

PARTIE 1 : Bases de la cotation

SOMMAIRE

1.	Principe de cotation	2
1.1	Rôle de la cotation	2
1.2	Langage graphique et vocabulaire du tolérancement	2
1.3	Structure de données.....	5
2.	Lecture des spécifications géométriques	6
2.1	Désignation des surfaces.....	6
2.2	Définition de l'élément tolérancé	8
2.3	Spécification d'une surface composée de zones partielles	10
2.4	Principaux symboles des spécifications	10
2.5	Définition de la zone de tolérance sur la surface nominale	12
2.6	Spécification simultanée de plusieurs surfaces.....	14
3.	Système de références	17
3.1	Association des références	17
3.2	Influence de l'ordre des références	22
3.3	Référence commune.....	23
4.	Spécification en plage projetée ©	25
4.1	Fonction d'une spécification en plage projetée	25
4.2	Exemple de spécifications en plages projetées.....	26
4.3	Référence sur une plage projetée	27
5.	Répétition.....	28
5.1	Répétition d'une spécification géométrique.....	28
5.2	Répétition d'une référence	29
5.3	Répétition de diamètres	29
5.4	Répétition d'autres indications locales	29
6.	Tolérancement complémentaire	30
6.1	Tolérancement général de toutes les surfaces	30
6.2	Congé et chanfrein.....	31
6.3	Cotes entre faces localement parallèles	31
6.4	Longueur filetée	32
6.5	Profondeur d'un trou borgne	32

Les exemples sont donnés en annexe A.

1. Principe de cotation

1.1 Rôle de la cotation

1.1.1 Les différents type de cotation

La pièce « idéale » est définie par son modèle nominal.

Le mécanisme nominal est constitué par l'assemblage des modèles nominaux de chaque pièce.

Le système de références de la spécification permet de positionner le modèle nominal sur les éléments de référence de la pièce réelle pour pouvoir comparer la pièce réelle et le modèle nominal.

Une spécification fonctionnelle permet de définir un critère de conformité des pièces réelles en fixant des tolérances qui limitent les écarts géométriques admissibles entre la surface réelle spécifiée et la surface nominale correspondante. Les spécifications fonctionnelle permettent de simuler l'assemblage pour déterminer écarts géométriques obtenus entre les surfaces fonctionnelles du mécanisme (chaînes de cotes 3D).

Une spécification de fabrication permet de définir un critère de conformité des pièces fabriquées après chaque phase de fabrication. Les spécifications de fabrication permettent de simuler la fabrication pour déterminer écarts géométriques obtenus entre les surfaces fonctionnelles des pièces.

NOTE : la cotation doit être définie pour que le critère de conformité soit cohérent avec les modèles de simulation.

1.1.2 Définition contractuelle

La pratique actuelle consiste à faire une définition numérique 3D en CAO, puis une mise en plans pour permettre les échanges avec tous les corps de métiers. La cotation peut être réalisée directement dans le 3D ou uniquement sur les plans 2D.

Très souvent, la représentation 2D ne permet pas de définir complètement la géométrie nominale des surfaces complexes, ni par exemple les contours compliqués d'une zone partielle.

Inversement la représentation 3D des spécifications est parfois très difficile à lire, notamment en raison du nombre de spécifications.

Pour établir un contrat, 3 solutions sont possibles :

- Le plan 2D est contractuel. La pièce doit être complètement définie (La cotation est complète, toutes dimensions théoriquement exactes doivent être représentées).
- Le modèle 3D est contractuel et doit comporter toute la cotation. La mise en plan n'est qu'un document de visualisation, souvent incomplet pour les différents corps de métiers ...(les dimensions nominales sont supposées mesurables dans le modèle numérique).
- Le plan 2D est contractuel pour les spécifications, mais la géométrie nominale est définie par le modèle numérique, y compris pour les contours des zones partielles, les plans d'annotation...(les dimensions nominales sont supposées mesurables dans le modèle numérique)

Dans ce dernier cas, il peut y avoir un écart entre la représentation 2D par rapport à la définition numérique (problème d'arrondi, zone restreinte approximée, définition d'un angle dans un plan qui ne donne pas l'angle en vraie grandeur...). En cas d'écart, le modèle numérique est le document de référence pour le contrat.

1.2 Langage graphique et vocabulaire du tolérancement

1.2.1 Principe de spécification

Définition d'une spécification : Une spécification est une exigence géométrique exprimée par le dessin de définition ou le modèle numérique contractuel pour limiter les écarts des surfaces spécifiées et éventuellement des éléments de références par rapport aux surfaces du modèle nominal.

Les spécifications géométriques étudiées dans ce document sont limitées aux spécifications décrites par un cadre de tolérance ou par une cote conventionnelle tolérancée.

La Figure 1a représente la pièce nominale et une spécification. La surface nominale spécifiée indiquée par la flèche est le plan incliné. Le cadre de tolérances mentionne un système de références constitué de la référence primaire A et de la référence secondaire B identifiées sur le modèle nominal par les indicateurs de référence. La zone partielle C1 est limitée entre les lignes P et Q.

La Figure 1b représente la pièce réelle sur laquelle se trouve les éléments de références A et B ainsi que la surface réelle spécifiée (ou tolérancée).

La Figure 1c représente le principe de conformité. Le modèle nominal est superposé à la pièce réelle afin de faire les constructions et les mesures nécessaires pour évaluer les écarts entre les surfaces réelles et les surfaces nominales. L'association est réalisée avec le plan A primaire puis avec le plan B secondaire.

La surface réelle spécifiée doit appartenir à la zone de tolérance. Seuls les points projetés sur la zone partielle C1 sont à prendre en compte. La direction de projection donnée par la surface nominale spécifiée.

NOTE 1 : La lettre A désigne le nom donné à la surface nominale et à la surface réelle correspondante.

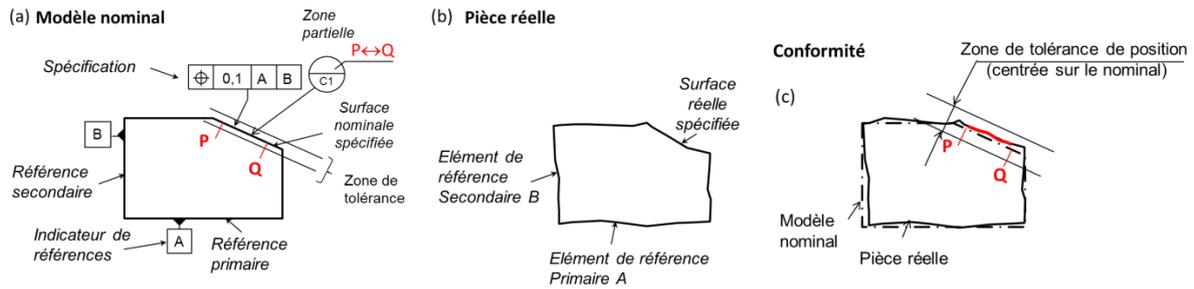


Figure 1 – Désignation des surfaces et des principaux symboles du dessin

(Cette opération de métrologie est détaillée en annexe E-3-2).

NOTE 2 : La pièce doit être ébavurée pour éliminer toutes les bavures ou bosses locales, en particulier au voisinage des arêtes externes. Les mesures sont réalisées avec un filtrage naturel des micros défauts par le moyen de mesure. Ce filtrage peut être assimilé à la mesure par un palpeur sphérique de rayon 0,5 mm, qui supprime par exemple les creux de plus de 2,5 μm pour un pas de rugosité de 0,1mm. En cas de besoin, le critère de filtrage à imposer pourra être décrit en nota ou dans les conditions de mesure pour certaines spécifications.

Pour éviter les difficultés de mesure et de définition des limites des surfaces au voisinage des arêtes, chaque surface réelle est identifiée sur une zone restreinte par défaut jusqu'à une distance $d = 0,5 \text{ mm}^1$ des contours extérieurs et des contours intérieurs de la face. Si besoin, il est possible de spécifier une zone restreinte particulière. Inversement, si la zone réellement identifiée en métrologie est différente, cette zone doit être décrite dans le procès-verbal de mesure. Des décalages spécifiques peuvent être imposés dans les conditions de mesure.

1.2.2 Définition de l'élément tolérancé

Surface spécifiée : surface (ou ensemble de surfaces) indiquée par la spécification.

Élément tolérancé : Élément géométrique défini par la surface réelle spécifiée devant respecter la zone de tolérance.

NOTE : L'élément tolérancé peut être la surface réelle spécifiée, l'axe réel de la surface spécifiée ou la surface médiane réelle de la surface spécifiée ou tout autre élément associé à la surface spécifiée (axe obtenu par association de la surface spécifiée dans une plage de projection, éléments de contact posé sur la surface spécifiée...).

1.2.3 Règle de lecture d'une spécification géométrique

Chaque spécification est définie par un cadre de tolérance ou par une cote.

Plusieurs spécifications qui s'appliquent aux mêmes surfaces spécifiées peuvent être superposées les unes au-dessus des autres (Figure 2) :

- La ou les flèches désignent les surfaces spécifiées.
- Le compteur de surfaces dans une répétition (nr), dans un groupe (nx) ou dans une composition (nc) est placé en haut à gauche. Il s'applique à toutes les spécifications.
- Eventuellement, la liste des surfaces spécifiées peuvent être placée au-dessus du cadre. (exemple : liste des zones partielles). Cette liste s'applique à toutes les cadres de tolérance placées en dessous.
- Les indications placées à droite d'un cadre de tolérance ne s'appliquent qu'à cette spécification.
- Un cadre de référence placé sous un cadre de tolérance désigne l'ensemble des surfaces spécifiées, en tenant compte des indications au-dessus du cadre.

¹ Cette valeur sera éventuellement précisée dans les conditions de mesure au chapitre 2

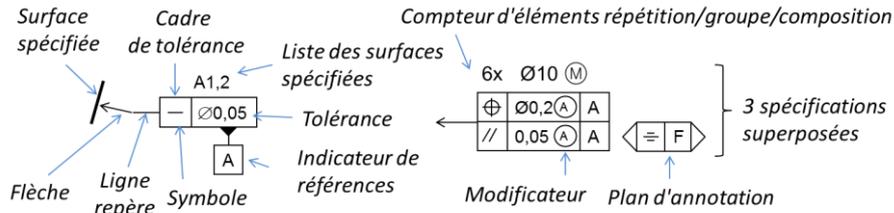


Figure 2 - Lecture des spécifications

La ligne repère désignant les surfaces spécifiées peuvent être attachées à toutes les faces du cadre de la spécification.

NOTE 1 : De préférence, la ligne repère doit être issue du milieu du cadre et perpendiculaire à la face du cadre. Si la spécification comporte un plan d'annotation à droite de la spécification, le départ de la ligne repère doit être dévié.

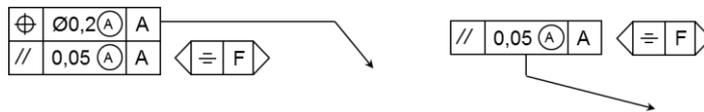


Figure 3 - Flèche avec un plan d'annotation

La flèche doit être perpendiculaire à la surface spécifiée ou à un trait de rappel tangent à la surface, (Figure 4a et b).

La Figure 4c illustre l'utilisation d'un trait de rappel pour une face visible.
La Figure 4d illustre l'utilisation d'un trait de rappel pour une face cachée.

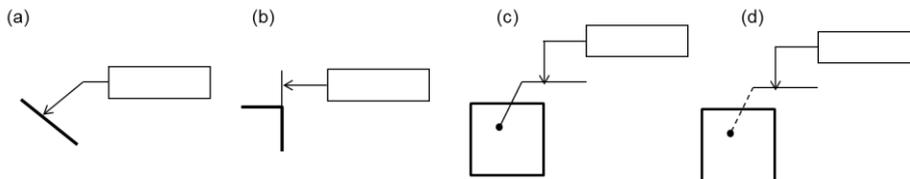


Figure 4 - Désignation de la surface spécifiée

Si elle s'applique à toutes les surfaces spécifiées, la spécification dimensionnelle doit de préférence être placée au-dessus du cadre de tolérance, à droite du compteur nc, nx ou nr Figure 5a ou éventuellement devant le cadre de tolérance Figure 5b sur un trait commun aux lignes repères. Les deux écritures sont équivalentes.

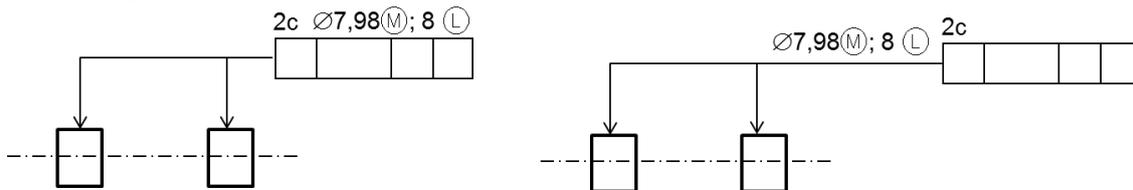


Figure 5 - Position de la spécification dimensionnelle

NOTE 2 : Pour faciliter la lecture, sur une vue, les cadres de tolérance doivent être placés en dehors du contour extérieur de la pièce. La flèche doit être de préférence hors matière, sauf pour les alésages.

1.2.4 Indépendance des spécifications

Les références sont désignées par un nom indiqué sur le modèle nominal ou sous une spécification. Lorsqu'un cadre de référence est placé sous un cadre de tolérance, la référence indiquée sont les surfaces spécifiées. Ces références peuvent donc être précisées le texte au-dessus du cadre de (compteur, zones restreintes...). Les références sont indépendantes des spécifications.

La définition d'une spécification est indépendante des autres spécifications et de la présence ou non de dimensions théoriquement exactes sur le dessin.

NOTE 1 : Les cotes encadrées, les cadres de référence, les contours de zones partielles, les plans d'annotations, les noms de lignes, de points, d'éléments de contact, etc.. sont des indications qui n'imposent pas de contraintes géométriques aux pièces réelles (ce ne sont pas des spécifications).

NOTE 2 : Les dimensions théoriquement exactes et les angles du modèle nominal peuvent être lus à la demande directement sur le modèle nominal. Les dimensions et les angles théoriquement exacts peuvent être implicites. Pour obtenir la dimension recherchée, il est possible d'additionner des dimensions théoriquement exactes ou de transformer des indications polaires en cartésiennes sans changer le sens des spécifications.

NOTE 3 : Au voisinage d'une arête, il peut être nécessaire de valider l'appartenance d'un point à l'une ou à l'autre des zones de tolérances des spécifications des faces adjacentes pour déclarer la conformité ou non de ces spécifications.

1.3 Structure de données

Une spécification peut être décrite à l'aide d'une structure de données :

L'entité nominale spécifiée est constituée en 4 niveaux selon un ordre impératif (Figure 6)

- Facette élémentaire : facette élémentaire sélectionnée sur le modèle nominal.
- Surface : Facette élémentaire ou couture de plusieurs facettes élémentaires adjacentes appartenant à la même surface mathématique (ex : cylindre dans un modèle CAO constitué de 2 demi-cylindres issus d'un modèle STEP, plan constitué de deux faces coplanaires côte à côte, surface complexe constituée de plusieurs carreaux adjacents...).
- Surface composée avec nc : collection de plans, de cylindres, de plans face à face, de surfaces quelconques constituant une seule entité.
- Surface(s) restreinte(s) : portion(s) de la surface composée (point, ligne, zone). La zone restreinte est fixe ou glissante sur la surface composée.

La surface réelle spécifiée est formée par les surfaces réelles de la pièce correspondant à l'entité nominale spécifiée.

L'élément tolérancé peut être la totalité de la surfaces réelle spécifiée, un axe ou une surface médiane da la surface spécifiée ou un élément associé la surface spécifiée (projection, élément de contact, élément de situation). L'élément tolérancé est dans une seule zone de tolérance. Cette zone de tolérance peut être fractionnée en plusieurs parties si l'élément tolérancé est fractionné.

Plusieurs surfaces spécifiées et leurs zones de tolérance identiques ou non peuvent être concaténées avec des contraintes de position relative des zones.

Un groupe de N surfaces spécifiées avec Nx, impose de placer si possible les N éléments tolérancés dans les N zones de tolérance ayant des contraintes entre elles.

Dans un groupe, plusieurs zones de tolérance identiques ou non peuvent être regroupées une seule zone commune (en position relatives exactes).

La répétition est équivalente à une simple recopie d'une spécification.

La structure de données comporte 7 niveaux :

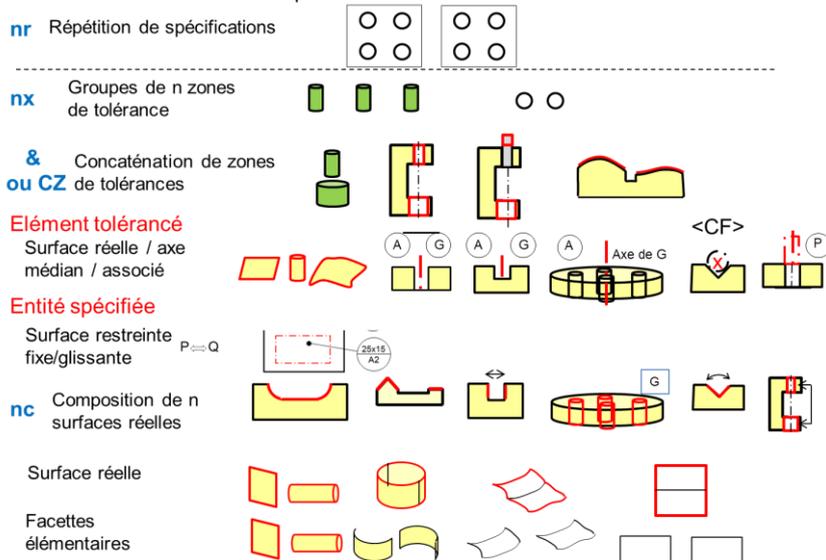


Figure 6 - Structure de données

NOTE 1 : A titre d'exemple, une surface composée peut être constituée de deux cylindres coaxiaux. L'élément toléré peut être l'axe réel de cette surface composée, autrement dit, l'ensemble des deux axes des deux cylindres réels.

2. Lecture des spécifications géométriques

2.1 Désignation des surfaces

2.1.1 Désignation des surfaces complètes

REGLE : l'indicateur de référence donne l'identifiant d'une ou de plusieurs surfaces. Ce nom est commun à la surface réelle et à la surface nominale correspondante.

Un indicateur de référence peut être utilisé pour désigner toute surface, même si elle n'est pas utilisée dans un système de références.

Le nom est donné par une ou plusieurs lettres majuscules. (A, B, C, AA, AB, AAA, etc). Le nom ne doit comporter aucun chiffre pour éviter la confusion avec les zones partielles notées A1, A2...

Le nom de la surface peut être placé directement sous le cadre de tolérance. Il est également possible de désigner directement une surface par un indicateur de référence. La Figure 7 présente les différents modes de désignation des surfaces :

- (a) A désigne l'ensemble des surfaces spécifiées par le cadre de tolérance en tenant compte des informations au-dessus du cadre, mais indépendamment du contenu du cadre de tolérance (voir le cas particulier avec une répétition en section 7).
- (b) A désigne la surface.
- **New** (c) A désigne le cylindre (indépendamment de la présence ou non d'une cote de diamètre en face de l'indicateur de référence).
- (d) et (e) A désignent l'ensemble des deux plans face à face parallèles ou non, identifiés par les extrémités de la cote.

