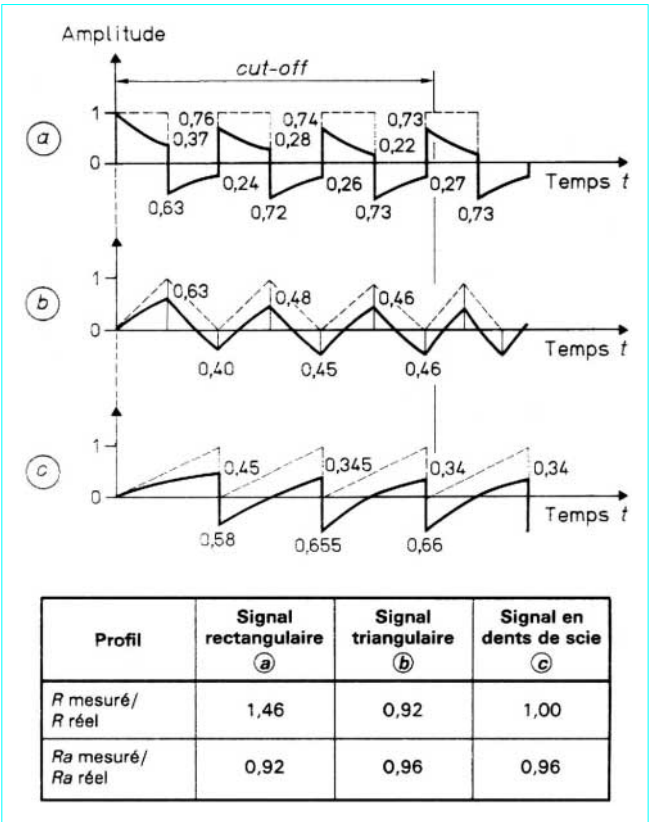


Figure 15 – Effet d'un même filtre électrique sur trois signaux différents de même pas (cut-off = 3AR) [2]

Les travaux en cours à l'ISO prévoient de déterminer cette ligne moyenne par un **filtre numérique** dit « à correction de phase » ne causant pas de déphasage (figure 16) :

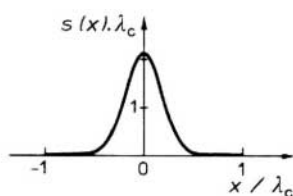
— pour ce filtre, on obtient l'ordonnée y_m de la ligne moyenne en un point en faisant la moyenne pondérée des points du profil situés de part et d'autre, l'ordonnée y de chaque point étant pondérée par une valeur $s(x)$ fonction de sa distance x au point considéré (figure 16a) :

$$y_m = \int_{x=-1}^{x=+1} y \cdot s(x) \cdot \lambda_c$$

(d'après document de travail ISO TC57/SC1/N87) ;

— la caractéristique de transmission (figure 16b) indique de combien l'amplitude d'un profil sinusoïdal est atténuée en fonction de sa longueur d'onde (c'est la transformée de Fourier de la fonction de pondération).

La précaution à prendre avec les filtres électriques (longueur de base au minimum égale à cinq fois le pas de rugosité) reste valable avec les filtres numériques.



Équation de la fonction de pondération :

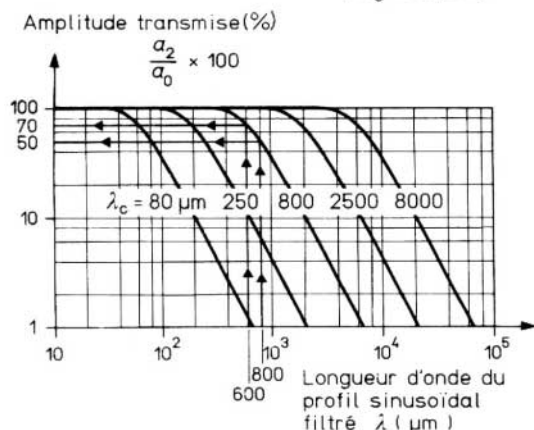
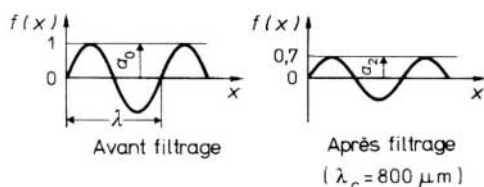
$$s(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} \exp - \pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_c} \right)^2$$

avec x position par rapport au centre de la fonction de pondération,

λ_c longueur de base du filtre (= longueur de coupe-re).

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0,4697.$$

① fonction de pondération du filtre correcteur de phase



Équation de la caractéristique de transmission du profil de rugosité :

$$\frac{a_2}{a_0} = 1 - \exp - \pi \left(\frac{\alpha \lambda_c}{\lambda} \right)^2$$

avec a_0 amplitude d'un profil sinusoïdal avant filtrage,

a_2 amplitude de ce profil après filtrage,

λ longueur d'onde du profil sinusoïdal filtré.

Exemple : l'amplitude d'un signal sinusoïdal d'une longueur d'onde de 600 μm ne sera restituée qu'à 70 %, par un filtre de longueur de coupe λ_c de 800 μm . Un signal de longueur d'onde égale à la longueur de coupe n'est restitué qu'à 50 %.