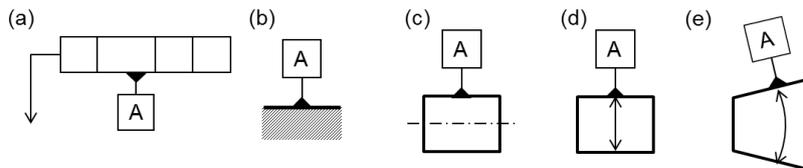


Figure 7 - Désignation des surfaces

NOTE 1 : Le cadre de référence désigne toujours une surface ou plusieurs surfaces (pas son axe, ni son plan médian). Une génératrice d'un cylindre ou une ligne de la surface, sera définie par une zone partielle.

NOTE 2 : Pour faciliter la lecture d'un modèle, un cadre de référence peut être dupliqué sur la même surface avec le même nom, sur le modèle 3D ou sur différentes vues.

La Figure 8 présente diverses formes d'écritures en 2D :

- A, B, C, D désignent des plans (La surface C en trait continu est la face visible. La surface D en trait discontinu est la face cachée).
- E, F, G, H désignent des cylindres
- J désigne l'ensemble des deux plans supérieurs
- K désigne l'ensemble des deux plans parallèles face à face
- L désigne l'ensemble des deux plans face à face

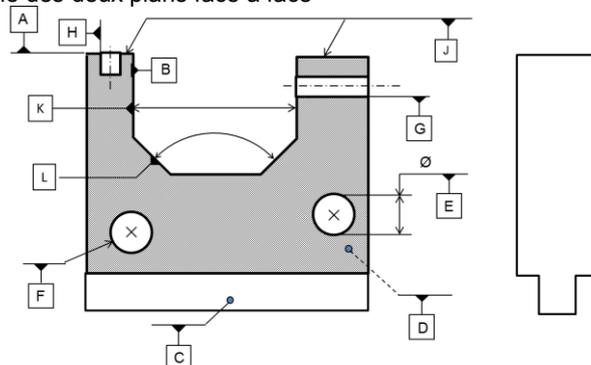


Figure 8 - Exemples de désignation des surfaces en 2D

2.1.2 Désignation et contour des zones partielles

Définition : une zone partielle est une portion continue d'une surface nominale ou de plusieurs surfaces nominales contiguës.

NOTE 1 : une zone partielle décrit généralement la portion en contact entre deux pièces. Le contour de la zone peut être identifié sur la pièce réelle avec une incertitude par exemple $\pm 0,3$ mm. Cette incertitude ne pose aucun problème pour définir une référence ou pour définir la conformité d'une spécification si le voisinage de la zone partielle est la même surface. Si besoin, la zone partielle peut être légèrement agrandie pour être sûr d'identifier toute la portion fonctionnelle de la surface.

Une zone partielle est décrite sur le modèle nominal. Elle est reliée par une ligne repère à un cadre de zone partielle (Figure 9). Sur le modèle nominal, la zone partielle est hachurée et entourée par un trait mixte fin à deux points et tirets longs. Des dimensions théoriquement exactes peuvent définir les dimensions et la position de la zone. Le cadre de zone partielle est un cercle divisé en deux cases par une ligne horizontale.

- La case inférieure est réservée pour l'identifiant de la zone suivi d'un chiffre correspondant au numéro de la zone partielle (ex : A1, A2, A3, AB1, AB2...).
- La case supérieure est réservée aux informations complémentaires, telles que les dimensions de la zone surfacique. L'étendue sera par exemple sous la forme 20x40, Ø5, 4x15°... Le symbole □ signifie « étendue totale de la face » (Figure 9e). Si la zone est un tronçon de surface, le premier élément décrit la section, le second, la longueur du tronçon : Ø15x4, □5x4, △x4 (le symbole △ désigne une surface quelconque).
- Si besoin, le texte peut être placé à l'extérieur et relié à la case par une ligne repère (Figure 9d)

Le cadre de zone partielle est relié à la zone partielle par une ligne repère terminée par une flèche qui indique de préférence le centre de la surface (Figure 9) :

- (a) Le trait est continu lorsque la zone partielle est visible.
- (b) Le trait est discontinu lorsque la zone est cachée.
- (c) Une zone partielle surfacique dans un alésage représenté en coupe sera considérée comme visible. Le hachurage de la zone doit être différent du hachurage de la coupe.
- (d) La flèche pointe sur le côté de la pièce.

Sur un plan 2D, la zone partielle est représentée de préférence sur une vue qui permet de définir le contour (Figure 9a, b et c).

La représentation sur le côté de la pièce est limitée à des cas simples Figure 9d. La zone peut être limitée par 2 lignes entre P et Q avec le symbole « entre » \leftrightarrow ou par des cotes encadrées.

La convention suivante évite parfois des vues supplémentaires lors de la mise en plan :

- Pour une zone sur un cylindre ou une surface de révolution, le premier terme donne le diamètre ou est le symbole Δ , le second nombre indique la longueur de la zone suivant l'axe.
- Lorsque la zone est dans le plan de la vue, le premier nombre indique la dimension selon l'horizontale de la vue, le second, la dimension selon la verticale.
- Lorsque la zone est sur le côté de la pièce, le premier nombre indique la dimension dans le plan de la vue, le second, la dimension dans le plan perpendiculaire à la vue.

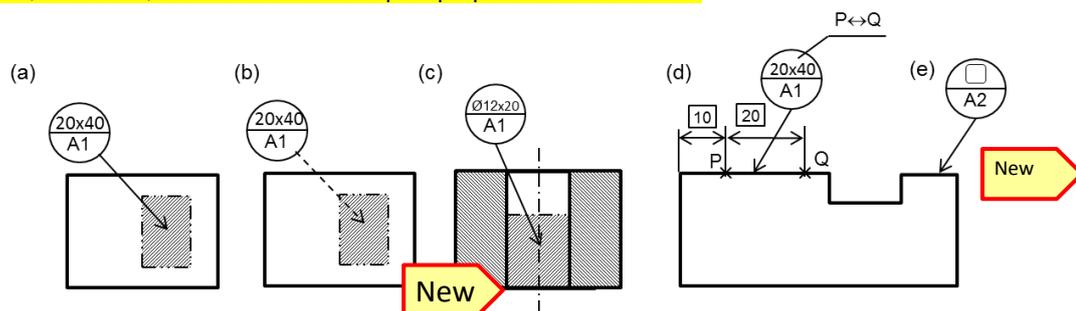


Figure 9 - Indicateur de zone partielle surfacique

NOTE 2 : Pour faciliter la lecture d'un modèle, un cadre de zone partielle peut être dupliqué sur la même zone, avec le même nom, sur le modèle 3D ou sur différentes vues.

Une zone partielle utilisée comme référence partielle est positionnée sur la pièce en associant le modèle nominal avec le plus long système de références qui contient cette référence. (La position ne dépend pas de la surface spécifiée).

Une zone partielle utilisée uniquement comme surface spécifiée est positionnée par le modèle nominal associé au système de référence de la spécification. Si ce système de références laisse des mobilités résiduelles ou s'il

n'y a pas de référence, le modèle nominal est également associé à la surface spécifiée (Figure 10a), puis si nécessaire aux surfaces adjacentes de la surface portant la zone partielle (Figure 10b) ou à toute surface permettant de positionner le modèle nominal.

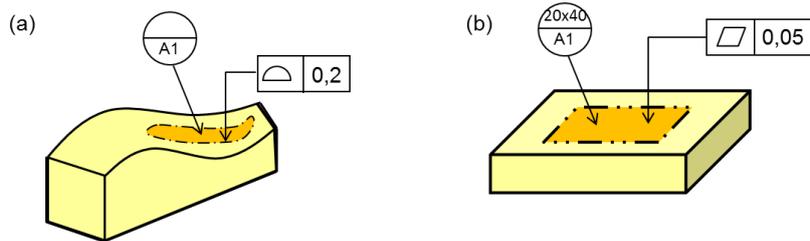


Figure 10 - Spécification en zone partielle sans référence

La Figure 11a illustre une zone partielle continue qui recouvre plusieurs surfaces contiguës (les surfaces sont tangentes ou non). Le commentaire au-dessus de la spécification indique que la surface spécifiée est la surface réelle limitée par la zone partielle A1. Le cadre de référence placé sous le cadre de tolérance désigne par la lettre A, la surface limitée par la zone partielle A1.

En 3D, la zone partielle est facilement identifiable par le remplissage de la surface et son contour. En 2D, le contour de la zone partielle peut-être décrit par des points. L'étendue de la surface est décrite dans l'indicateur de zone partielle par la liste des points avec le symbole \leftrightarrow « entre » (Figure 11c). Les points peuvent être désignés en nota dans le modèle (Figure 11b) ou par des points sur les différentes vues.

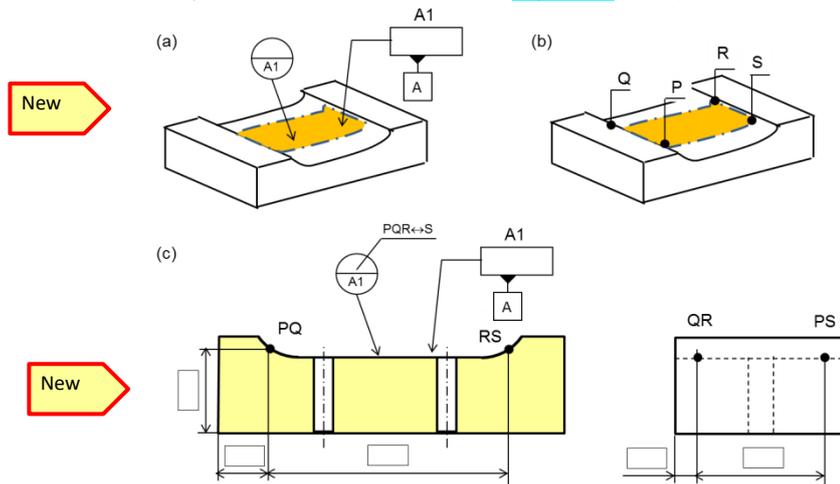


Figure 11 - Zone partielle couvrant plusieurs surfaces contiguës

2.1.3 Désignation d'une surface composée de zones partielles

Une surface peut être composée de plusieurs zones partielles identifiées par la même lettre, même si elles appartiennent à des surfaces différentes. Cette surface composée est considérée comme une seule surface, même si elle est fractionnée.

Par exemple, l'indicateur de référence A désigne par défaut l'ensemble des références partielles identifiées par la lettre A. Pour faciliter la lecture du dessin, la liste des zones partielles est indiquée de préférence à droite de l'indicateur de référence (Figure 12a, b, c).

En Figure 12d, la spécification porte sur l'ensemble de la surface désignée par la flèche. La surface A est la restriction de cette surface aux trois zones partielles A1,2,3.

En Figure 12e, la spécification porte sur les trois zones partielles A1,2,3. La surface A est la surface constituée des trois zones partielles A1,2,3.

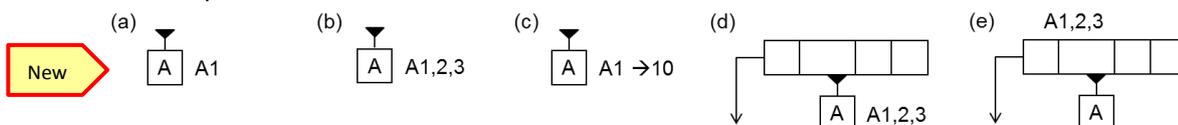


Figure 12 - Désignation d'une surface composée de zones partielles

2.2 Définition de l'élément tolérancé

2.2.1 Spécification d'un plan ou d'une surface complexe

La ou les surfaces spécifiées sont indiquées par la ou les flèches issues du cadre de tolérance.
 REGLE : Tous les points de la surface doivent appartenir à la zone de tolérance.

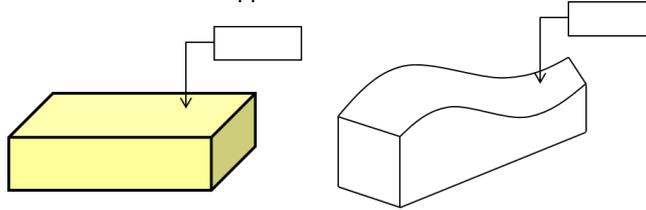


Figure 13 - Surface spécifiée plane ou complexe

2.2.2 Spécification d'une surface de révolution

Lorsque la flèche indique un cylindre ou une surface de révolution, sans modificateur ou avec \textcircled{M} ou \textcircled{L} , l'élément réel tolérancé est la surface réelle du cylindre ou de la surface de révolution.

REGLE : Tous les points de la surface doivent appartenir à la zone de tolérance.

Définition : Lorsque le modificateur \textcircled{A} est placé à droite de la tolérance, l'élément tolérancé est l'axe réel du cylindre ou de la surface de révolution. L'axe réel est le lieu des centres des sections du cylindre réel associés par les moindres carrés.

Définition : Lorsque le modificateur \textcircled{G} est placé à droite de la tolérance, l'élément tolérancé est l'axe associé du cylindre ou de la surface de révolution par les moindres carrés. Cet axe est limité aux points extrêmes de la surface.

REGLE : Tous les points de l'axe réel ou de l'axe associé doivent appartenir à la zone de tolérance.

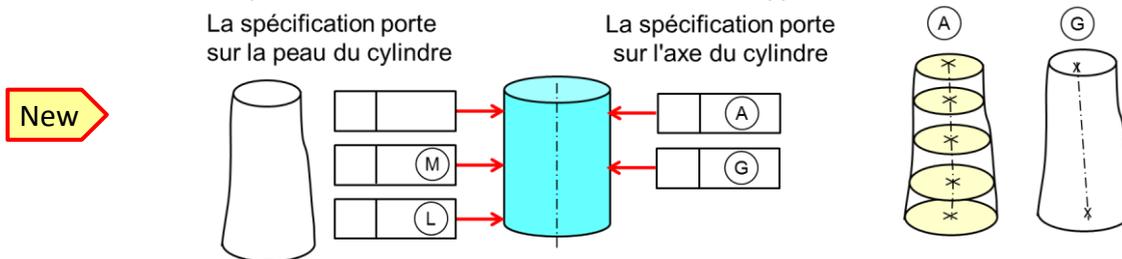


Figure 14 - Élément tolérancé pour un cylindre

NOTE 1 : Conformément à l'ancienne pratique, lorsqu'il n'y a pas de modificateur, si la flèche est en face d'une cote de diamètre, l'élément tolérancé est l'axe réel \textcircled{A} . Sinon, l'élément tolérancé est la surface.

NOTE 2 : les modificateurs \textcircled{M} et \textcircled{L} sont utilisés pour des liaisons avec jeu. Le modificateur \textcircled{G} est utilisé pour une liaison avec serrage (assemblage d'un coussinet dans un alésage par exemple). Le modificateur \textcircled{A} est utilisé pour caractériser localement la qualité d'un axe (rectitude de l'axe, équilibrage dynamique, flux d'un fluide..)

2.2.3 Spécification de deux plans parallèles face à face

La cote en face de la flèche issue du cadre de tolérance est indispensable pour désigner les deux plans parallèles de normales opposées qui constituent l'entité fonctionnelle.

Avec les modificateurs \textcircled{L} ou \textcircled{M} , l'élément tolérancé est formé par les deux surfaces réelles latérales.

REGLE : Tous les points des plans doivent appartenir à la zone de tolérance.

Définition : Lorsque le modificateur \textcircled{A} est placé à droite de la tolérance, l'élément tolérancé est la surface médiane réelle des deux plans. La surface médiane réelle est le lieu des milieux des bipoints identifiés face à face.

Définition : Lorsque le modificateur \textcircled{G} est placé à droite de la tolérance, l'élément tolérancé est la surface associée aux deux plans par les moindres carrés (écarts des points à deux plans offsets des surfaces nominales). Le contour est limité à l'union des projections des contours nominaux des faces latérales.

REGLE : Tous les points de la surface médiane réelle ou associée doivent appartenir à la zone de tolérance.

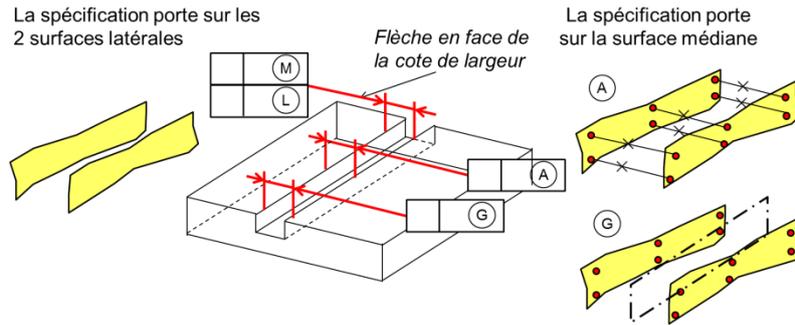


Figure 15 - Élément spécifié sur deux plans parallèles

NOTE 1 : lorsqu'il n'y a pas de modificateur, l'élément tolérancé est la surface médiane réelle (ancienne pratique à éviter).

NOTE 2 : les modificateurs \textcircled{M} et \textcircled{L} sont utilisés pour des liaisons avec jeu. Le modificateur \textcircled{G} est utilisé pour une liaison avec serrage. Le modificateur \textcircled{A} est utilisé pour caractériser la planéité de la surface médiane.

2.3 Spécification d'une surface composée de zones partielles

Lorsque la spécification porte sur une ou plusieurs zones partielles, la liste des zones partielles peut-être placée au-dessus du cadre de tolérance (Figure 16a). Les différentes zones partielles sont considérées comme une seule surface, même si elles ne portent pas la même lettre ou si elles sont issues de surfaces différentes.

S'il n'y a qu'une seule zone partielle et que la ligne repère du cadre de tolérance pointe sur la zone partielle, le commentaire au-dessus du cadre peut-être omis.

L'indicateur de référence placé sous le cadre de tolérance porte implicitement sur les zones partielles listées au-dessus du cadre de tolérance Figure 16b. La surface A est une surface composée des deux zones partielles A1 et A2.

La Figure 16a et la Figure 16b sont rigoureusement équivalentes. Dans la Figure 16c, la spécification de forme porte sur la surface composée des zones partielles A1 et A2 définies sur deux plans différents.

New

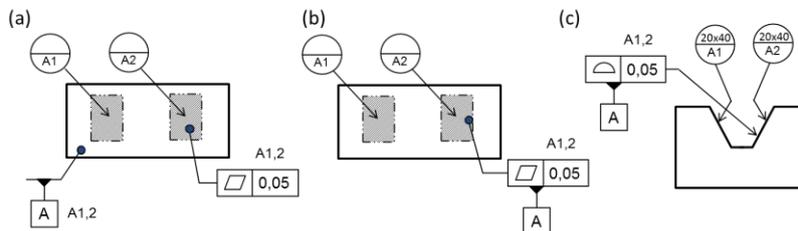


Figure 16 - Spécifications d'une surface composée de zones partielles

2.4 Principaux symboles des spécifications

2.4.1 Liste des symboles

Le symbole est toujours indiqué dans la première case du cadre de tolérance (à gauche).

Position		Orientation		Forme	
Désignation	Symbole	Désignation	Symbole	Désignation	Symbole
Localisation	\oplus	Parallélisme	//	Planéité	\square
Symétrie	\equiv	Perpendicularité	\perp	Rectitude	—
Coaxialité	\odot	Inclinaison	\sphericalangle		
Position d'une surface quelconque	\frown	Orientation d'une surface quelconque	\sphericalangle	Forme d'une surface quelconque	\frown

Figure 17 - Principaux symboles

Les spécifications des 3 premières lignes de la Figure 17 s'appliquent pour des surfaces spécifiées de type plan et cylindre ou pour des axes ou des points.

Les surfaces quelconques sont des surfaces complexes (y compris cônes et sphères) ou des associations de plusieurs surfaces de type plan, secteur cylindrique, conique, sphérique. Le symbole de surface quelconque est identique pour la forme (sans référence) et pour la position (avec références). **Le symbole d'inclinaison est utilisé également pour l'orientation d'une surface quelconque.**

New

La coaxialité est une localisation particulière entre une surface tolérancée et un système de références de tous les deux de révolution et coaxiaux. (Il n'est donc pas nécessaire de mettre des cotes encadrées « 0 » entre les axes).