② caractéristique de transmission du filtre correcteur de phase

Cette longueur de base est à choisir parmi les valeurs suivantes : 80 – 250 – 800 – 2 500 – 8 000 μm , de façon à filtrer l'ondulation sans trop atténuer la rugosité.

■ Principaux paramètres liés à la ligne moyenne

Ils sont indiqués sur la figure 17.

Remarque : le R_z de la norme DIN 4768 est égal à la moyenne de 5 R_y mesurés sur 5 longueurs de base consécutives. Le R_z (DIN) est donc appelé R_{y5} dans les normes ISO, après s'être appelé auparavant R_t , ou R_{tm} sur certains appareils.

Le R_z (ISO), différent du R_z (DIN), est calculé comme la moyenne des hauteurs des 5 pics les plus hauts + des 5 creux les plus profonds sur une longueur de base. L'ISO a décidé de supprimer ce paramètre, non utilisé et source de confusion.

4.4 Paramètres liés à la distribution d'amplitude

Ces critères peuvent être calculés soit sur le profil total sur toute la longueur d'évaluation L , soit sur le profil de rugosité sur une longueur qui peut être plus grande que la longueur de base (figure 18).

■ **Distribution d'amplitude :** c'est la fonction de densité de probabilité des points du profil. La forme de cette distribution peut être caractérisée par les paramètres R_q , S_k et E_k qui correspondent aux moments centrés d'ordre 2, 3 et 4. Elle est utilisée en tribologie, pour simuler dans les modèles mathématiques, le comportement de la surface [5].

■ **Courbe du taux de portance $T_p(c)$ ou d'Abbott-Firestone :** c'est la courbe cumulée de distribution d'amplitude en fonction de la profondeur de coupe (c). Elle représente le pourcentage de la surface réelle qui porterait sur une surface plane après une usure hypothétique égale à (c).

Remarque : cette courbe permet, lorsque l'on a spécifié les pas et les profondeurs des irrégularités, de spécifier la forme de ces irrégularités. En fait, c'est souvent la **pen**te de la courbe d'Abbott qui est fonctionnelle. Par exemple, dans l'industrie automobile française, l'état de surface des chemises moteur est spécifié suivant la figure 19.

4.5 Spécification des états de surface sur les dessins

La figure 20 donne cette spécification, extraite de la norme NF E 05-016.

Le choix du procédé d'élaboration est de la responsabilité des services des méthodes. Les services d'études ne doivent donc spécifier celui-ci au plan qu'en cas de nécessité et en collaboration avec les services des méthodes. Dans ce cas, il faut utiliser les abréviations du tableau 3.

Nous avons vu (figure 14) que les valeurs mesurées peuvent varier considérablement suivant la longueur de base utilisée. Aussi est-il fortement recommandé de porter la valeur de la longueur de base à utiliser sur le dessin pour les paramètres liés à la ligne moyenne.

Figure 16 – Filtres numériques à correction de phase

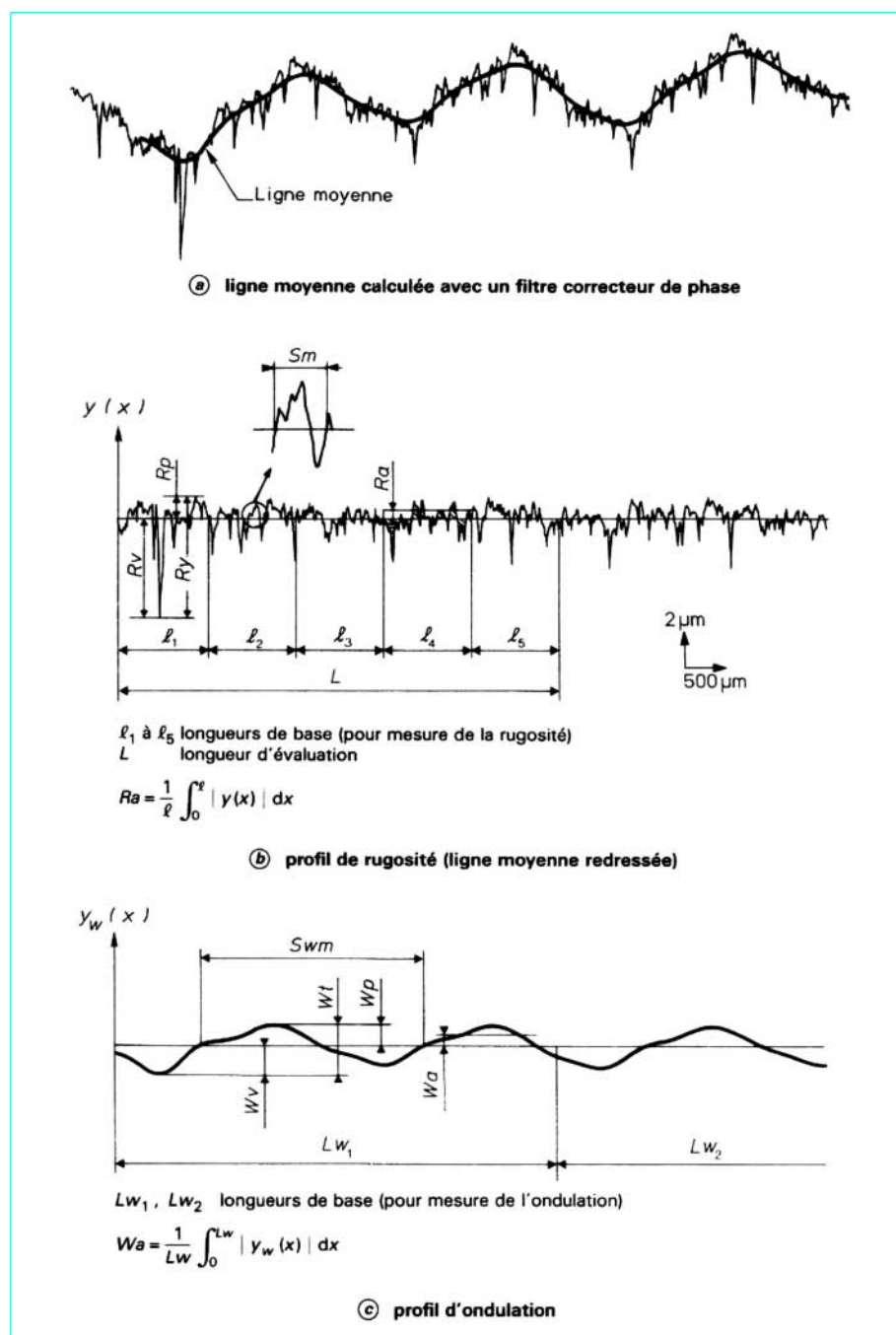


Figure 17 – Paramètres liés à la ligne moyenne

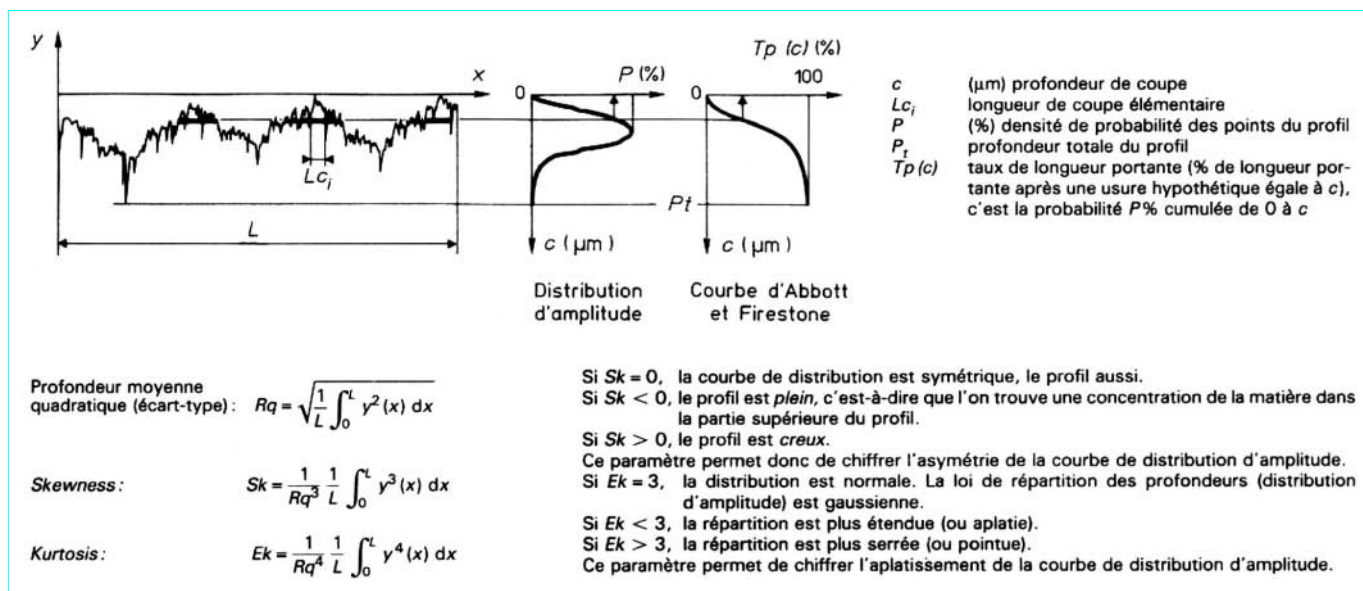


Figure 18 – Paramètres liés à la distribution d'amplitude

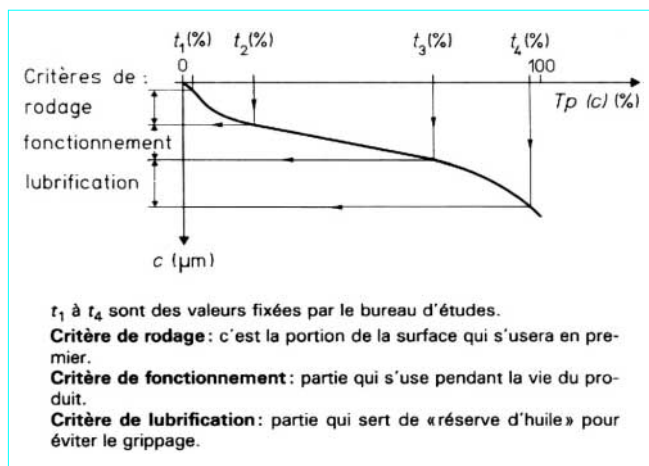


Figure 19 – Critères de rodage, de fonctionnement et de lubrification

4.6 Relation entre les paramètres d'état de surface et la fonction des pièces. Procédés d'élaboration

Le tableau 9 donne, à titre indicatif, les paramètres spécifiés dans l'industrie automobile française selon la fonction des pièces. Il existe très peu de données disponibles pour les autres industries.