La symétrie est une localisation particulière entre une surface tolérancée et un système de références admettant plan de symétrie commun. (Il n'est donc pas nécessaire de mettre une cote encadrée « 0 »).

Le choix du symbole d'orientation ($//$, \perp , \sphericalangle) est déterminé en fonction de l'orientation de la surface spécifiée par rapport à la dernière référence du système de références.

2.4.2 Position de la zone de tolérance en fonction du type de symbole

La Figure 18a représente le modèle nominal de la pièce et trois spécifications. Les Figure 18b, c, d représentent la pièce réelle et le modèle nominal associé à la pièce réelle à l'aide du système de références. La surface réelle spécifiée doit appartenir à la zone de tolérance.

La zone de tolérance est définie dans le modèle nominal selon le symbole :

- **Symbole de position :** la zone de tolérance est centrée sur la surface nominale. La surface réelle spécifiée doit être dans la zone de tolérance
- **Symbole d'orientation :** la zone de tolérance est construite centrée sur la surface nominale, puis translatée dans une direction quelconque pour que la surface réelle spécifiée soit si possible dans la zone de tolérance.
- **Symbole de forme :** la zone de tolérance est construite centrée sur la surface nominale, puis déplacée librement pour que la surface réelle spécifiée soit si possible dans la zone de tolérance.

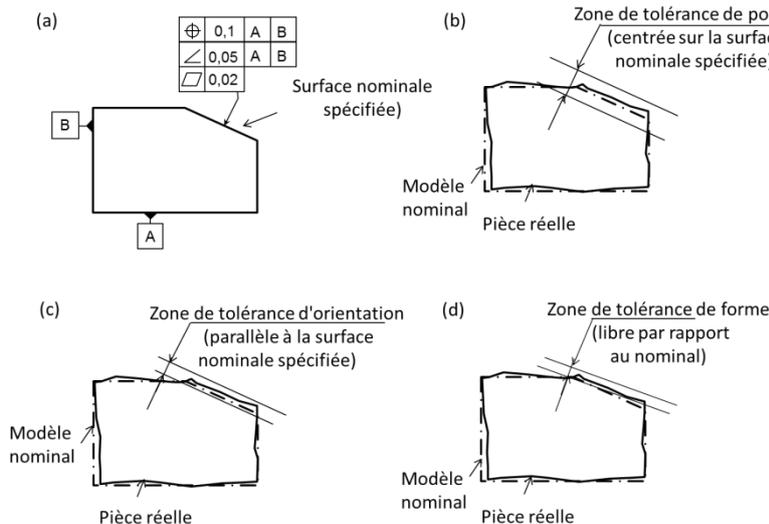


Figure 18 - Position, orientation et forme

L'association des trois spécifications sur la même surface par rapport au même système de référence n'est intéressante que si :

$$\text{Tolérance de position} > \text{tolérance d'orientation} > \text{tolérance de forme}$$

NOTE 1 : La spécification de position permet de maîtriser la position relative des pièces et des surfaces fonctionnelles dans le mécanisme. Ce sont les maillons des chaînes de cotes.

Le cumul d'une spécification d'orientation et d'une spécification de position sur une surface permet de limiter les défauts d'orientation à l'intérieur de la zone de tolérance de position pour maîtriser les effets de bras de levier sur les exigences fonctionnelles.

La spécification de forme permet de garantir la qualité du contact entre les pièces et de limiter les déformations lors de l'assemblage.

NOTE 2 : Lorsque le système de références est incomplet et laisse des mobilités résiduelles, le modèle nominal doit être placé pour que la surface spécifiée soit si possible dans la zone de tolérance.

2.5 Définition de la zone de tolérance sur la surface nominale

2.5.1 Construction de la zone de tolérance

La zone de tolérance est définie par une ou deux surfaces offsets de la surface nominale.

Définition : la surface offset avec un décalage d est la surface composée des points P_i situés à la distance d de la surface nominale.

$$d = \overrightarrow{P_i M_i} \cdot \vec{n}_i$$

- P_i : point de la surface offset.
- M_i : point de la surface nominale le plus proche de P_i .
- \vec{n}_i : normale à la surface nominale au point M_i .
- d : distance du point P_i à la surface nominale (d peut être négatif).

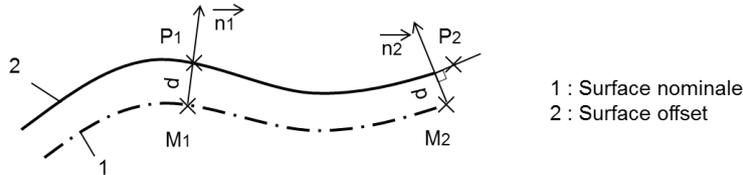


Figure 19 - Définition de la surface offset

NOTE : Si besoin, la surface offset peut être prolongée au-delà de la surface nominale par les points P distants de d à la surface nominale, en utilisant le point M_2 de la surface nominale le plus proche de P et la normale \vec{n}_2 en ce point

2.5.2 Zone de tolérance sur un plan ou sur un axe sans symbole Ø

La zone de tolérance est l'espace compris entre deux plans parallèles distants de t

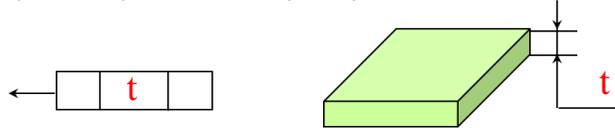


Figure 20 - Zone de tolérance entre deux plans

2.5.3 Zone de tolérance sur l'axe d'une surface de révolution avec symbole Ø

Le modificateur \textcircled{A} indique que l'élément spécifié est l'axe du cylindre réel. La zone de tolérance est l'espace compris dans un cylindre de diamètre t .

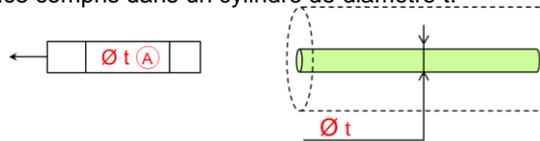


Figure 21 - Zone de tolérance cylindrique

2.5.4 Zone de tolérance sur une surface complexe

La zone de tolérance est l'espace compris entre les surfaces offsets de la surface nominale avec un décalage de $t/2$ de chaque côté.

Si la surface nominale est brisée avec une arête vive, la zone de tolérance est obtenue en faisant l'intersection des surfaces offsets éventuellement prolongées (sans rayon de raccordement).

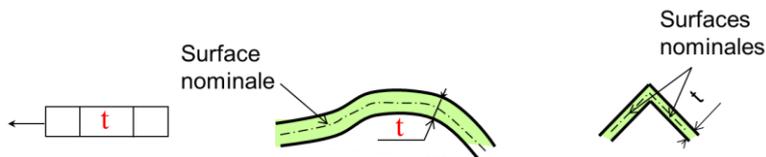


Figure 22 - Zone de tolérance sur une surface complexe

2.5.5 Zone de tolérance au maximum ou au minimum de matière sur un cylindre

Le diamètre D est suivi du modificateur \textcircled{M} ou \textcircled{L} qui indique que la surface réelle spécifiée est la surface du cylindre.

Pour une spécification, le diamètre de la zone de tolérance est placé entre crochets après un symbole \emptyset .

La zone de tolérance est unilimite. Elle est limitée par un cylindre de diamètre D :

Avec le maximum de matière \textcircled{M}

- Pour un arbre, la zone de tolérance est l'espace compris dans le cylindre de diamètre D.
- Pour un alésage, la zone de tolérance est l'espace extérieur au cylindre de diamètre D.

NOTE : La surface réelle spécifiée doit être dans la zone de tolérance, donc le cylindre de diamètre D doit être hors matière.

Avec le minimum de matière \textcircled{L}

- Pour un arbre, la zone de tolérance est l'espace extérieur du cylindre de diamètre D.
- Pour un alésage, la zone de tolérance est l'espace compris dans le cylindre de diamètre D.

NOTE : La surface réelle spécifiée doit être dans la zone de tolérance, donc le cylindre de diamètre D doit être dans la matière.

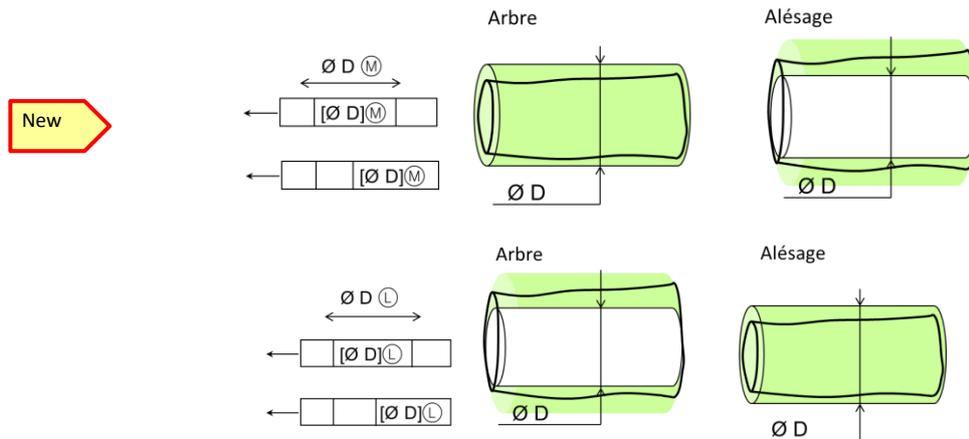


Figure 23 - Zone de tolérance au maxi/mini matière sur un cylindre

2.5.6 Zone de tolérance avec \textcircled{M} ou \textcircled{L} sur 2 plans parallèles face à face

La distance D est suivie du modificateur \textcircled{M} ou \textcircled{L} qui indique que la surface réelle spécifiée est l'ensemble des deux faces latérales. Pour une spécification, la dimension de la zone de tolérance est placée entre crochets sans symbole \emptyset .

La zone de tolérance est unilimite. Elle est limitée par deux plans distants de D :

Avec le maximum de matière \textcircled{M}

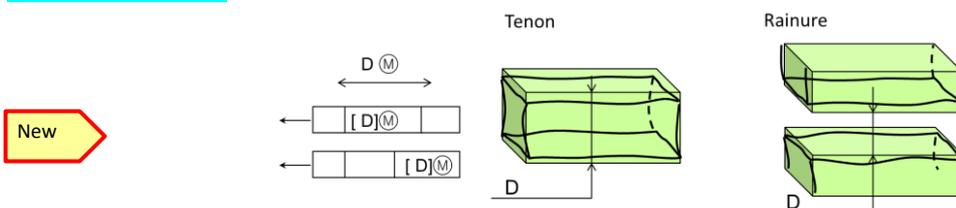
- Pour un tenon (pièce pleine), la zone de tolérance est l'espace compris entre 2 plans distants de D.
- Pour une rainure (pièce creuse), la zone de tolérance est l'espace extérieur aux 2 plans distants de D.

NOTE 1 : La surface réelle spécifiée doit être dans la zone de tolérance, donc les deux plans distants de D doivent être hors matière.

Avec le minimum de matière \textcircled{L}

- Pour un tenon (pièce pleine), la zone de tolérance est l'espace extérieur aux 2 plans distants de D.
- Pour une rainure (pièce creuse), la zone de tolérance est l'espace compris entre les 2 plans distants de D.

NOTE : La surface réelle spécifiée doit être dans la zone de tolérance, donc les deux plans distants de D doivent être dans la matière.



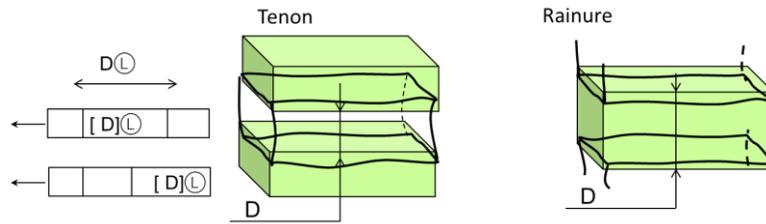


Figure 24 - Zone de tolérance au maxi/mini matière entre deux plans

2.5.7 Zone de tolérance au maximum/minimum de matière sur une surface

Le modificateur \textcircled{M} ou \textcircled{L} indique que la surface réelle spécifiée est la surface. La valeur du décalage d par offset est placée entre accolades sans symbole \emptyset .

La zone de tolérance est unilimite. Elle est limitée par une surface offset avec un décalage d :

- Au maximum de matière, l'offset est du côté de la normale à la surface. La surface au maximum de matière doit être hors matière.
- Au minimum de matière, l'offset est du côté opposé à la normale à la surface. La surface au minimum de matière doit être dans la matière.

NOTE 1 : La normale à la surface est dirigée hors matière. Dans la Figure 25, les offset d sont positifs. Un offset négatif est indiqué sous la forme $\{-0,02\} \textcircled{M}$ par exemple.

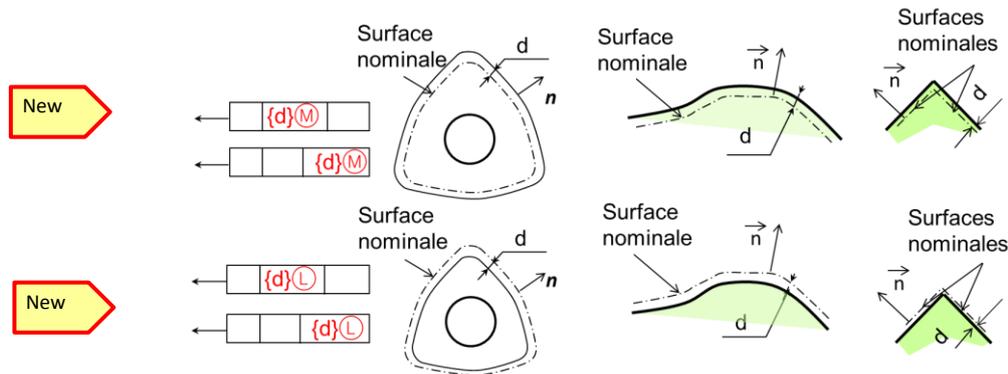


Figure 25 - Zone de tolérance au maxi/mini matière sur une surface

NOTE 2 : la superposition de deux spécifications avec des décalages au \textcircled{M} et au \textcircled{L} différents permet d'obtenir une zone de tolérance non centrée sur la surface nominale.

2.6 Spécification simultanée de plusieurs surfaces

2.6.1 Surface composée

Définition : une surface composée de plusieurs surfaces élémentaires est considérée comme une seule surface, même si elle est fractionnée. Les éléments tolérancés correspondants doivent appartenir à une seule zone de tolérance.

NOTE 1 : Cette zone de tolérance est considérée comme un seul objet insécable et indéformable, mais elle peut être en plusieurs parties et avoir une dimension évolutive.

NOTE 2 : Une surface composée est une entité fonctionnelle le plus souvent reliée à une seule pièce voisine qui assure une fonction ou une liaison et qui ne peut pas être découpée en plusieurs éléments sans rompre la fonction.

Une surface composée est identifiée par l'un des moyens suivant ² :

- le compteur « nc » au-dessus du cadre de tolérance (Figure 26 et Figure 27a),
- le regroupement des surfaces dans une seule zone partielle (Figure 11),
- une liste de zones partielles avec la même lettre ou des lettres différentes séparées par une virgule, placée au-dessus du cadre de tolérance (Figure 27b),
- un symbole O « tout autour » placé sur la ligne repère issue du cadre de tolérance (Figure 27c),

² D'autres modes de création d'une surface composée seront présentés en partie 2.

NOTE 1 : avec le compteur « nc », n lignes repères issues du cadre de tolérance doivent indiquer les n surfaces de la composition. Si la collection de surfaces est composée de surfaces identiques ou clairement implicites, une seule flèche est admise.

Par défaut, le symbole O « tout autour » regroupe toutes les surfaces du contour visible dans la coupe comportant la spécification. Les trous et les rainures qui débouchent sur ces surfaces sont exclus. Si nécessaire des commentaires doivent préciser l'ensemble des surfaces spécifiées.

La Figure 26 comporte une surface composée de 3 plans appelée C. Chaque spécification impose une seule zone de tolérance. (Les plans étant étroits, la mise en position de la pièce en appui sur C ne serait plus assurée en retirant un des plans).

NOTE : la surface nominale spécifiée est fractionnée. La zone de tolérance est inévitablement fractionnée car elle est définie par les surfaces offset de la surface spécifiée. Mais tous les fragments de zones constituent une seule zone qui peut être déplacée globalement.

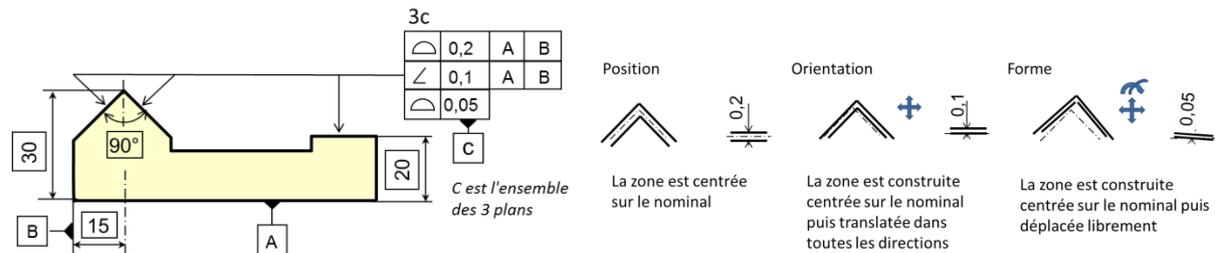


Figure 26 - Spécification d'une surface composée

Dans la Figure 27a, la surface composée est formée de deux cylindres coaxiaux et identiques. Cette surface composée est considérée comme une seule surface. La zone de tolérance $\varnothing 7,98 \text{ (M)}$ est commune aux 2 surfaces élémentaires de la composition. La zone de tolérance $\varnothing 8 \text{ (L)}$ est commune aux 2 surfaces élémentaires de la composition. (Si les cylindres sont de diamètres différents, les spécifications dimensionnelles ne peuvent pas être placées à côté du compteur nc, mais respectivement sur la ligne repère de chacun des cylindres).

Dans la Figure 27b, la planéité est à assurer sur l'ensemble des deux zones partielles A1 et A2 considérées comme une seule surface. La référence A est composée de ces 2 zones partielles.

Dans la Figure 27c, la ligne repère comporte l'indication O « tout autour ». La surface composée A est constituée de l'ensemble des surfaces du contour observable dans le plan de la vue contenant la spécification. La surface composée ne doit pas dépasser la surface offset de la surface nominale avec un offset de 0,05 côté extérieur matière.

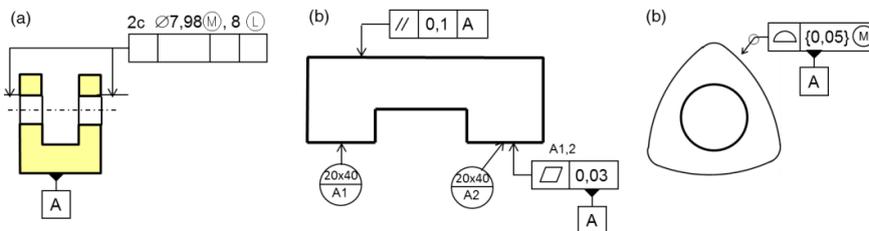


Figure 27 - Exemples de surfaces composées

2.6.2 Spécification d'un groupe

New

Définition : un groupe est une collection de N surfaces spécifiées. Les éléments tolérancés des surfaces spécifiées doivent appartenir à N zones de tolérance ayant des contraintes entre elles.