Les valeurs de la profondeur moyenne d'ondulation W (par exemple $\leq 0,8 R$) donnent, en fonction de la valeur de R spécifiée au plan, la valeur de W à ne pas dépasser suivant la fonction indiquée, ce qui évite de spécifier systématiquement W .

Le tableau 10 donne également, à titre indicatif, des ordres de grandeur de valeurs de R pour quelques fonctions.

Le tableau 3 donne les ordres de grandeur des états de surface pouvant être obtenus par les principaux procédés d'élaboration.

4.7 Mesure des états de surface

Ce point étant développé dans l'article *Métrologie des surfaces* [R 1 390] dans le traité Mesures et Contrôle, nous ne nous étendons pas ici sur ce sujet. Cependant, nous mettrons le lecteur en garde contre :

- les **appareils à patin**, qui ne permettent pas de mesurer l'ondulation. Pour la mesure de l'ondulation et les mesures précises de la rugosité, le fascicule FD E 05-054 préconise d'utiliser un appareil à plan de référence de captage externe. Mais ce dernier étant plus sensible aux vibrations, il doit être mis sur une table à isolation pneumatique, séparée du calculateur ;

- les **filtres électriques**, qui déforment et déphasent le profil. Attention au choix judicieux du filtre (figures 14 et 15). Voir à ce sujet, en l'absence de spécification au plan, le fascicule FD E 05-054 qui conseille de prendre une longueur de base de 0,8 mm, qui est en pratique la plus couramment utilisée (la norme ISO 4288 préconise une procédure plutôt complexe). De toute façon, il est indispensable de faire figurer la valeur de la longueur de base (*cut-off*) avec le résultat de mesure. Par exemple : $Ra(0,8) = 2,5 \mu m$;

- l'**incertitude de mesure d'un état de surface sur des étalons homogènes** est de l'ordre de 5 % de la valeur mesurée et la dispersion sur plusieurs mesures peut dépasser 20 % si la surface n'est pas très homogène. N'oublions pas que nous mesurons des dixièmes de micromètre avec de nombreux facteurs d'influence comme les vibrations, le rayon du diamant, le filtre, etc. Le fascicule FD E 05-054 conseille donc d'effectuer plusieurs mesures et de comparer la moyenne plus deux écarts-types à la valeur du paramètre spécifié (l'ISO utilise la moyenne plus un écart-type, ce qui tolère 16 % des trajectoires hors tolérance). Entre appareils de marque et de modèle différents, les écarts peuvent atteindre 15 % pour les paramètres liés aux motifs et 30 % pour ceux liés à la ligne moyenne.

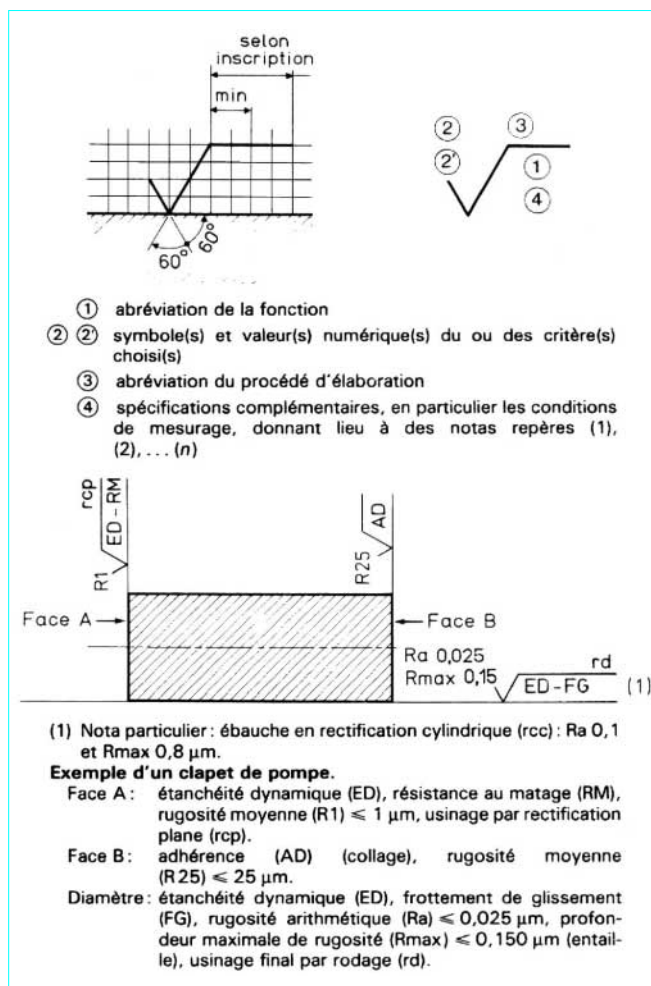


Figure 20 – Spécification des états de surface sur les dessins

4.8 Évolution des normes d'état de surface

Les premiers appareils apparus sur le marché utilisaient des filtres électriques et un système patin-palpeur. Ces appareils relativement simples et peu coûteux mesuraient le paramètre Ra , ce qui explique que celui-ci soit actuellement le plus utilisé dans le monde. Mais les différences entre les normes et les appareils de mesure des différents pays ont été source de nombreux litiges auxquels se sont ajoutées les querelles entre partisans des deux anciens « systèmes » de la ligne moyenne et de la ligne enveloppe.

Cependant, les travaux effectués en France dans l'industrie automobile [2] et à l'ENSAM/ISES [3] montrèrent l'intérêt de travailler sur des profils de surface non déformés, et de caractériser les surfaces par les espacements et les profondeurs des irrégularités de profil.

Dans l'industrie automobile, l'évaluation graphique fut, dans un premier temps, retenue. En effet, l'examen d'un profil relevé à l'aide d'un appareil avec référence de captage externe est encore la source

la plus complète d'informations pour une expertise, bien qu'il ne permette pas de quantifier avec une grande précision. Cela permet cependant la constitution d'une banque de données techniques par fonction et par type d'usinage, qui met en évidence l'importance de l'ondulation pour de nombreuses fonctions (tableaux 9 et 10).

Les normes françaises de 1972 firent la synthèse de ces travaux et proposèrent un choix de 18 paramètres d'état de surface, afin de permettre la spécification de ceux correspondant le mieux à la fonction de la surface.

La situation semble actuellement se clarifier avec une approche plus pragmatique basée sur la fonction de la surface : en fait, le concepteur doit spécifier les paramètres nécessaires et suffisants pour décrire la forme de la surface, car c'est de cette forme que dépend la fonction de la pièce. Les services des méthodes ont la responsabilité de choisir le procédé d'élaboration pour obtenir la forme spécifiée.

L'arrivée sur le marché des nouveaux appareils à microprocesseur permet d'élaborer des méthodes de calcul effectuant une reconnaissance de forme des profils pour déterminer les motifs caractéristiques et donc remplacer l'évaluation graphique : travaux effectués par l'Institut supérieur des états de surface (ISES) et les sociétés Hommel, Perthen [7] et Peugeot [6].

La normalisation internationale s'est longtemps limitée uniquement aux paramètres de rugosité calculés sur la ligne moyenne. Cependant, ces dernières années, une évolution significative se dessine à l'ISO, avec des études entreprises pour mieux définir les conditions de mesure des paramètres liés à la ligne moyenne et l'étude des filtres numériques, afin de diminuer les dispersions de mesure entre les appareils, et introduire les paramètres d'ondulation. Signalons, enfin, que la proposition d'introduire dans les normes ISO les paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe (normes françaises E 05-015 à 052) a été acceptée en mai 1990.

Les normes françaises actuelles sont la synthèse des dernières normes ISO et des paramètres liés à la ligne enveloppe qui y figurent depuis 1972, avec la méthode mathématique des motifs permettant de les calculer.

4.9 Conclusion

L'état de surface apparaît souvent comme un domaine complexe et mal connu. En fait, **il faut reconnaître qu'il n'est pas possible de caractériser la géométrie d'une surface par un seul paramètre** sauf, à la rigueur, pour suivre la dérive d'une fabrication. Après une longue période où le seul paramètre utilisé dans beaucoup d'industries était le paramètre Ra , une approche beaucoup plus fonctionnelle est maintenant permise par les appareils à référence de captage externe et microprocesseur. Les paramètres liés aux motifs, maintenant reconnus par l'ISO, permettent de caractériser la forme des irrégularités de surface, et c'est cette forme, qui influe sur la fonction de la pièce, que les bureaux d'étude doivent spécifier avec précision.

Cependant, un profil ne peut caractériser qu'incomplètement une surface : aussi voyons-nous apparaître des appareils qui, en mesurant de nombreux profils parallèles, permettent de relever la topographie tridimensionnelle d'une surface. Certains de ces appareils ne donnant encore qu'une image de la surface, il devient maintenant nécessaire de définir et de normaliser des paramètres tridimensionnels d'état de surface.

Tableau 9 – Paramètres à spécifier selon la fonction des pièces [4]

Surface		Fonction appliquée à la surface		Critères									
				Profil de rugosité			Profil d'ondulation				Profil total		
		Désignation		Abréviations	R	Rmax	AR	W	Wmax	Wt	AW	Pt	Tp (c)
Contact de deux pièces	Avec déplacement relatif	Glissement (lubrifié)		FG	●			≦ 0,8 R			○		●
		Frottement à sec		FS	●		○		●		○		
		Roulement		FR	●			≦ 0,3 R	●		○		○
		Résistance au matage		RM	○		○	○			○		●
		Frottement d'un fluide		FF	●		○				○		
	Assemblage fixe	Étanchéité dynamique	avec joint	ED	●	○	○	≦ 0,6 R	●		○		
			sans joint		○	●		≦ 0,6 R					●
		Étanchéité statique	avec joint	ES	○	●		≦ R		○	○		
			sans joint		○	●		≦ R		●			
			Ajustement fixe avec contrainte		AC	○							
Adhérence (collage)		AD	●							○			
Surface indépendante	Avec contraintes	Outils (face de coupe)		OC	○		○	●			●		
		Résistance aux efforts alternés		EA	○	●	○						○
	Sans contraintes	Résistance à la corrosion		RC	●	●							
		Revêtement (peinture)		RE			○				○		
		Dépôt électrolytique		DE	●	≦ 2 R	●						
		Mesure		ME	●			≦ R					
		Aspect		AS	●		○	○			○		

● Critères principaux : spécifier au moins l'un d'eux.