Un groupe est identifié par le compteur Nx au-dessus du cadre de tolérance

NOTE : Un groupe est une entité fonctionnelle constituée de plusieurs surfaces spécifiées identiques ou similaires le plus souvent reliées à plusieurs pièces différentes mais devant respecter des contraintes entre-elles. La fonction est souvent redondante ou dupliquée (ex : 6 trous de fixation pour 6 vis différentes).

REGLE : Chaque élément du groupe possède sa propre zone de tolérance (Figure 28b).

- (a) En position, chaque zone est centrée sur la surface nominale.
- (b) En orientation, sans CZ, chaque zone est construite centrée sur la surface nominale, puis translaturée indépendamment les unes des autres zones.

- (c) En orientation, avec CZ, chaque zone est construite centrée sur la surface nominale. Les zones sont regroupées en une seule zone commune. Cette zone peut être traduite. Cette spécification n'a d'intérêt qu'avec un système de références.
- (d) En forme, chaque zone est libre par rapport à sa surface nominale et indépendamment les unes des autres zones.

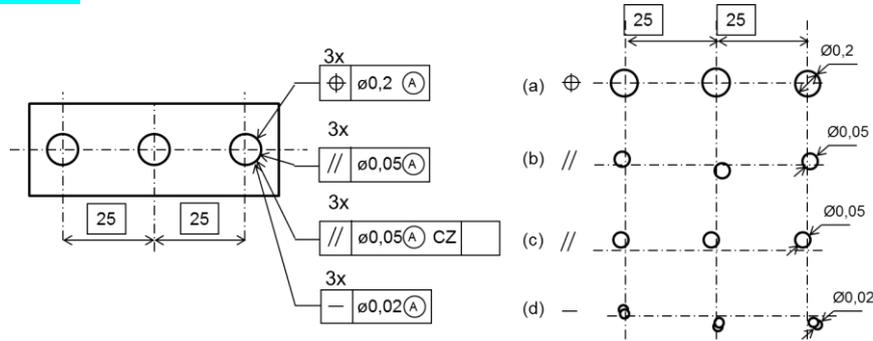


Figure 28 - Spécification d'un groupe de trous

NOTE 1 : Pour un groupe constitué d'éléments tolérancés identiques, une seule flèche relie le cadre de tolérance à une des surfaces. Si les surfaces du groupe sont différentes, il faut une flèche par surface de chaque type

REGLE : Dans un groupe, les spécifications dimensionnelles sont indépendantes pour chaque élément du groupe.

Dans la Figure 29, le compteur 3x définit 3 zones de tolérance $\text{Ø}7,97\text{M}$ et 3 zones de tolérance $\text{Ø}7,99\text{L}$. Toutes ces zones sont libres par rapport au nominal.

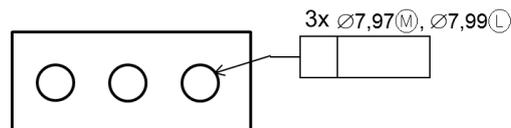


Figure 29 - Spécification dimensionnelle dans un groupe

2.6.3 Spécification d'un groupe de surfaces composées

New Dans un groupe de surfaces composées, le compteur à placer au-dessus du cadre de tolérance est Nx.Kc (Il est préférable de respecter cet ordre).

- N indique le nombre d'éléments dans le groupe.
 - K indique le nombre de surfaces dans la surface composée constituant chaque élément du groupe.
- K flèches issues du cadre de tolérance doivent indiquer les K surfaces spécifiées de la composition. Si les surfaces spécifiées de la composition sont identiques ou clairement implicites, une seule flèche est admise.

La Figure 30 présente un groupe de 2 surfaces composées. Pour chaque spécification, il y a deux zones de tolérance, chacune devant contenir les deux cylindres coaxiaux réels.

NOTE : les 3 spécifications sont indépendantes. Les axes nominaux pour l'orientation sont donc indépendants des axes nominaux pour la position.

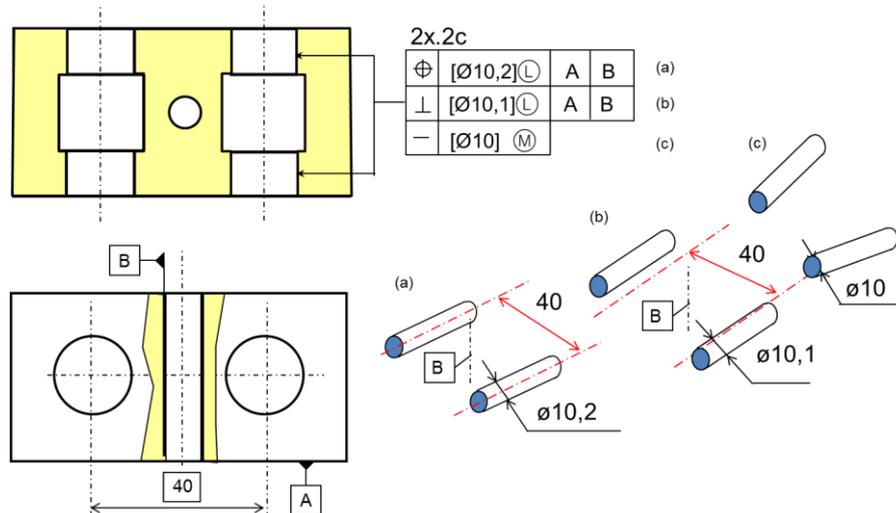


Figure 30 - Groupe de surfaces composées

3. Système de références

3.1 Association des références

3.1.1 Définition d'un système de références

Définition : Le système de références est l'ensemble ordonné des références donné par la partie droite de la spécification.

Les références sont appelées successivement référence primaire, secondaire, tertiaire.

Les références sont désignées sur le modèle nominal par les indicateurs de référence.

Il est recommandé de désigner par A | B | C le système de références principal qui correspond à la mise en position de la pièce dans son mécanisme. Ce système servira en particulier pour mettre en place le tolérancement général.

NOTE 1 : le système de références est déterminé par le concepteur, le plus souvent sur les surfaces d'appui de la pièce sur les pièces voisines ou sur le montage d'usinage. **Il ne peut pas y avoir plus de 3 références dans un système de références.** L'ordre des surfaces doit être choisi pour respecter l'isostatisme de l'assemblage. Pour faciliter la lecture, il est recommandé de nommer les références en respectant l'ordre alphabétique pour les références primaire, secondaire, tertiaire

REGLE : Le système de références est constitué par l'ensemble des références appartenant au modèle nominal. Les références sont donc en position relative parfaite et de dimensions nominales. Le système de références est associé séquentiellement à la pièce réelle, à partir des références primaire, secondaire et tertiaire indiquées dans le cadre de tolérance³.

1. Association de la référence primaire à l'élément de référence primaire
2. Association de la référence secondaire à l'élément de référence secondaire.
3. Association de la référence tertiaire à l'élément de référence tertiaire.

NOTE 2 : L'association d'une référence ne doit pas dépendre des références suivantes. La répartition des références dans le système de références doit répondre aux conditions suivantes :

- Si la référence primaire laisse des mobilités, la référence primaire doit être invariante par ces mobilités.
- Si le système de référence primaire + secondaire laisse des mobilités, les références primaire et secondaire doivent être invariantes par ces mobilités.

Dans le cas contraire, il est souvent nécessaire de regrouper les surfaces dans une seule référence ou de préciser la construction du système de références (voir partie 4).

3.1.2 Critère d'association d'une référence sans modificateur \textcircled{M} ou \textcircled{L}

Le critère d'association permet de positionner la surface nominale (surface parfaite) sur l'élément de référence (surface réelle).

Les critères **Figure 31** sont utilisés pour les liaisons surfaciques et les liaisons avec serrage sans modificateur :

³ Cette procédure appelée le balançage est détaillée dans le chapitre métrologie.

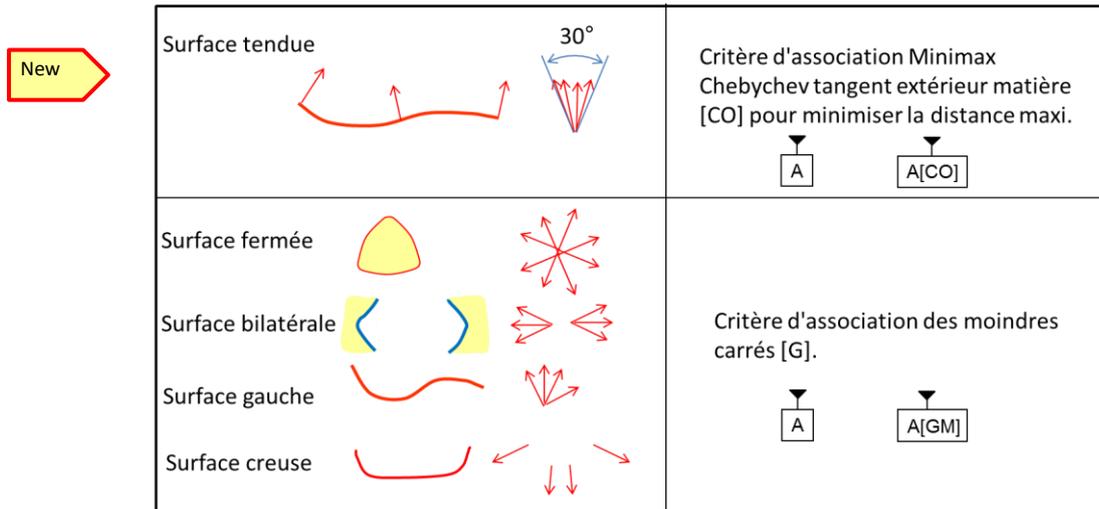


Figure 31 - Critère d'association sans modificateur

Définition : Une surface est dite tendue si toutes ses normales peuvent être placées dans un cône d'angle 30°.

Pour une surface tendue, la liaison est surfacique. La surface nominale sera associée par le critère minimax pour être tangente extérieure matière, en minimisant la distance maxi. Ce critère noté [CO] peut être réalisé par l'algorithme Chebychev en imposant la contrainte de tangence extérieur matière (Chebychev Outside).

La limite de l'angle de 30° étant arbitraire, il est possible d'imposer le critère d'association de la surface nominale en plaçant [CO] ou [GM] (Gauss Moyen) à côté du nom de la surface dans le cadre de référence.

NOTE 1 : Le critère minimax revient à placer la pièce réelle sur un marbre ou un calibre représentant la surface nominale (Figure 32). Une surface tendue ne doit pas être déformée ou mise en contrainte lorsqu'elle est placée sur un calibre.

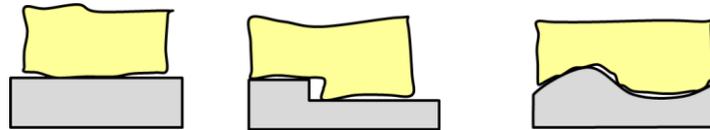


Figure 32 - Surface de contact associée par un critère minimax ou par un calibre

Si la surface n'est pas tendue, la surface nominale sera associée par le critère des moindres carrés. Ce critère noté [GM] peut être réalisé par un simple calcul matriciel défini par Gauss.

NOTE 2 : Le critère des moindres carrés correspond à une déformation élastique de la peau de la surface réelle pour permettre l'assemblage dans un calibre représentant la surface nominale.

3.1.3 Association d'une référence avec modificateur \textcircled{M}

Définition : Une référence au maximum est identifiée par le modificateur \textcircled{M} à droite de la référence.

REGLE Une spécification avec une référence au maximum de matière sur la référence est respectée, s'il existe au moins une position du modèle nominal telle que les éléments de référence et la totalité des éléments tolérancés soient simultanément dans leurs zones de tolérance.

NOTE 1: La spécification n'est pas conforme si l'élément de référence ne peut pas respecter sa zone de tolérance.

La Figure 33 montre que la surface nominale (1) est associée de sorte que la surface (3) offset extérieure matière à la surface nominale (1) soit hors matière. La mobilité résiduelle laissée entre la surface offset (3) sur la référence et l'élément de référence est appelée « flottement ». Ce flottement permet de déplacer légèrement le modèle nominal pour que l'élément tolérancé soit, si possible, dans la zone de tolérance. Il permet donc de compenser certains défauts de position des surfaces réelles spécifiées par rapport à la référence.

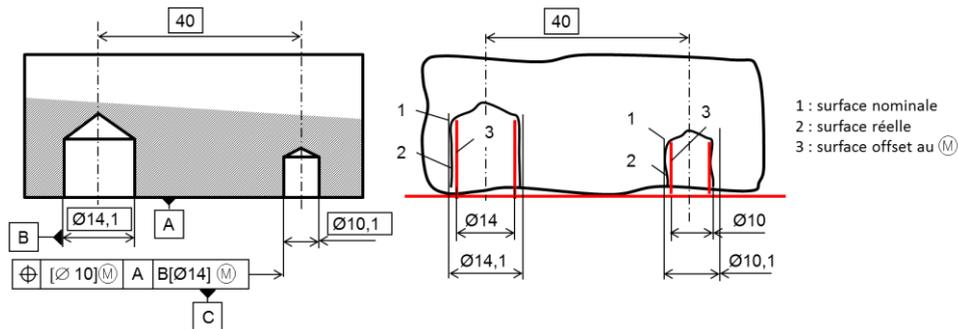


Figure 33 - Association d'une référence au maximum de matière

NOTE : lorsque le système de références et la surface spécifiée sont au maximum de matière, la pièce réelle doit pouvoir s'assembler sur un calibre de contrôle au maximum de matière.

3.1.4 Association d'une référence avec modificateur Ⓜ

Définition : Une référence au minimum de matière est identifiée par le modificateur Ⓜ à droite de la référence.

Une pièce virtuelle aux limites des zones de tolérance sur l'élément spécifié et sur les références est donc admise. Une pièce réelle est acceptée si la surface réelle spécifiée est dans la zone de tolérance avec des éléments de référence qui ont le même effet que les références au minimum de matière.

NOTE : la liaison assurée par le système de références étant parfois surabondante, il n'est pas nécessaire que la zone de tolérance de la référence soit respectée en tous les points.

Un calibre (physique ou numérique) peut représenter la pièce virtuelle avec la référence au minimum de matière et une surface spécifiée nominale.

Un gabarit de contrôle (physique ou numérique) peut représenter le système de références, mais avec des dimensions permettant de recevoir toutes les pièces réelles. (Cette dimension peut être égale à la dimension au maximum de matière de la référence ou laisser un léger jeu)

Pour tout point P de l'élément tolérancé, on appelle flottement f_P , le déplacement maximal du point P appartenant au calibre lorsqu'il est monté sur le gabarit.

- Si l'élément tolérancé est une surface, le déplacement est déterminé dans une direction normale à la surface. La normale est dirigée hors matière pour une spécification au maxi matière sur l'élément tolérancé ou dans la matière pour une spécification au minimum de matière.
- Si l'élément tolérancé est l'axe d'une surface, le déplacement est déterminé dans toutes les directions perpendiculaires à l'axe (par discrétisation dans 8 directions par exemple).

La zone de tolérance étendue est définie par la zone de tolérance de la spécification augmentée en tout point P de la valeur f_P .

New REGLE : Une spécification avec une référence au minimum de matière sur la référence est respectée, si quelle que soit la position de la pièce réelle sur le gabarit, tous les éléments tolérancés sont simultanément dans leurs zones de tolérance étendue.

NOTE 1 : Le flottement f_P est l'influence du jeu entre le gabarit et le calibre au point P. Ce flottement n'est pas forcément symétrique suivant la direction étudiée.

Pour la localisation (1) Figure 34a, la surface spécifiée est le plan C. La référence primaire est le plan A. La référence secondaire est définie par deux plans parallèles B. Cette référence est imposée au minimum de matière.

Le calibre Figure 34b représente la pièce nominale avec la référence B au minimum de matière. La largeur du calibre est $d = 11,95$.

Le gabarit Figure 34c représente le système de référence A|B. La largeur de la rainure du gabarit est $D = 12,03$ (choix arbitraire, légèrement supérieur à la dimension au maximum de matière imposé par (2) pour permettre l'assemblage avec toutes les pièces réelles).

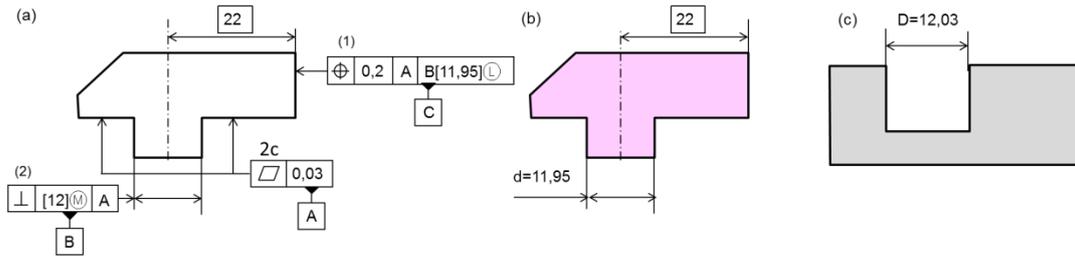


Figure 34 - Spécification avec référence au minimum de matière

La Figure 35a montre le calibre installé en position centrée dans le gabarit, puis déplacé pour maximiser le déplacement du point P1 dans la direction \vec{x} noté f_{P1+} . De même, la Figure 35b montre le déplacement maximum du point P1 dans la direction $-\vec{x}$ noté f_{P1-} .

Dans ce cas simple, le déplacement sera le même quel que soit le point P appartenant au plan tolérancé C. Le flottement est simplement égal à la moitié du jeu J entre le calibre et le gabarit :

$$f = (D-d)/2 = (12,03 - 11,95)/2 = 0,04$$

Pour la localisation (1) Figure 34a, la tolérance est $t = 0,2$. Cette zone de tolérance doit être étendue Figure 35c de la valeur f_{P+} dans la direction \vec{x} et f_{P-} dans la direction $-\vec{x}$. La zone de tolérance étendue est également comprise entre deux plans distants de $T = t + f_{P+} + f_{P-} = 0,2 + 0,04 + 0,04 = 0,28$.

La pièce réelle doit être placée dans le gabarit Figure 35d. La surface tolérancée C doit rester dans la zone de tolérance de largeur T, quelle que soit la position de la pièce dans le gabarit.

La pièce réelle (e) comporte un tenon de largeur proche du maxi matière. Elle n'a plus de mobilité dans le gabarit. La spécification est conforme si la surface tolérancée est dans la zone de tolérance de largeur $T=0,28$. Il y a élargissement de la zone de tolérance (le défaut de perpendicularité admissible est supérieur à 0,2).

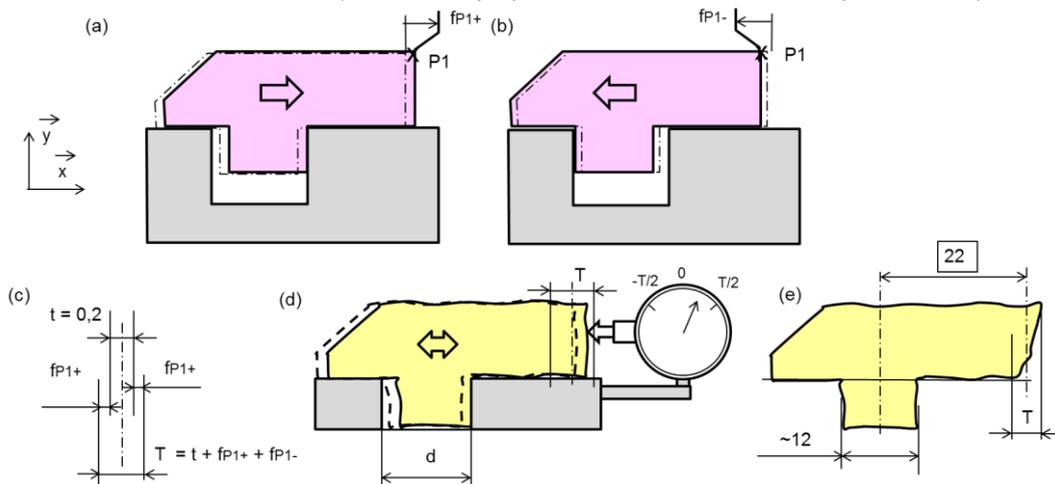


Figure 35 – Contrôle d'une position avec une référence au mini matière

NOTE 2 : un simple comparateur placé sur la surface spécifiée C permettrait de vérifier la conformité de cette pièce à l'intervalle de tolérance T. Ce contrôle peut aussi être simulé sous forme numérique.