○ Critères secondaires : à spécifier éventuellement selon la fonction de la pièce.

Tableau 10 – Valeurs de rugosité suivant la fonction des surfaces [2]

Surface	Prévue pour	Condition de fonctionnement	Matière	Exemples	Valeur maximale de R (μm)	Symbole
Avec déplacement relatif	Frottement de glissement	Très difficile	Acier	Axe de piston Axe du pignon fou de la pompe à huile	0,4	\sqrt{FG}
			Fonte		0,63	
			Aluminium		1	
			Bronze	Alésage du pied de bielle	2,5	
		Difficile	Acier	Queue de soupape Diamètre extérieur du poussoir	2,5	
			Fonte	Portée d'arbre à cames Diamètre extérieur du pignon de commande d'allumeur	4	
			Aluminium		6,3	
			Bronze	Bague de la pompe à huile Alésage et face du pignon intermédiaire de distribution	6,3	
		Moyenne	Acier	Face du pignon de la pompe à engrenage Glissières	6,3	
			Fonte	Face de butée d'arbre à cames Surface de freinage et d'embrayage	6,3	
			Aluminium	Jupe de piston Alésage du logement de pignon (pompe à huile)	6,3	
			Bronze	Alésage du pignon intermédiaire de distribution	6,3	
		Facile	Acier	Faces latérales de tête de bielle	6,3	
			Fonte	Butée du palier central du vilebrequin	6,3	
			Aluminium	Alésage pour arbre de pompe à huile	10	
			Bronze		10	
	Frottement de roulement	Très difficile	Acier	Billes et chemin de roulement à billes	0,1	\sqrt{FR}
		Difficile	Acier	Cames et galets très chargés	0,25	
		Moyenne	Acier	Dents d'engrenage chargées Cames et galets chargés	1	
		Facile	Acier	Dents d'engrenage peu chargées	2,5	
Sans contrainte extérieure	Revêtement peinture	La profondeur moyenne de la rugosité R doit être très inférieure à l'épaisseur de la couche de peinture et telle que $R \leq 1/8 e$				\sqrt{RE}
	Dépôt électrolytique	Le dépôt électrolytique respecte la rugosité de la surface qui le reçoit. On peut dire pour le chromage que : R après chromage $\approx 0,8 R$ avant chromage Donc, on indiquera, pour une surface devant recevoir un dépôt, la rugosité qu'exige le fonctionnement de cette surface après dépôt				\sqrt{DE}
		Laboratoire	Verre Quartz	Disque de verre interférentiel	0,01	\sqrt{ME}
		Métrologie	Acier Carbure Quartz Acier chromé	Cales étalons Dispositif d'étalonnage des bancs de mesure	0,06	

Tableau 10 – Valeurs de rugosité suivant la fonction des surfaces [2] (suite)

Surface	Prévue pour	Condition de fonctionnement	Matière	Exemples	Valeur maximale de R (μm)	Symbole
Sans contrainte extérieure	Mesure	Contrôle de précision de série	Acier Carbure Acier chromé Aluminium chromé	Étalons (tolérance $\leq 10 \mu\text{m}$) : bague, cimblot, pour contrôle de diamètre de longueur précise Vérificateurs lisses : tampons, fourches, cales mini-maxi, bagues, etc. Touches de mesure Appuis : référence de cale lisse, de broches (vé), butée, etc. Quand on veut un jeu $\leq 20 \mu\text{m}$: broches cylindriques ou coniques et mandrins de contrôle matérialisant ligne d'arbre ; tampons dans masque de contrôle Diamètre intérieur de canon de centrage, etc. Articulation de renvoi de mesure	0,8	\sqrt{ME}
		Contrôle courant de série	Acier	Étalons de longueur (tolérance $\geq 10 \mu\text{m}$) Quand le jeu peut être $\geq 20 \mu\text{m}$: poussoirs, cimblots de centrage pour contrôle de hauteur, broches sans précision et tampons sans précision Appuis : marbre support glissant de comparateur, vé mobile, jauge, etc. Calibres	2	
Avec contraintes extérieures	Résistance aux efforts alternés	Très difficile	Acier	Barres de torsion	6,3	\sqrt{EA}
		Difficile	Acier	Alésage dans l'axe de piston	12,5	
		Moyenne	Acier		20	
		Facile	Acier		31,5	
	Outils coupants face de coupe	Diamant		Outils à aléser	0,01	\sqrt{OC}
		Céramique		Outils de tour	0,25	
		Carbure		<i>Gun, reamer</i> , outils de tour, fraises, lames	0,63	
		Acier rapide		Alésoirs, fraises, broches, outils de tour, forets	2,5	

Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface

par **Jacques BOULANGER**

Ingénieur des Arts et Métiers

Métrologies et techniques de contrôle aux Automobiles Peugeot

Références bibliographiques

- [1] LECRINIER (J.) et CHEVALIER (A.). – Cotation et tolérancement. Dictionnaire. Collection AFNOR, Technique. Eyrolles (1986).
- [2] SCHEFFER (B.). – *Recherches de base pour l'établissement d'une norme sur les irrégularités géométriques des surfaces techniques*. RNUR (Marché DGRST) (1964-1968).
- [3] BIELLE (J.). – *Impératifs fonctionnels, spécification usinage et prix de revient de fini de surface*. Mécanique Matériaux Électricité, n° 286, oct. 1973.
- [4] *États de surface. Une mécanique de qualité à moindre coût*. AFNOR/CNOMO (1985).
- [5] RIOUT (J.). – *Les états de surface*. Notes techniques, n° 18 et 19, CETIM, déc. 1979.
- [6] BOULANGER (J.). – *Nouvelle méthode de calcul des critères d'état de surface*. Revue pratique de contrôle industriel, n° 117, nov. 1982.
- [7] FAHL (C.F.). – *Motif combination – A new approach to surface profile analysis* (Combinaison des motifs. Une nouvelle approche pour l'analyse des profils de surface). Communication présentée à la deuxième conférence internationale sur la métrologie et les propriétés des surfaces techniques à Leicester (GB), 14-16 avril 1982.

Normalisation

Tolérances générales

Association Française de Normalisation AFNOR

NF E 02-100	12-70	Tolérances de pièces lisses (système ISO). Limites des pièces. Généralités.
NF E 02-101	5-65	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions jusqu'à 500 mm. Limites des pièces. Bases d'établissement du système.
NF E 02-102	5-65	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions jusqu'à 500 mm. Tableau des tolérances fondamentales.
NF E 02-103	5-65	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions jusqu'à 500 mm. Tableau des écarts fondamentaux des arbres.
NF E 02-104	5-65	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions jusqu'à 500 mm. Tableau des écarts fondamentaux des alésages.
NF E 02-105 à NF E 02-111	5-65	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions jusqu'à 500 mm. Écart des arbres des qualités 4 à 16 pour usages généraux.
NF E 02-112 à NF E 02-118	5-65	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions jusqu'à 500 mm. Écart des alésages des qualités 5 à 16 pour usages généraux.
NF E 02-120	3-81	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions au-delà de 500 mm jusqu'à 3 150 mm. Limite des pièces. Bases d'établissement.
NF E 02-121	3-81	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions au-delà de 500 mm jusqu'à 3 150 mm. Tableau des écarts fondamentaux.
NF E 02-122	3-81	Tolérances de pièces lisses (système ISO) pour dimensions au-delà de 500 mm jusqu'à 3 150 mm. Tableau des tolérances fondamentales.

NF E 02-200	12-74	Vérification des tolérances de pièces lisses. 1 ^o Introduction.
NF E 02-201	12-74	Vérification des tolérances de pièces lisses. 2 ^o Calibres à limites. Généralités
NF E 02-202	12-74	Vérification des tolérances de pièces lisses. 3 ^o Calibres à limites. Tolérances et usure admise des calibres. Fabrication.
FD E 02-203	12-84	Vérification des tolérances de pièces lisses. 4 ^o Calibres à limites. Extension au-delà de 500 mm des valeurs numériques de la norme NF E 02-202.
NF E 02-204	3-87	Vérification des tolérances des produits. Conditions d'acceptation.
NF X 06-044	5-84	Application de la statistique. Traitement des résultats de mesure. Détermination de l'incertitude associée au résultat final.

International Organization for Standardization ISO

ISO 286-1	1988	Système ISO de tolérances et d'ajustements. Partie I : base des tolérances, écarts et ajustements.
ISO 286-2	1988	Système ISO de tolérances et d'ajustements. Partie II : table des degrés de tolérance normalisés et des écarts limites des alésages et des arbres.
ISO/R 1938	1971	Système ISO de tolérances et d'ajustements. Partie II : vérification des pièces lisses.

Écarts de forme

Association Française de Normalisation AFNOR

EXP E 04-541	12-87	Dessins techniques. Principes de tolérancement. Principe de l'enveloppe.
EXP E 04-542	12-87	Dessins techniques. Principes de tolérancement. Principe de l'indépendance.
NF E 04-550	3-83	Dessins techniques. Cotation et tolérancement fonctionnels.