NOTE 2 : Le calibre peut être considéré comme la pièce la plus défavorable dans tous les calculs de chaînes de cotes 3D pour déterminer la mobilité maximale de la liaison avec les pièces voisines. Le flottement f_P a normalement été pris en compte dans la chaîne de cotes dans un maillon représentant l'influence du jeu dans la liaison B. Si la pièce réelle est plus large que la pièce au minimum de matière, il y a moins de jeu. La mobilité de la pièce réelle dans le gabarit représente le flottement réellement consommé. Le flottement non consommé permet d'accepter des pièces avec des défauts plus importants sur la surface tolérancée.

3.1.5 Association d'une référence avec un décalage modificateur ▷

Le décalage d'une référence est nécessaire lorsque l'une des pièces se déplace ou se déforme pour compenser des écarts de position entre les références des pièces de la liaison.

New

Définition : dans un système de références, avec le modificateur ▷ « Décalage de la référence », la surface associée peut être translatée par rapport à sa référence, par défaut selon la direction de contrainte entre les références.

- Si une des références est un plan, la direction est normale au plan
- Si les deux références en contraintes sont des cylindres, la direction est la direction de la perpendiculaire commune aux axes des cylindres.

La Figure 36 présente une pièce positionnée par un cylindre A et orientée par le plan B par l'intermédiaire d'une cale bloquée par une vis. Ce réglage permet de compenser l'écart de position l'élément de référence secondaire B par rapport l'élément de référence primaire A.

NOTE : Le plan B est inévitablement réalisé avec une certaine tolérance par rapport à A. (La distance de B à A est plus ou moins grande). Il peut être impossible de trouver un plan B nominal, minimax, extérieur matière. Il faut ajouter une mobilité qui correspond au déplacement de la cale.

Pour la localisation, le modificateur \triangleright sur la référence secondaire permet d'associer à la surface réelle un plan décalé de δ par rapport à la surface nominale B dans la direction \vec{p} normale au plan B. Le critère d'association est le critère minimax.

La référence B est le plan nominal à 10mm de A. Il oriente parfaitement le modèle nominal pour permettre la vérification de la localisation.

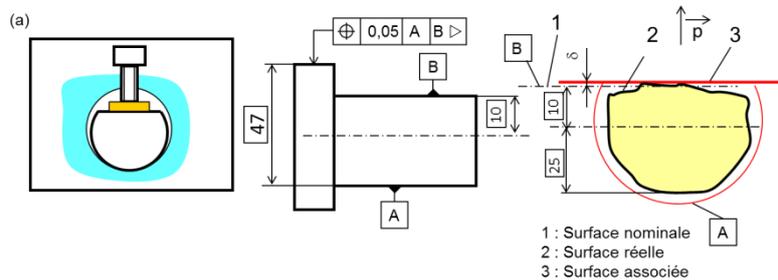


Figure 36 - Décalage d'un plan selon la normale au plan

La Figure 37a représente une pièce recevant une pièce déformable mise en position par un appui plan sur A, un centreur sur B et une orientation par C. La déformation compense les différences d'entraxes entre les deux pièces. La pression de contact autour de C sera donc bien répartie indépendamment de la distance. L'association par les moindres carrés doit se faire indépendamment de la distance de C par rapport à B.

Pour la localisation, le modificateur \triangleright sur la référence tertiaire C permet d'associer à l'élément de référence C un cylindre décalé de δ par rapport à la surface nominale C dans la direction \vec{p} formée par B et C. Le critère d'association est le critère des moindres carrés.

NOTE : Pour la Figure 37b, c'est la pièce spécifiée qui est déformable pour compenser les différences d'entraxes. La cotation est identique.

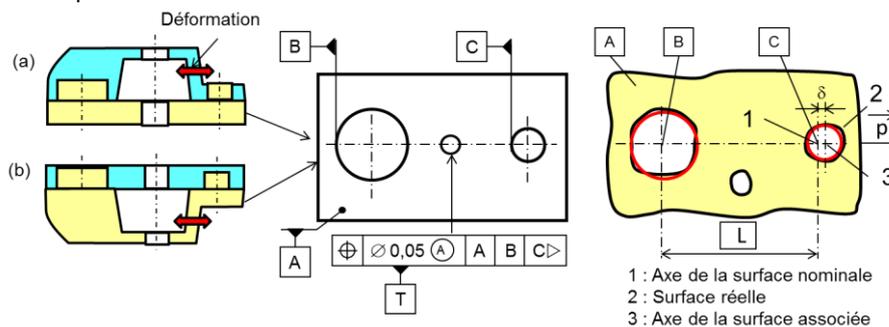


Figure 37 - Décalage d'un cylindre

3.1.6 Association d'une référence sur un filetage

La référence sur un filetage est normalement définie sur les flancs des filets.

- La référence sur un taraudage est simulée en serrant un tampon fileté dans le taraudage. En référence primaire, une rondelle sphérique éviter d'orienter le tampon avec la face avant.
- La référence sur un filetage est simulée en serrant une bague fileté sur le filetage.

La référence est identifiée à l'aide de la partie cylindrique du tampon ou de la bague.

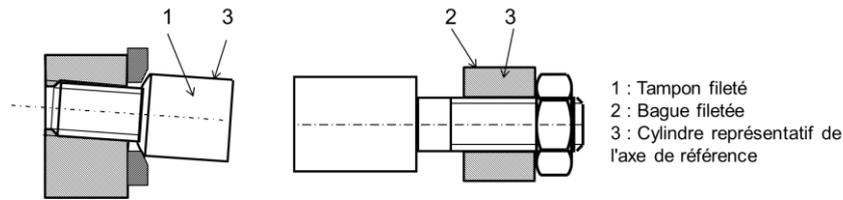


Figure 38 - Référence sur un filetage

3.1.7 Système de références incomplet

Le système de références de la spécification peut être incomplet et ne pas positionner complètement le modèle nominal sur la pièce réelle. Dans ce cas, la mobilité résiduelle peut être exploitée pour balancer le modèle nominal afin que la surface réelle spécifiée soit, si possible, dans la zone de tolérance.

NOTE : Le balançage doit avoir pour objectif de rapprocher la surface nominale de la surface spécifiée et pas de l'écarter pour biaiser la mesure.

Dans la Figure 39a, le système de références ne comporte que le cylindre primaire A. La zone de tolérance de position est centrée sur la surface nominale. Sur la pièce réelle, l'association du cylindre primaire centre le modèle nominal sur le cylindre réel. Le modèle nominal a une mobilité résiduelle en rotation et en translation suivant A. La position angulaire du modèle nominal doit être recherchée pour placer, si possible, la surface réelle B dans la zone de tolérance.

Dans la Figure 39b, le système de références ne comporte que le plan primaire A. La zone de tolérance d'orientation est parallèle à la surface nominale. Sur la pièce réelle, l'association du plan primaire positionne le modèle nominal sur la surface réelle. Le modèle nominal a une mobilité résiduelle et peut glisser sur le plan A. La position angulaire du modèle nominal doit être recherchée pour placer, si possible, la surface réelle B dans la zone de tolérance.

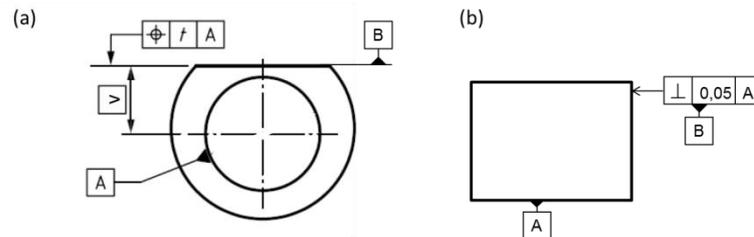


Figure 39 - Système de références incomplet

NOTE : Si le système de références de la spécification est incomplet, la mobilité disponible permet de translater ou d'orienter le modèle nominal, donc la ou les zones de tolérances qui lui sont attachées. Les zones de tolérance d'orientation peuvent ensuite être translattées par rapport au nominal.

3.2 Influence de l'ordre des références

3.2.1 Notion de priorité des références

La Figure 40 illustre l'influence de l'ordre de références pour les surfaces désignées par A et B :

En (b) et (e), le plan A est primaire. La référence A du modèle nominal est plaquée sur l'élément de référence A en bloquant deux degrés de liberté en rotation. La référence B est minimax à la surface réelle B en imposant notamment le dernier de liberté en rotation autour de la normale au plan A. L'écart dépend du défaut de perpendicularité de B par rapport à A.

La position relative de la surface nominale tolérancée par rapport à la surface réelle tolérancée dépend de l'ordre des références.

Définition : la liaison prioritaire est celle qui impose le plus de degrés de liberté en rotation.

Exception : une liaison sphérique est toujours primaire.

A titre d'exemple, les deux cotations pourrait correspondre respectivement aux deux assemblages représentés Figure 40c et Figure 40f. L'orientation de la pièce est ici imposée par le contact plan sur plan assuré par la vis. Le concepteur doit donc analyser l'étendue des surfaces et les efforts appliqués pour déterminer l'ordre des références et s'assurer que le comportement obtenu avec le système de références correspond bien au besoin fonctionnel. L'ordre des références est donc imposé par la mise en position des pièces.

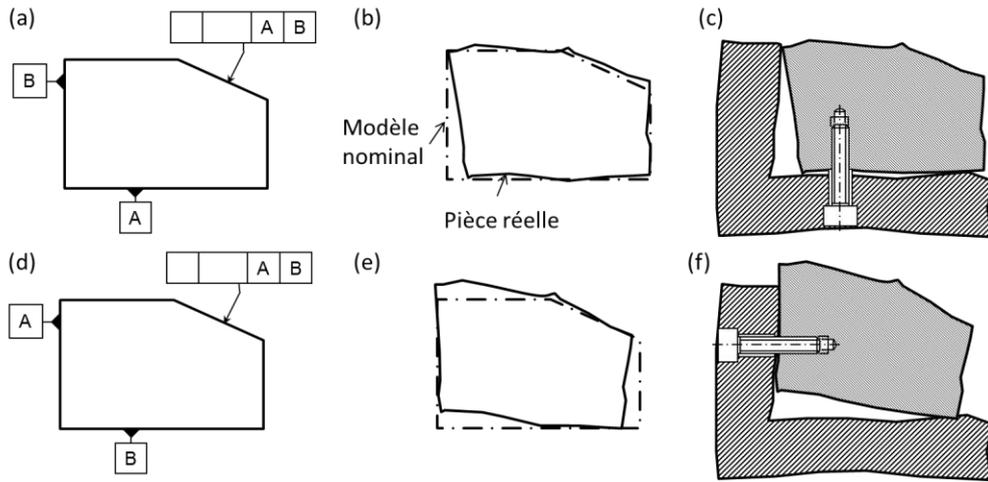


Figure 40 - Influence de l'ordre des références

3.2.2 Détection d'erreurs dans un système de références

REGLE : Si une spécification comporte un système de références complet formé des références primaire A, secondaire B et tertiaire C, il est possible d'avoir sur ce même dessin d'autres spécifications avec les systèmes A|B|C, A|B ou A, mais il n'est pas possible d'avoir d'autres spécifications avec un ordre inversé ni d'avoir B ou C seul. (Figure 41).

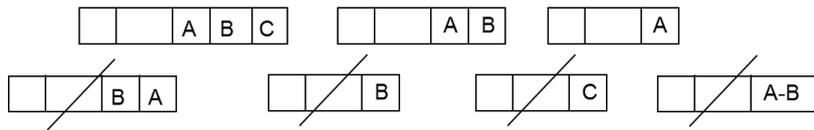


Figure 41 - Cohérence des différents systèmes de références d'une pièce

NOTE 1 : Une exception pourrait être une pièce qui change d'appui au cours de ses différentes phases de fonctionnement.

NOTE 2 : Dans certains systèmes de références, les références secondaires et tertiaires peuvent être permutées sans changer l'association du modèle nominal.

3.3 Référence commune

3.3.1 Définition d'une référence commune

REGLE : Si une référence d'un cadre de tolérance indique une liste de références séparées par un tiret (ex : A-B-C) :

- l'élément de référence correspondant est constitué de l'ensemble des éléments de référence de la liste.
- la référence est constituée des surfaces nominales correspondantes, en positions relatives exactes, associées par une seule opération aux éléments de références.
- Lorsqu'un modificateur est appliqué à l'ensemble des surfaces, la liste des surfaces est placée entre parenthèses.
- Si A désigne une surface, A-A désigne l'ensemble des surfaces identiques à A

La Figure 42 illustre quelques différentes formes d'écriture :

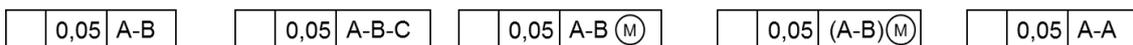


Figure 42 - Constitution de références communes

NOTE 1 : L'emploi d'une référence sur une surface composée est assez courant (plans coplanaires, cylindres parallèles ou coaxiaux par exemple). Il peut être étendu à des surfaces de natures différentes pour constituer une surface complexe. Il est généralement nécessaire de spécifier la qualité de l'ensemble des éléments de références, ce qui permet de nommer cette référence par une seule lettre sous le cadre de tolérance. L'emploi des références communes avec des lettres différentes est donc assez rare.

NOTE 2 : l'association en référence commune nécessite une cohérence de la géométrie et des modificateurs, car l'association des surfaces nominales doit se faire en une seule opération et avec un seul critère.

NOTE 3 : Pour des alésages parallèles, lorsque la lettre A désigne un des alésages, la référence A-A désigne toutes les alésages identiques à la surface A

3.3.2 Exemples

Dans la Figure 43, les écritures des colonnes a et b sont rigoureusement équivalentes. Dans tous les cas, l'élément de référence est constitué par les deux surfaces réelles et l'association de la référence à l'élément de référence est obtenue en une seule opération.

En colonne a, A et B désignent les deux surfaces. La référence commune est formée par les deux surfaces nominales A et B.

En colonne b, dans les cas (1), (2) et (3), l'indicateur de référence A est placé sous le cadre de tolérance. A est directement constitué de l'ensemble des surfaces spécifiées par cette spécification. Dans le cas (2), les cylindres peuvent être de diamètres identiques ou différents. Dans le cas (4), A est l'ensemble des deux plans identifiés par la cote en face du cadre de référence.

Dans la Figure 43, les références sont les surfaces nominales et sont associées aux surfaces réelles en une seule opération.

- Cas 1 : Les plans nominaux sont coplanaires.
- Cas 2 : Les cylindres nominaux sont coaxiaux et de diamètres nominaux.
- Cas 3 : Les cônes nominaux sont coaxiaux et en positions relatives nominales.
- Cas 4 : Les plans nominaux sont parallèles.

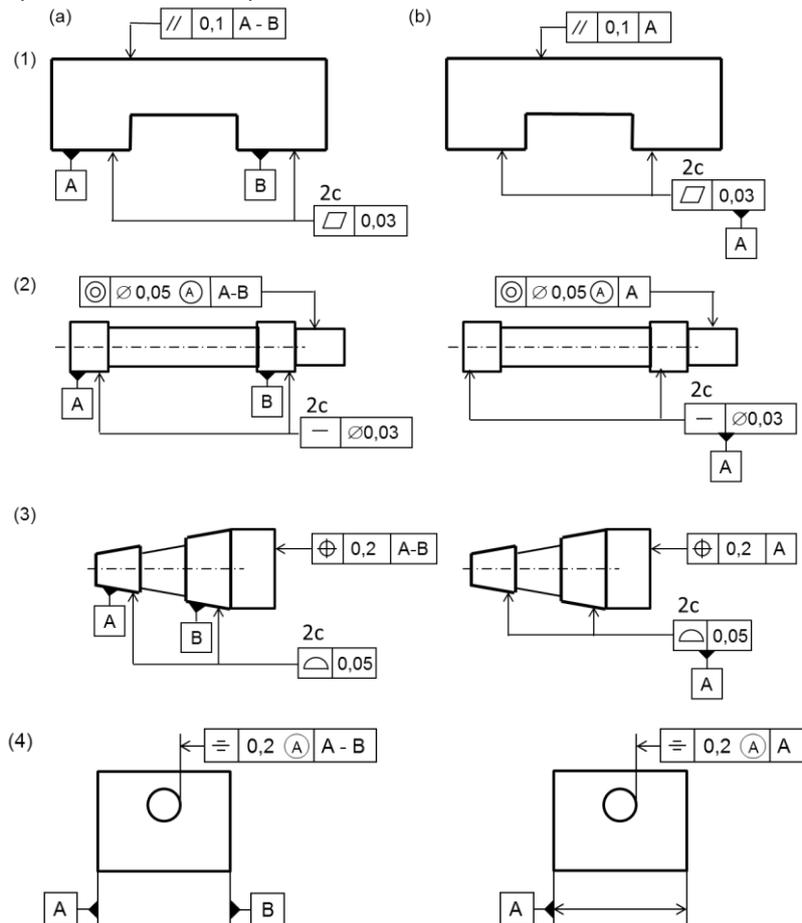


Figure 43 - Ecritures équivalentes d'une référence commune

NOTE : Dans le cas 2, si les diamètres nominaux sont différents, l'association est réalisée avec des offsets différents pour chaque cylindre.

Dans le cas 3, si les cônes ne sont pas sur la même surface support, l'association est réalisée avec des offsets différents pour chaque cône.

La Figure 44 illustre la spécification d'un groupe d'alésages.

Dans les 3 cas (a), (b) et (c), la localisation (1) porte sur les axes réels des alésages. Le cadre de référence B désigne l'ensemble des 2 ou 3 alésages. Dans la localisation (2), la référence secondaire B du modèle nominal est associée à l'ensemble des alésages par le critère des moindres carrés.

Dans la Figure 44b, la localisation (1) est reliée aux deux cylindres par deux flèches, car les surfaces spécifiées ne sont pas identiques (il faut au moins une flèche pour chaque type d'éléments différents. La localisation (3) est rigoureusement équivalente à la localisation (2), car B est formé par les surfaces C et D.

Dans la Figure 44c, C désigne l'alésage central uniquement. La localisation (3) est rigoureusement équivalente à la localisation (2), car C-C est formé par l'ensemble des alésages identiques à l'alésage C.

NOTE : dans le cas (3), il n'est pas nécessaire d'identifier que C est spécifié en tant que groupe dans (1) pour construire C-C (principe d'indépendance).

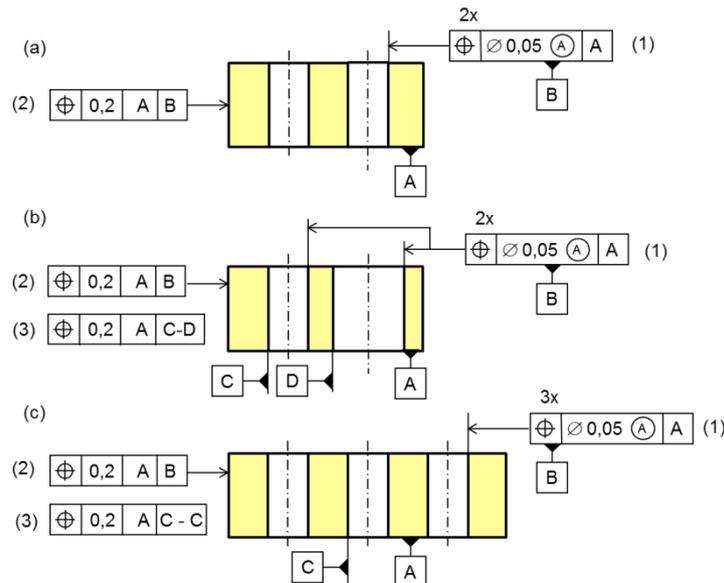


Figure 44 - Désignation des surfaces dans un groupe

4. Spécification en plage projetée \textcircled{P}

4.1 Fonction d'une spécification en plage projetée

4.1.1 Assemblage d'un cylindre serré

Le but des spécifications en plages projetées est de simuler les assemblages avec une liaison auto-centrante pour définir directement la position d'une surface fonctionnelle. Dans la Figure 45, l'arbre est serré dans le bâti. L'exigence fonctionnelle est la coaxialité $\varnothing 0,08\text{mm}$ de la portée supérieure de l'arbre par rapport à la référence A du bâti. En allouant une tolérance de 0,03 pour la coaxialité de l'arbre, il faut que l'alésage positionne l'axe de l'arbre avec une tolérance $\varnothing 0,05$ dans cette plage fonctionnelle.

Définition : lorsque le modificateur \textcircled{P} est placé à droite de la tolérance, la surface spécifiée est prolongée par une surface nominale associée à la surface spécifiée par la méthode des moindres carrés.

Si la surface spécifiée à projeter est composée de plusieurs surfaces, elle est implicitement une surface composée.

Pour une surface de révolution, l'élément tolérancé est l'axe de l'élément nominal associé.

Pour un plan, l'élément tolérance est le plan associé.

L'élément tolérancé doit être dans la zone de tolérance sur la plage délimitée par le symbole \textcircled{P}

NOTE : La surface spécifiée est la surface réelle (pas la projection). Un indicateur de référence sous le cadre de référence désigne la surface réelle. La flèche issue du cadre de tolérance doit pointer de préférence sur la surface spécifiée (pas sur la plage projetée).

La plage projetée est définie par un trait mixte fin à double points situé dans le prolongement la surface spécifiée. L'étendue de la plage projetée est toujours écrite à droite du symbole \textcircled{P} . Cette valeur est encadrée. Si l'étendue projetée est nulle, le symbole \textcircled{P} est seul.

Le décalage éventuel de la zone projetée par rapport à une surface prise comme référence est également décrit par une cote encadrée placée obligatoirement à gauche du symbole \textcircled{P} .

Pour éviter les ambiguïtés, cette cote est de préférence décalée par rapport au \textcircled{P} si l'étendue projetée est nulle.

En 3D, la projection de la surface projetée peut être définie par une surface construite dans le modèle.

Dans la Figure 45, la surface spécifiée est l'alésage. La projection est réalisée en associant à l'alésage réel un cylindre par les moindres carrés avec offset. L'axe de ce cylindre associé doit être dans la zone de tolérance $\varnothing 0,05$ dans la plage \textcircled{P} .

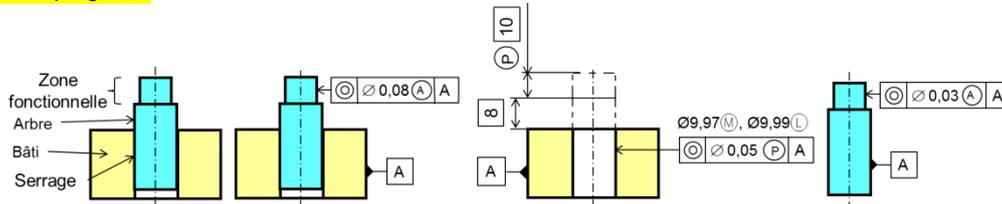


Figure 45 - Spécification en plage projetée d'un alésage

NOTE 1 : La projection d'une surface est indépendante des autres surfaces.

NOTE 2 : L'emploi des spécifications en plages projetées correspond généralement à des liaisons assurées par un composant intermédiaire rigide (pion, lardon) ou élastique (douille fendue). Ces composants doivent être serrés dans la pièce spécifiée. Ils sont souvent montés avec du jeu dans l'autre pièce. Le diamètre réel du composant qui sera assemblé est inconnu dans la plage \textcircled{P} .

4.1.2 Assemblage d'une vis

La vis doit être alignée dans le trou taraudé. Le trou lisse de la pièce supérieure doit laisser passer librement la vis.

La surface spécifiée est le taraudage (flancs du filet). La projection est réalisée en associant au taraudage un axe à l'aide d'un tampon fileté serré dans le taraudage. L'élément tolérancé est l'axe de ce tampon. Il doit être dans la zone de tolérance $\varnothing 0,05$ dans la plage \textcircled{P} .

NOTE : L'emploi des tolérances projetées dans ce cas est très fréquent car il permet de supprimer deux problèmes. Il est en effet très difficile de faire des mesures à l'intérieur du trou taraudé pour en déterminer la position. Par contre, en plaçant un tampon fileté dans le taraudage (avec une rondelle sphérique pour éviter que le tampon s'oriente sur la face supérieure), il est aisé de définir la position de la partie qui dépasse. Le second avantage est que le contrôle dans la partie projetée (qui correspond à la plage de passage de la vis) est le strict besoin fonctionnel. Il n'est alors plus nécessaire d'imposer une orientation et une position sévère du trou taraudé. Seule la partie utile est spécifiée.

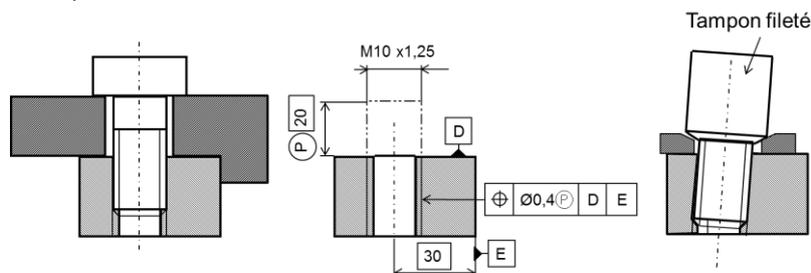


Figure 46 - Spécification en plage projetée d'un taraudage

4.2 Exemple de spécifications en plages projetées

La Figure 47 illustre un assemblage avec un pion serré et une vis serrée dans la pièce inférieure. L'assemblage est réalisé avec du jeu dans la pièce supérieure. La plage fonctionnelle pour la montabilité correspond donc à l'épaisseur de la pièce supérieure.

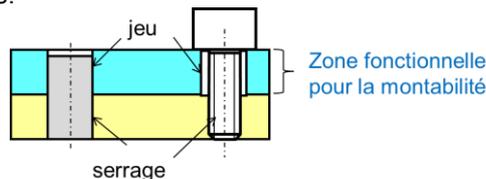


Figure 47 - Assemblage avec pion et vis serrés

La Figure 48 présente les principales règles :

- (1) L'alésage spécifié s'appelle E.

- (2) Les deux cotes au maximum de matière et au minimum de matière garantissent respectivement les exigences de serrage maxi et mini du pion dans l'alésage.
- (3) La plage projetée \textcircled{P} de l'alésage E est représentée par un trait mixte fin à double points. Elle a une longueur de 10 mm (longueur d'implantation du pion dans la pièce supérieure).
- (4) La spécification porte sur l'axe de l'alésage identifié par la méthode des moindres carrés. Cet axe doit pouvoir être placé dans un cylindre $\text{Ø}0,04$ perpendiculaire à D sur les 10 mm de la plage projetée \textcircled{P} .
- (5) Le taraudage est spécifié par un M8 avec un ajustement 6H-6H.
- (6) La plage projetée \textcircled{P} du taraudage est représentée par un trait mixte fin à double points. Elle a une longueur de 12 mm (épaisseur totale de la pièce supérieure).
- (7) La spécification porte sur l'axe de du taraudage identifié en serrant un tampon fileté dans le taraudage. L'axe du tampon doit pouvoir être placé dans un cylindre $\text{Ø}0,2$ centré sur l'axe nominal sur l'étendue de 12 mm de la plage projetée \textcircled{P} du taraudage. Pour cette spécification, le modèle nominal est associé au plan D par le critère minimax. L'axe du cylindre associé à E doit se trouver dans un cylindre $\text{Ø}0,04$ centré sur la surface nominale E dans la plage \textcircled{P} de l'alésage. Ce système de références possède une mobilité résiduelle en rotation autour de E et un flottement résiduel de l'axe de E dans le cylindre $\text{Ø}0,04$. Ces mobilités résiduelles permettent de placer, si possible l'axe du taraudage dans la zone de tolérance.

New

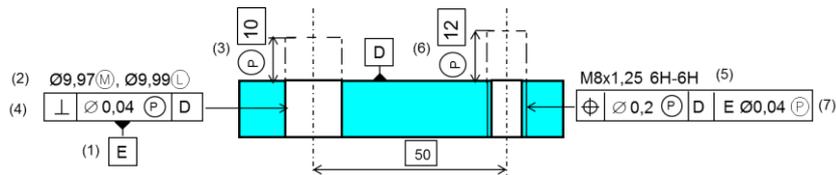


Figure 48 - Spécification en plage projetée

NOTE : les spécifications (4) et (7) sont équivalentes respectivement à une perpendicularité au maximum de matière et à une référence $E\textcircled{M}$ appliquées à pièce équipée avec un pion de diamètre maxi.

4.3 Référence sur une plage projetée

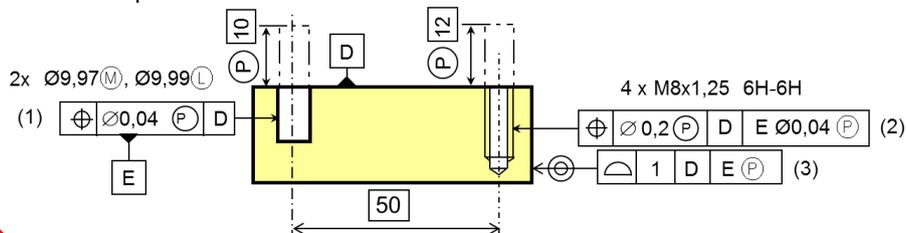
4.3.1 Référence avec zone de tolérance

La Figure 49 comporte une mise en position par deux pions serrés.

La localisation (1) impose que les axes des alésages soient simultanément dans 2 cylindres de diamètre $t = 0,04$, centrés sur les axes nominaux. Si les pions montés dans les alésages E sont de diamètre D maxi, le diamètre au maximum de matière des pions assemblés est donc $D_{\text{maxi}} + t$.

La localisation (2) comporte une référence secondaire $E\text{Ø}0,04\textcircled{P}$.

- Si les jeux entre les pions montés dans E et la pièce supérieure sont supposés favorables à l'assemblage des vis, la montabilité doit être étudiée avec les pions au maximum de matière. Cela signifie que si les pions montés dans les alésages E sont de diamètre D maxi, le cylindre au maxi matière de diamètre $D_{\text{maxi}} + 0,04$ doit être hors matière. Pour la localisation (2), ceci revient à imposer que les deux axes des alésages E soient dans les deux cylindres $\text{Ø}0,04$. (Le flottement possible est rigoureusement équivalent au flottement obtenu avec une référence au maximum de matière).
- Si les jeux entre les pions montés dans E et la pièce supérieure sont supposés défavorables à l'assemblage des vis, la montabilité doit être étudiée avec les pions au minimum de matière. Cela signifie que si les pions montés dans les alésages E sont de diamètre D mini, le cylindre au mini matière de diamètre $D_{\text{mini}} - 0,04$ doit être dans la matière. Pour la localisation (2), ceci revient à imposer que les deux axes des alésages E soient dans les deux cylindres $\text{Ø}0,04$. (Le flottement possible est rigoureusement équivalent au flottement obtenu avec une référence au minimum de matière).



New

Figure 49 - Référence sur une plage projetée

Dans les deux cas, la référence secondaire est définie par $E\text{Ø}0,04\textcircled{P}$. Les deux axes associés aux deux alésages doivent être situés dans deux cylindres $\text{Ø}0,04$ centrés sur leurs axes nominaux (perpendiculaires à D). Cette référence projetée avec une zone de tolérance laisse un flottement résiduel du modèle nominal pour placer si possible les éléments spécifiés dans leur zone de tolérance (Figure 50).

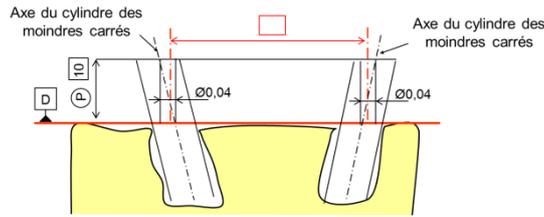


Figure 50 - Référence avec une tolérance sur la plage projetée

4.3.2 Référence sans zone de tolérance

Pour les assemblages avec déformation de l'une des pièces, il y a auto-centrage des pièces. Il n'y a donc pas de flottement sur la référence en zone projetée. Il n'a pas de tolérance sur la plage projetée de la référence. Cette écriture doit également être utilisée pour définir un tolérancement général sur une liaison assurée par deux pions.

Le modèle nominal est associé par les moindres carrés aux projections des axes des alésages ou des taraudages. Pour cela, l'écart e_i est calculé pour les deux points d'intersection de l'axe associé à chaque élément de référence avec les limites de la plage de projection.

Le nominal est position de sorte que la somme $S = \sum e_i^2$ soit minimale.

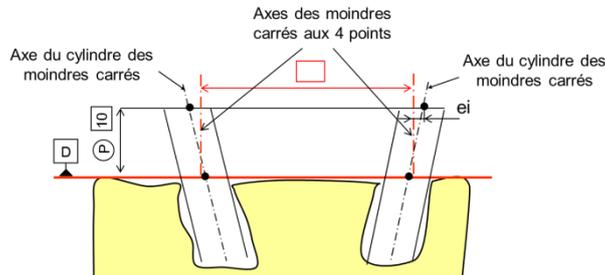


Figure 51 - Référence sans tolérance sur la plage projetée

Si l'élément de référence en plage projetée est un plan ou une surface, en primaire, le modèle nominal est directement confondu avec cet élément projeté. En secondaire ou tertiaire, l'association est assurée par les moindres carrés avec un calcul intégral sur toute la surface.

5. Répétition

5.1 Répétition d'une spécification géométrique

REGLE : Lorsqu'une spécification est reliée à plusieurs surfaces par plusieurs flèches, sans compteur n_x ou n_c ou autre indication de construction d'une surface composée, la spécification est considérée comme dupliquée sur chacune des surfaces spécifiées.

Les deux cotations Figure 52a et Figure 52b sont donc rigoureusement équivalentes. Les trois spécifications sont indépendantes.

Définition : Le compteur n_r au-dessus d'un cadre de tolérance indique que la spécification doit être dupliquée n fois sur les surfaces identifiées par les n flèches issues du cadre de tolérance (Figure 52c).

NOTE 1 : Une répétition est appliquée à des surfaces fonctionnelles indépendantes ou reliées à des pièces voisines indépendantes n'ayant aucune contrainte entre-elles.

NOTE 2 : lorsqu'il y a une répétition N fois d'une spécification, il y a une mesure par spécification et donc N résultats et N décision de conformité (une pour chaque spécification dupliquée).

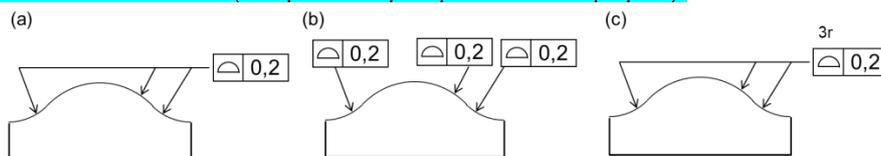


Figure 52 – Répétition implicite d'une spécification

NOTE 3 : Cette écriture avec le compteur nr (Figure 53b), est préférable à la répétition implicite (Figure 53a), car elle évite de vérifier si les différentes surfaces n'appartiennent pas à une autre collection, pour former par exemple une surface composée de zones partielles.
Si les éléments spécifiés sont identiques ou similaires et facilement identifiables, une seule flèche est suffisante pour identifier les n surfaces (Figure 53c).

5.2 Répétition d'une référence

REGLE : Lorsque la répétition identifiée par nr est appliquée à un motif dupliqué n fois, il est possible de mettre un indicateur de référence sous le cadre de tolérance. Chacune des surfaces des différents motifs constitue une référence A au sein de son motif (Il y a donc n références A).

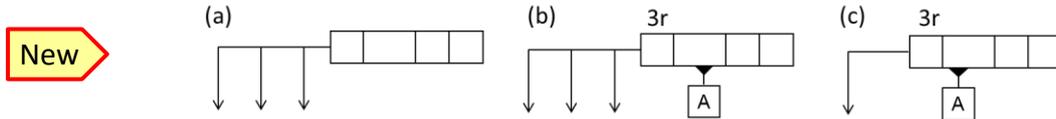


Figure 53 - Ecriture d'une répétition

Dans la Figure 54a, il y a 3 surfaces A (une dans chaque motif).
Dans les Figure 54b, c et d, la lettre A désigne l'ensemble des 3 surfaces.

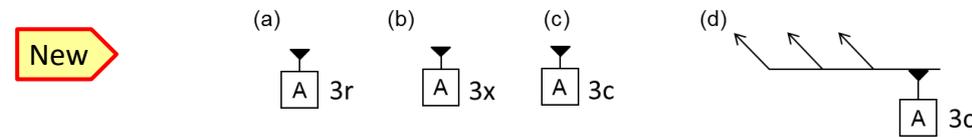


Figure 54 - Désignation d'une collection de surfaces

NOTE : Il n'est pas nécessaire de mettre un compteur à droite d'une référence placée sous un cadre de tolérance. Par contre, s'il y a un compteur, sa signification est prépondérance par rapport au compteur placé au-dessus du cadre de tolérance.

5.3 Répétition de diamètres

Dans la figure Figure 55a, le compteur 2c précise que la surface est composée des deux cylindres et doit être considérée comme une seule surface appelée A. Il n'y a qu'une seule zone de tolérance $\varnothing 30\text{M}$ pour les deux cylindres et une seule zone de tolérance $\varnothing 29,9\text{L}$ pour les deux cylindres.

Dans la figure Figure 55b, l'indication 2r précise que la spécification doit être considérée comme dupliquée sur les deux cylindres. Chaque cylindre a une zone de tolérance $\varnothing 30\text{M}$ et une zone de tolérance $\varnothing 29,9\text{L}$. Chaque surface s'appelle A.

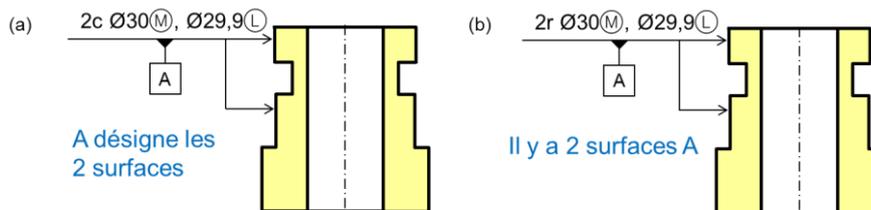


Figure 55 - Surface composée et surfaces indépendantes

NOTE : Le compteur 2x n'aurait pas de sens car les cylindres sont coaxiaux. Ils ne forment pas un groupe de cylindres parallèles.

5.4 Répétition d'autres indications locales

De multiples spécifications peuvent être répétées avec le compteur de répétition nr (Figure 56a). La seule difficulté est la lisibilité de la désignation implicite des surfaces sur un dessin papier. Il peut être nécessaire d'ajouter des flèches ou des commentaires (Figure 56b).