TOLÉRANCES ET ÉCARTS DIMENSIONNELS, GÉOMÉTRIQUES ET D'ÉTATS DE SURFACE

NF E 04-552	11-83	Dessins techniques. Tolérancement géométrique : Généralités, définitions, symboles, indications sur les dessins.
FD E 04-553	12-84	Dessins techniques. Cotation et tolérancement. Tolérancement géométrique : exploitation des normes NF E 04-552 et 554.
NF E 04-554	12-88	Dessins techniques. Cotation et tolérancement. Références et systèmes de référence pour tolérances géométriques.
NF E 04-555	7-78	Dessins techniques. Cotation et tolérancement. Principe du maximum de matière.
NF ISO 1660	5-89	Dessins techniques. Cotation et tolérancement des profils.
NF E 04-557	12-76	Dessins techniques. Cotation des éléments coniques conjugués.
NF E 04-558	8-83	Dessins techniques. Cotation et tolérancement. Zone de tolérance projetée.
NF E 04-560	6-85	Dessins techniques. Cotation et tolérancement. Vocabulaire.
NF E 10-101	2-88	Méthodes de mesurage dimensionnel. 2 ^e partie : écarts de rectitude.
NF E 10-102	2-88	Méthodes de mesurage dimensionnel. 3 ^e partie : écarts de planéité.
NF E 10-103	6-88	Méthodes de mesurage dimensionnel. 4 ^e partie : écarts de circularité.
NF E 10-104	5-89	Méthodes de mesurage dimensionnel. 5 ^e partie : écarts de cylindricité.
NF E 10-105	12-90	Méthodes de mesurage dimensionnel. 6 ^e partie : établissement des références spécifiées.
NF E 10-106	12-90	Méthodes de mesurage dimensionnel. 7 ^e partie : écarts de parallélisme.
EXP E 10-107	11-89	Méthodes de mesurage dimensionnel. 8 ^e partie : écarts de perpendicularité.

International Organization for Standardization ISO

ISO 1101	1983	Tolérancement géométrique. Tolérancement de forme, orientation, position et battement. Généralités, définitions, symboles, indications sur dessins.
ISO 2692	1988	Dessins techniques. Tolérancement géométrique. Principe du maximum de matière.
ISO 4291	1985	Méthodes d'évaluation des écarts de circularité. Mesurage des variations de rayon.
ISO 4292	1985	Méthodes d'évaluation des écarts de circularité. Mesurage par les méthodes en deux et trois points.
ISO 6318	1985	Mesure de circularité. Termes, définitions et paramètres de circularité.

ISO 5458	1987	Dessins techniques. Tolérancement géométrique. Tolérancement de localisation.
ISO 5459	1981	Dessins techniques. Tolérancement géométrique. Références spécifiées et systèmes de références spécifiées pour tolérances géométriques.
ISO 8015	1985	Dessins techniques. Principe de tolérancement de base.

États de surface**Association Française de Normalisation AFNOR**

EXP E 05-015	9-84	État de surface des produits. Prescriptions. 1 ^o Généralités. Terminologie. Définitions.
NF E 05-016	7-78	État de surface des produits. Prescriptions. 2 ^o Spécification de l'état de surface sur les dessins.
FD E 05-017	2-86	État de surface des produits. Prescriptions. 3 ^o Détermination des surfaces mesurées.
NF E 05-051	9-81	État de surface des produits. Moyens de mesure. Échantillons de comparaison viso-tactile.
EXP E 05-052	2-86	État de surface des produits. Profilomètres d'état de surface à contact.
FD E 05-054	12-89	État de surface des produits. Règles et procédures pour la mesure des paramètres avec des instruments à palpeur.

International Organization for Standardization ISO

ISO 468	1982	Rugosité de surface. Paramètres, leurs valeurs et les règles générales de la détermination des spécifications.
ISO 1302	1978	Dessins techniques. Indication des états de surface sur les dessins.
ISO 1878	1983	Classification des appareils et dispositifs servant à mesurer et à évaluer les paramètres géométriques des états de surface.
ISO 1879	1981	Instruments de mesurage de la rugosité des surfaces par la méthode du profil. Vocabulaire.
ISO 1880	1979	Instruments de mesurage de la rugosité des surfaces par la méthode du profil. Instruments (à palpeur) avec contact à transformation progressive du profil. Enregistreurs de profil.
ISO 3274	1975	Instruments de mesurage de la rugosité des surfaces par la méthode du profil. Instruments à palpeur-aiguille, à transformation progressive du profil. Profilomètres à contact du système M.
ISO 4287/1	1984	Rugosité de surface. Terminologie. Partie 1 : surface et ses paramètres.
ISO 4287/2	1984	Rugosité de surface. Partie 2 : mesurage des paramètres de la rugosité de surface.
ISO 4288	1985	Règles et procédures pour le mesurage de la rugosité de surface avec des instruments à palpeur.
ISO 5436	1985	Échantillons d'étalonnage. Instruments à palpeur. Type, étalonnage et emploi des échantillons.

Constructeurs**Calibres à limites***Le Calibre.**CMPL (Constructions Mécaniques de Précision de la Loire).***Appareils de mesure d'état de surface et de mesure de forme***Hommel Sarl.**Mahr measure SA (appareils Perthen).**Rank Précision Industries (appareils Rank Taylor Hobson).**Microma Métrologie (appareils Federal).**Andilog (appareils Alpa).***Appareil de mesure d'état de surface tridimensionnel***Somicronic Sarl.***Organismes****Laboratoire National d'Essais (LNE) :** Centre d'étalonnage agréé pour les longueurs et unités mécaniques.**Établissement Technique Central de l'Armement (ETCA) :** Centre d'étalonnage agréé pour les longueurs, les états de surface et les forces.**Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM).****Institut Supérieur d'États de Surface (ISES).**