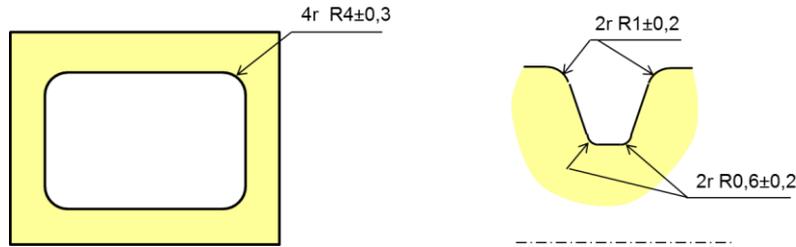


Figure 56 - Répétition d'un rayon

La répétition implicite ne peut pas s'appliquer à des surfaces ou des entités différentes car il peut y avoir un doute sur les éléments spécifiés (Figure 57a). Il faut impérativement désigner les différentes surfaces (Figure 57b).

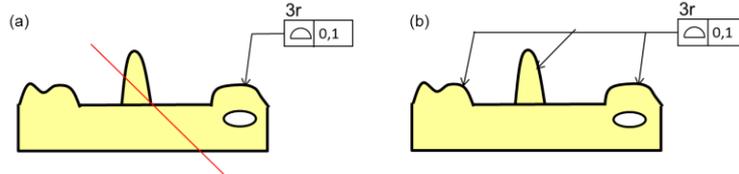


Figure 57 - Usage litigieux d'une répétition implicite

6. Tolérancement complémentaire

6.1 Tolérancement général de toutes les surfaces

Avec le symbole $\textcircled{\ominus}$ sur la ligne repère, la spécification s'applique au groupe formé par la totalité des surfaces de la pièce. Le tolérancement général peut être imposé par une spécification de position de surfaces quelconque. (symbole $\textcircled{\ominus}$ sans $\textcircled{\emptyset}$). Toutes les surfaces réelles doivent être dans leurs zones de tolérance centrées sur le modèle nominal et positionnées par rapport au système de références. Les chanfreins et congés non représentés sur le modèle nominal mais spécifiés directement sur une arête ou par un commentaire au-dessus du cartouche sont également inclus dans l'ensemble des surfaces spécifiées.

Pour les taraudages, la surface spécifiée considérée est le cylindre correspondant au diamètre primitif, Le plan de fond de filet est le plan limite perpendiculaire à l'axe du filetage tel que le flanc de filet respecte le profil du filetage au maximum de matière.

NOTE 1 : Un commentaire placé au-dessus du cadre de tolérance peut limiter l'étendue des surfaces.

NOTE 2 : Les zones sont positionnées par rapport au système de références qui est généralement le système de références principal de la pièce. Dans la spécification de tolérancement général, il ne faut pas de modificateur $\textcircled{\ominus}$, $\textcircled{\text{M}}$ ou $\textcircled{\text{P}}$ sur les références, afin de permettre la validation de chaque surface de la pièce, indépendamment des autres surfaces.

NOTE 3 : Cette spécification évite les collisions avec les pièces voisines (exigence de distance avec les surfaces des pièces voisines) et de garantir une épaisseur minimale pour toutes les parois (exigence entre surfaces de la pièce étudiée). Cette spécification permet notamment de spécifier les surfaces brutes par rapport au système de références de mise en position de la pièce.

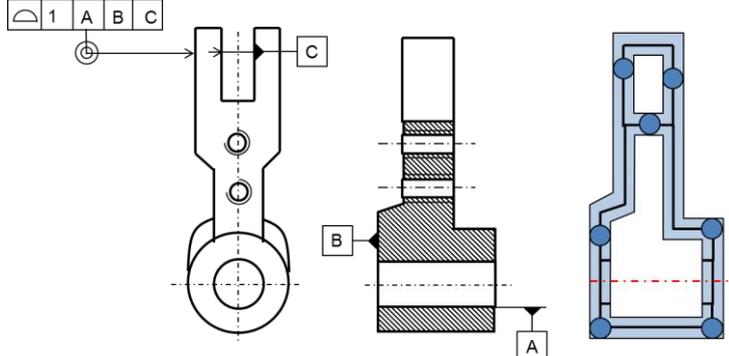


Figure 58 - Tolérancement général d'une pièce

NOTE 4 : Avec le tolérancement général, la pièce est complètement définie avec une tolérance assez large. Les surfaces qui imposent des tolérances plus sévères doivent être spécifiées en complément du tolérancement

général. Les congés, les chanfreins, les profondeurs des trous borgnes, les longueurs filetées peuvent également être spécifiée séparément.

6.2 Congé et chanfrein

6.2.1 Congé cylindrique ou torique

Définition : un congé est la surface de raccordement générée par une sphère bitangente aux deux surfaces adjacentes.

La spécification d'un congé est une exigence locale dans chacune des sections perpendiculaires à la direction du congé. La zone de tolérance est définie par l'espace compris entre le congé de rayon maxi et le congé de rayon mini tangents aux surfaces adjacentes.

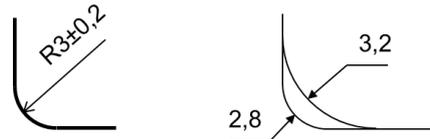


Figure 59 – Spécification et zone de tolérance pour un congé

NOTE : la surface de raccordement peut ne pas être représentée dans le 3D.

6.2.2 Chanfrein

Définition : un chanfrein est une surface de raccordement générée par un segment de droite de longueur constante, entre deux surfaces adjacentes.

Sans indication angulaire, le segment est perpendiculaire à la bissectrice aux droites tangentes aux surfaces adjacentes (Figure 60b)

Avec une indication angulaire, l'angle du chanfrein est donné par rapport à la tangente à l'une des faces adjacentes. Cette direction est donnée par la direction de la cote du chanfrein (Figure 60a et Figure 60c) qui doit être parallèle à la face considérée ou en plaçant la flèche perpendiculairement au chanfrein, sur l'arête commune avec la surface adjacente prise comme référence.

La zone de tolérance est définie par l'espace compris entre le chanfrein maxi et le chanfrein mini déterminés par rapport aux segments nominaux tangents aux surfaces adjacentes.

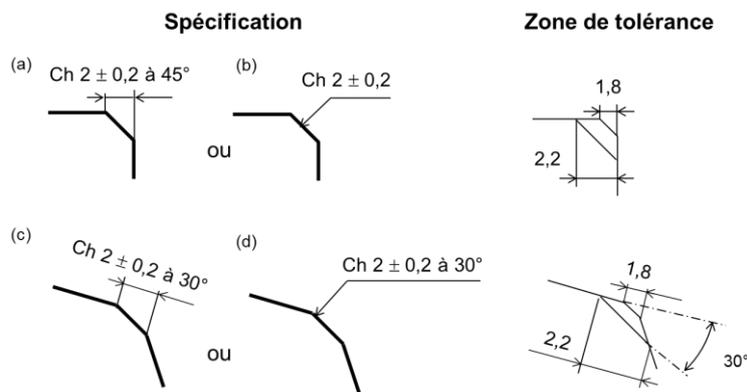


Figure 60 – Spécification et zone de tolérance pour un chanfrein

6.3 Cotes entre faces localement parallèles

Définition : La cote est vérifiée si toutes les dimensions locales sont dans l'intervalle de tolérance.

$$\text{Cote mini} \leq \text{distances locales} \leq \text{Cote maxi}$$

La Figure 61a illustre l'emploi classique pour toutes les pièces fines et déformables, comme les rondelles, les joints plats...

La Figure 61b correspond au diamètre d'un fil, d'une barre ou d'un tube fin.

Les Figure 61c et d illustrent la spécification de l'épaisseur d'une tôle dans une pièce emboutie ou d'une tube.

Dans la Figure 61e, seule la condition mini peut être imposée, car la distance augmente dès que l'on s'écarte du minimum. La valeur maxi sera incontrôlable.

NOTE : Pour un simple assemblage avec ajustement, il est préférable d'utiliser un modificateur \textcircled{M} ou \textcircled{L} .

New

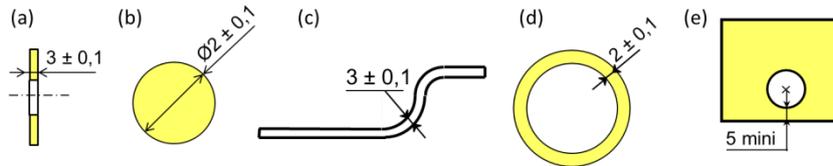


Figure 61 - Cote au sens des dimensions locales

La dimension locale entre deux points P1 et P2 n'existe que si les deux normales $\vec{n1}$ et $\vec{n2}$ en P1 et P2 sont opposées et P2 proche de la droite de direction $\vec{n1}$ passant par P1. La dimension locale est :

$$d = |\overrightarrow{P2P1} \cdot \vec{n1}|$$

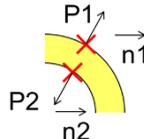


Figure 62 – Estimation d'une dimension locale

6.4 Longueur filetée

Dans la Figure 63, la cote spécifiée la longueur du taraudage ou du filetage. Le filetage est par ailleurs spécifié avec un ajustement sur le flanc de filet et sur le sommet de filet.

Définition : Le plan de fond de filet est le plan limite perpendiculaire à l'axe du filetage tel que le flanc de filet respecte le profil du filetage au maximum de matière.

- Le plan limite du taraudage peut être identifié avec un tampon fileté correspondant au taraudage au maximum de matière.
- Le plan limite du filetage peut être identifié avec une bague filetée correspondant au filetage au maximum de matière.

New

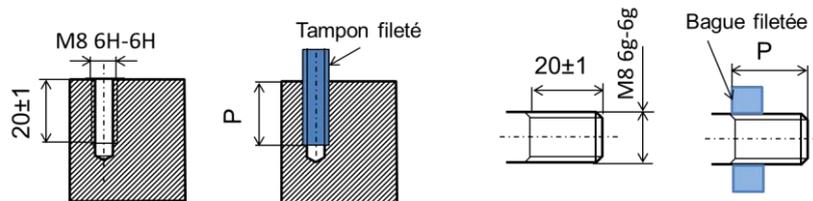


Figure 63 – Etendue d'un filetage

6.5 Profondeur d'un trou borgne

La Figure 64a représente un trou borgne. La cote représente la distance entre l'arête formée par l'intersection du cylindre et du cône et le plan supérieur. Cette cotation très courante n'est pas tout à fait correcte en raison du chanfrein supérieur. Les distances locales ne peuvent pas être mesurées selon les génératrices du cylindre. En pratique, cette approximation ne pose pas de difficultés majeures.

Il serait théoriquement préférable d'adopter la cotation de la Figure 64b avec une référence sur le plan supérieur (éventuellement définie en zone partielle) et l'arête inférieure.

Dans la Figure 64c, la cote spécifie le fond du trou borgne. Par convention, le fond du trou borgne est la pointe du cône parfait d'angle nominal passant par les points du cône réel au voisinage du fond en excluant la partie générée par l'âme du foret. Le contrôle peut être réalisé en mesurant la position d'une bille de rayon R placée au fond du trou. L'extrémité du cône se trouve à la profondeur $P = m + R(1 + 1/(\sin \alpha/2))$

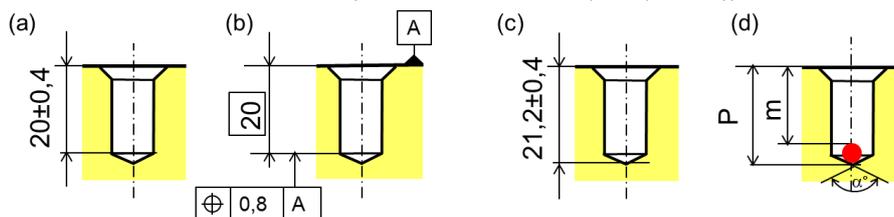


Figure 64 - Profondeur d'une trou borgne

ANNEXE A : Applications bases de la cotation

SOMMAIRE

1.	Systèmes de références	2
1.1	Référence primaire.....	2
1.2	Système de références	6
1.3	Références partielles	10
1.4	Ordre des références	10
2.	Exemples	11
2.1	Principe de lecture	11
2.2	Spécifications de position.....	11
2.3	Spécifications d'orientation	13
2.4	Spécifications de forme.....	15
2.5	Spécification d'une composition d'éléments tolérancés	16
3.	Spécifications en zones projetées	18
3.1	Projection d'un cylindre	18
3.2	Projection de plusieurs cylindres.....	18
3.3	Projection de deux plans parallèles.....	19
4.	Applications	19
4.1	Analyse des références.....	19
4.2	Références sur zones partielles	24
4.3	Cotation d'un brut.....	26
4.4	Cotation d'une gorge de circlips	27
5.	Mauvais usage du modificateur de décalage ▷.....	28
5.1	Rainure décalée par rapport à un cylindre	28
5.2	Plan décalé par rapport à un cylindre.....	28
6.	Démarche cotation / contrôle avec maxi et mini matière.....	29
6.1	Spécification au \textcircled{M} avec référence secondaire au \textcircled{L}	29
6.2	Spécification au \textcircled{L} avec référence secondaire au \textcircled{L}	31
6.3	Application avec référence sur un groupe de trous	33
6.4	Application avec référence sur une composition de cylindres.....	37
6.5	Orientation par rapport à une surface au \textcircled{M} et \textcircled{L}	38
6.6	Système de références avec une référence primaire avec \textcircled{M} ou \textcircled{L}	40

1. Systèmes de références

1.1 Référence primaire

1.1.1 Principe

Pour chaque spécification, le modèle nominal de la pièce est associé à la référence primaire selon un critère. Les mobilités résiduelles du système de références permettent de déplacer le modèle nominal pour placer, si possible, la surface réelle tolérancée dans la zone de tolérance.

Notations des tableaux

1 : Elément de référence = surface réelle

2 : Référence = surface(s) du modèle nominal ou élément médian

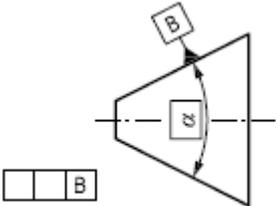
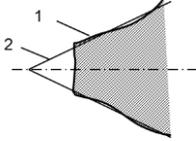
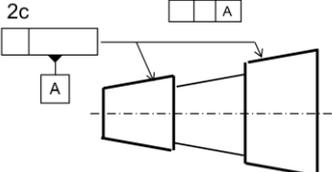
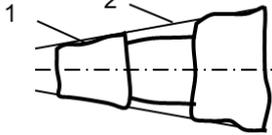
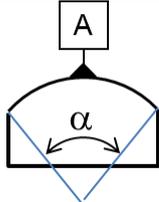
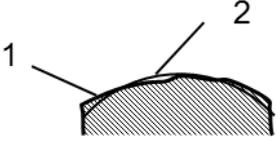
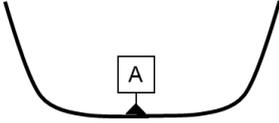
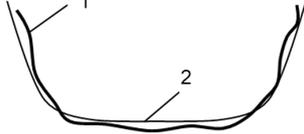
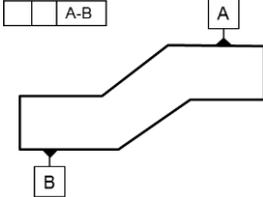
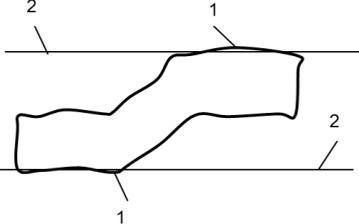
3 : Surface associée si offset ou décalage par rapport à la surface nominale

1.1.2 Référence sans modificateur avec contact

Lorsque les surfaces en contact sont tendues (normales comprises dans un cône d'angle 30°), la surface associée est la surface nominale tangente extérieur matière qui minimise la distance maxi (minimax).

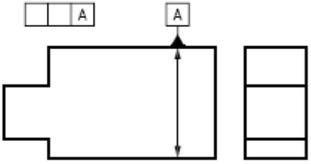
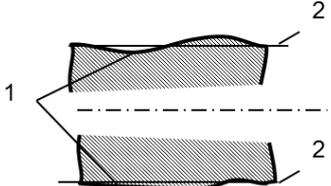
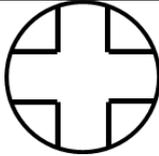
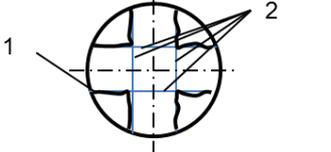
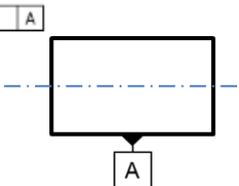
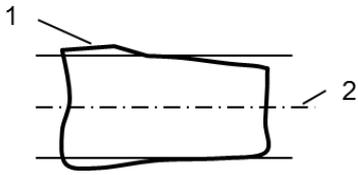
Si l'angle du cône contenant les normales est supérieur à 30° , il y a des contraintes entre les surfaces. La surface associée est la surface nominale des moindres carrés (sans offset).

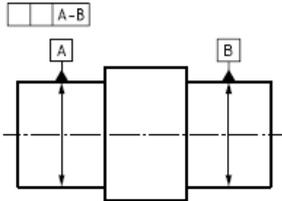
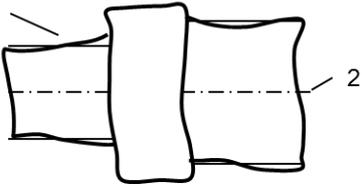
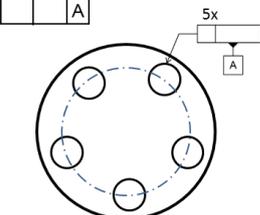
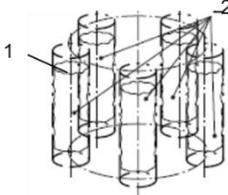
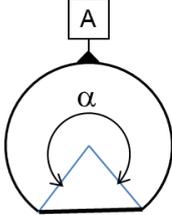
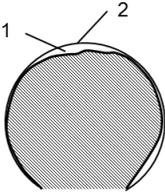
Système de références Critère d'association	Désignation des surfaces	Surface associées
Plan : Plan nominal associé par minimax		 2 : Plan minimax
Plans coplanaires Plan nominal associé par minimax		 2 : Plan minimax aux deux surfaces réelles
Secteur cylindrique tendu $\alpha \leq 30^\circ$: Cylindre nominal associé par minimax		
Cône $\alpha \geq 150^\circ$ Cône nominal associé par minimax		
Surface complexe tendue Surface nominale associée par minimax		
Plans face à face (non parallèle) Plans nominaux associés par moindres carrés (angle nominal)		

<p>Cône $\alpha < 150^\circ$</p> <p>Cône nominal associé par moindres carrés</p>		
<p>Cônes coaxiaux nominalement identiques</p> <p>Cône nominal associé par moindres carrés</p>		
<p>Secteur cylindrique fermé $30^\circ < \alpha < 180^\circ$</p> <p>Cylindre nominal associé par moindres carrés</p>		
<p>Surface complexe non tendue</p> <p>Surface nominale associée moindres carrés</p>		
<p>Plans parallèles non face à face</p> <p>Surface nominale associée moindres carrés</p>		

1.1.3 Référence sans modificateur avec serrage

Assemblage de deux pièces rigides par une liaison avec serrage ou auto-centrante.

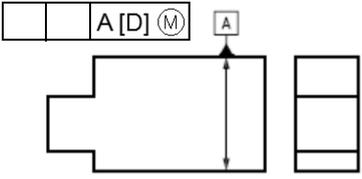
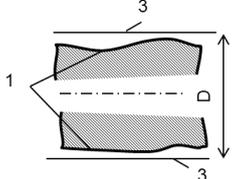
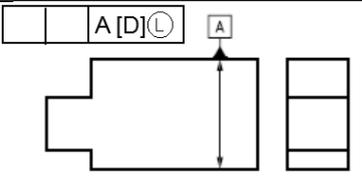
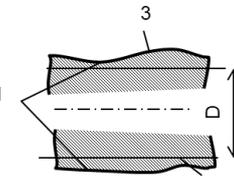
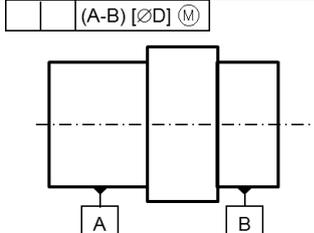
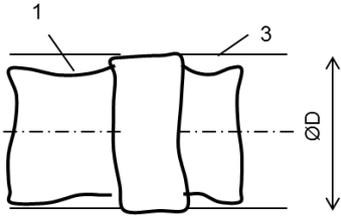
Système de références Critère d'association	Désignation des surfaces	Surface associées
<p>Plans parallèles face à face</p> <p>Plans nominaux associés par moindres carrés et offsets identiques de chaque côté</p>		
<p>Ensemble de paires de plans parallèles face à face</p> <p>Plans nominaux associés par moindres et offsets identiques de chaque côté (2)</p>		
<p>Cylindre complet</p> <p>Cylindre nominal associé par moindres carrés avec offset</p>		

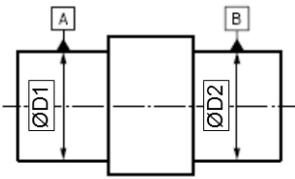
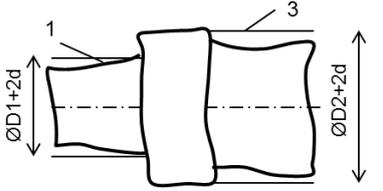
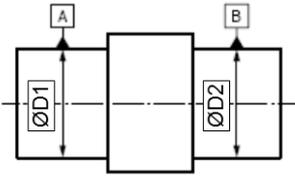
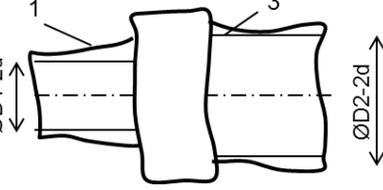
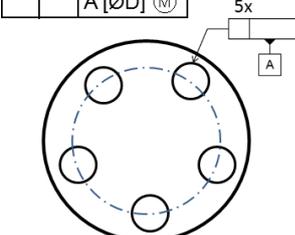
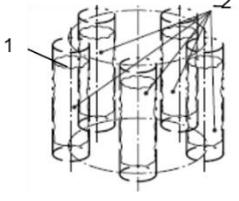
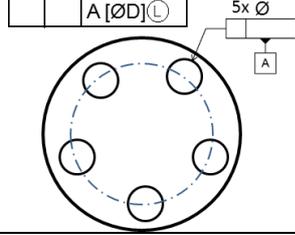
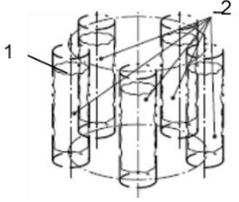
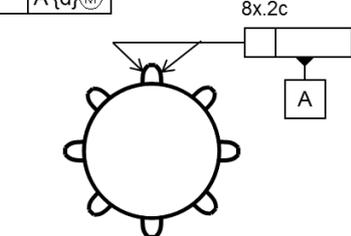
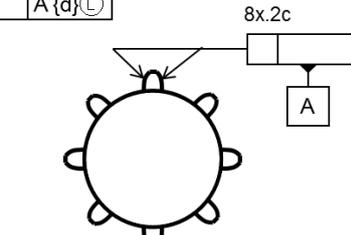
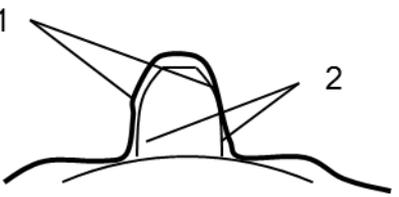
<p>Cylindres coaxiaux</p> <p>Cylindre nominal associé par moindres carrés avec offsets (1)</p>		
<p>Cylindres parallèles</p> <p>Cylindres nominaux associés par moindres carrés avec offsets (1)</p>		
<p>Secteur cylindrique fermé</p> <p>$\alpha \geq 180^\circ$:</p> <p>Cylindre nominal associé par moindres carrés avec offset</p>		

- (1) Dans les entités composées de plusieurs cylindres, l'offset doit être identique sur tous les cylindres identiques ayant le même diamètre nominal.
- (2) Dans les entités composées de plusieurs paires de plans parallèles face à face, l'offset doit être identique sur tous les plans appartenant à des entités identiques ayant la même distance nominale.

NOTE : L'égalité des offsets traduit l'équilibre statique de la liaison en supposant une pièce voisine avec des dimensions identiques sur chaque entité.

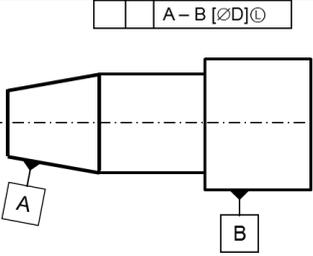
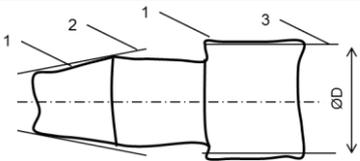
1.1.4 Référence avec modificateur (M), (L)

Système de références Zone de tolérance	Désignation des surfaces	Association
<p>Plans parallèles face à face</p> <p>Deux plans nominaux tels que les plans offsets distants de D soient hors matière.</p>		
<p>Plans parallèles face à face</p> <p>Deux plans nominaux tels que les plans offsets distants de D soient dans la matière.</p>		
<p>Cylindres coaxiaux de même diamètre</p> <p>Deux cylindres nominaux tels que les cylindres diamètre D soient hors matière</p>		

<p>Cylindres coaxiaux</p> <p>Deux cylindres nominaux tels que les cylindres offsets avec un décalage d soient hors matière</p>	<p>$(A-B) \{d\} \textcircled{M}$</p> 	
<p>Cylindres coaxiaux</p> <p>Deux cylindres nominaux tels que les cylindres offsets avec un décalage d intérieur matière soient dans la matière</p>	<p>$(A-B) \{d\} \textcircled{L}$</p> 	
<p>Cylindres parallèles</p> <p>Cinq cylindres nominaux tels que les cylindres diamètre D soient hors matière</p>	<p>$A [\textcircled{D}] \textcircled{M}$</p> <p>5x</p> 	
<p>Cylindres parallèles</p> <p>Cinq cylindres nominaux tels que les cylindres diamètre D soient dans la matière</p>	<p>$A [\textcircled{D}] \textcircled{L}$</p> <p>5x Ø</p> 	
<p>Surface complexe</p> <p>La surface nominal telle que la surface offset avec un décalage de d extérieur matière soit hors matière</p>	<p>$A \{d\} \textcircled{M}$</p> <p>8x.2c</p> 	
<p>Surface complexe</p> <p>La surface nominal telle que la surface offset avec un décalage de d intérieur matière soit dans la matière</p>	<p>$A \{d\} \textcircled{L}$</p> <p>8x.2c</p> 	

1.1.5 Référence hybride avec et sans modificateur \textcircled{M} , \textcircled{L}

Système de références Zone de tolérance	Désignation des surfaces	Association
--	--------------------------	-------------

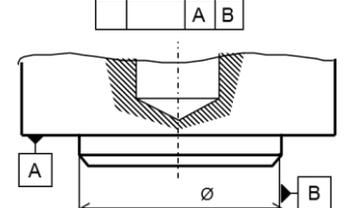
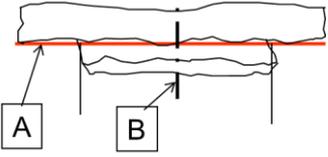
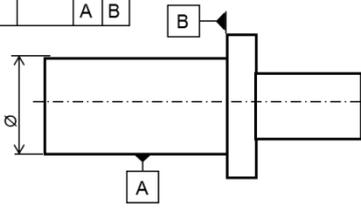
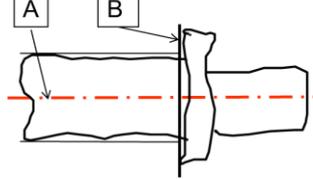
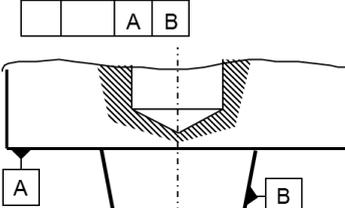
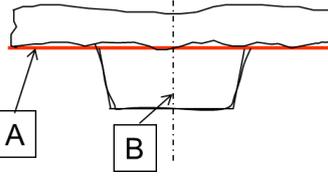
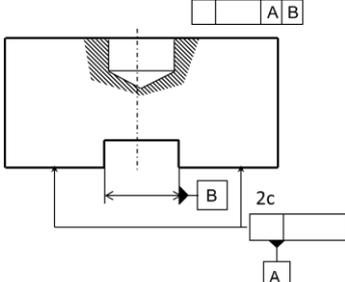
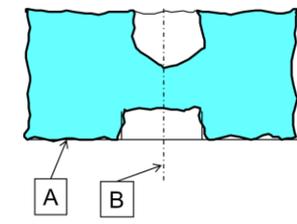
<p>Cône et cylindre au minimum de matière</p> <p>Le modèle nominal est centré sur le cône nominal. Le cylindre $\varnothing D$ est coaxial. La spécification est vérifiée avec le cône tangent au cône réel et le cylindre $\varnothing D$ dans la matière (1).</p>		
---	---	---

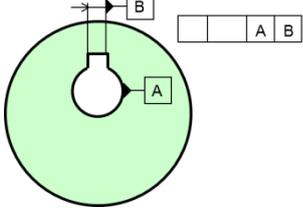
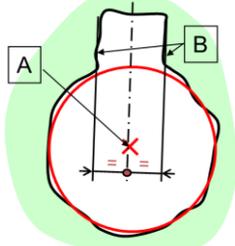
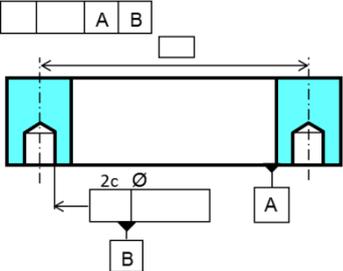
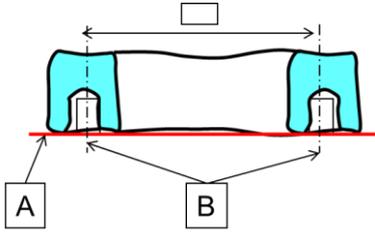
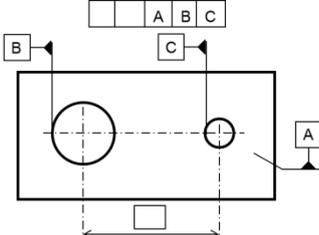
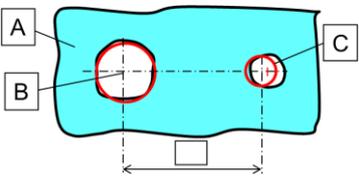
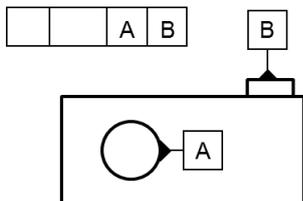
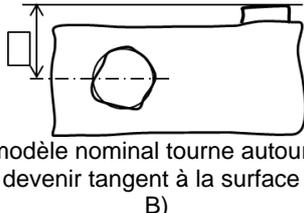
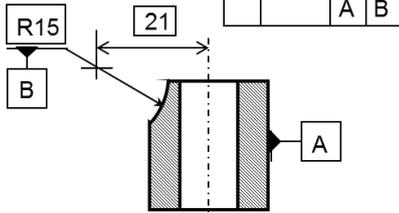
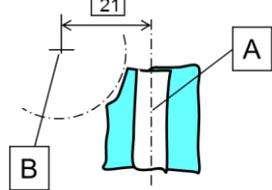
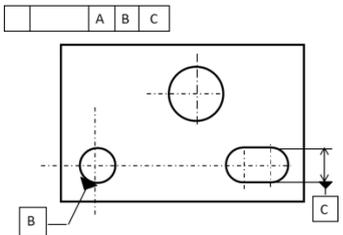
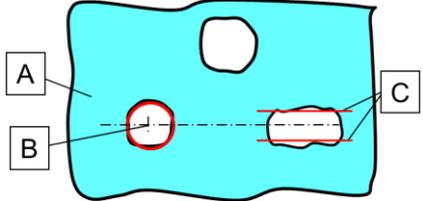
(1) Le critère n'est pas minimax, car les mobilités doivent rester disponible pour le flottement permis par le minimum de matière. La spécification doit être respectée quelle que soit la position du nominal permis par ce flottement.

1.2 Système de références

1.2.1 Système de références sans modificateur

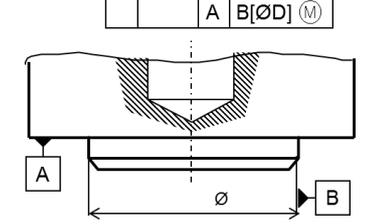
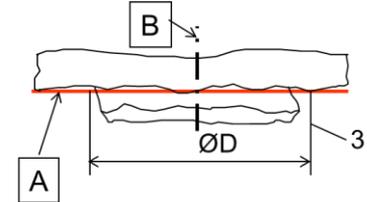
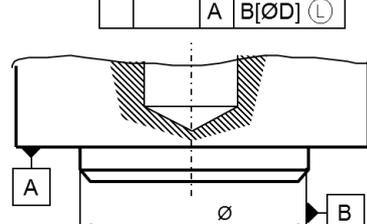
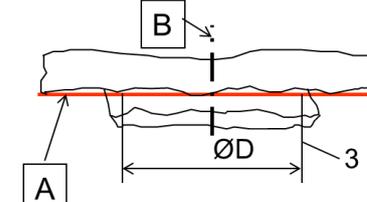
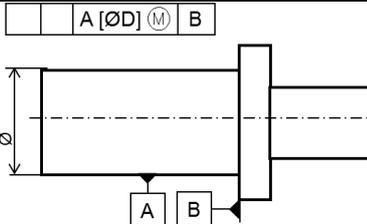
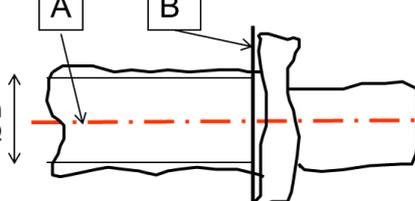
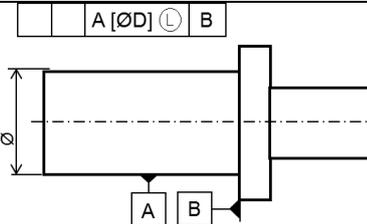
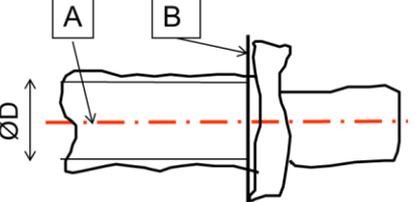
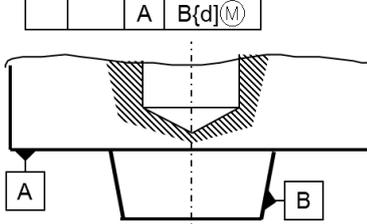
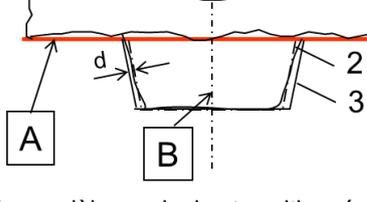
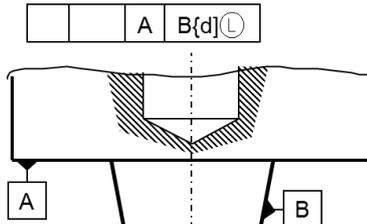
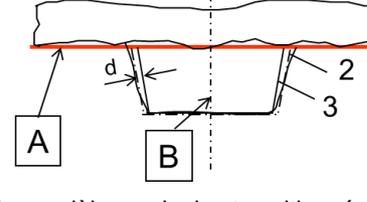
Le modèle nominal de la pièce est associé par un critère à partir des références dans l'ordre primaire, secondaire, tertiaire.
Les références sont les surfaces nominales (en position relative exacte).

Système de références	Désignation des surfaces	Association
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Critère moindres carrés avec offset</p>		
<p>A : Cylindre primaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>B : Plan secondaire Critère minimax</p>		 <p>En pratique, la référence B est tangente</p>
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cône secondaire Critère moindres carrés avec offset (angle nominal)</p>		
<p>A : Plan primaire Critère minimax (aux deux faces inférieures)</p> <p>B : Paire de plans face à face Critère des moindres carrés, avec offset.</p>		

<p>A : Cylindre primaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>B : Paire de plans face à face Critère des moindres carrés, avec offset.</p>		
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : 2 cylindres secondaires identiques Critère moindres carrés, avec offset commun aux deux cylindres (1)</p>		
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>C : Cylindre tertiaire Critère moindres carrés avec offset</p>		
<p>A : Cylindre primaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>B : Plan secondaire Critère minimax</p>		 <p>(Le modèle nominal tourne autour de A pour devenir tangent à la surface réelle B)</p>
<p>A : Cylindre primaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>B : Cylindre secondaire Critère minimax (rayon nominal)</p>		 <p>Le cylindre B de rayon 15 est perpendiculaire à A, distant de 21 minimum à la surface réelle</p>
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>C : 2 plans nominaux Critère moindres carrés avec offset identique de chaque côté</p>		

(1) Dans les entités composées de plusieurs cylindres, l'offset doit être identique sur tous les cylindres identiques ayant le même diamètre nominal.

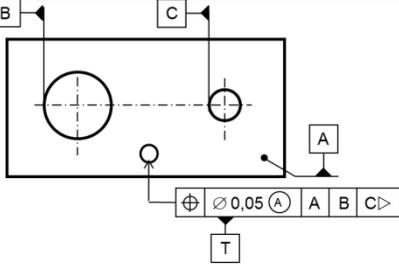
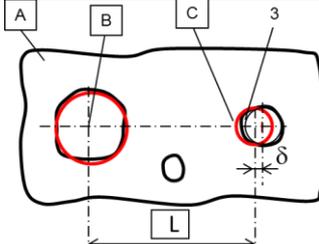
1.2.2 Système de références avec modificateur (M)(L)

Système de références Critère	Désignation des surfaces	Association
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Le cylindre $\varnothing D$ centré sur B est hors matière</p>		 <p>Le cylindre $\varnothing D$ 3 est une surface offset du cylindre nominal secondaire</p>
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Le cylindre $\varnothing D$ centré sur B est dans la matière</p>		 <p>Le cylindre $\varnothing D$ 3 est une surface offset du cylindre nominal secondaire</p>
<p>A : Cylindre primaire Le cylindre $\varnothing D$ centré sur A est hors matière</p> <p>B : Plan secondaire tangent (uniquement par translation dans la direction de A)</p>		 <p>Le plan B ne doit pas minimiser la distance maxi.</p>
<p>A : Cylindre primaire Le cylindre $\varnothing D$ est dans la matière</p> <p>B : Plan secondaire tangent (uniquement par translation dans la direction de A)</p>		 <p>Le plan B ne doit pas minimiser la distance maxi.</p>
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cône secondaire La surface offset du cône nominal avec un décalage d extérieur matière est hors matière</p>		 <p>Le modèle nominal est positionné par rapport à A</p>
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cône secondaire La surface offset du cône nominal avec un décalage d intérieur matière est dans la matière</p>		 <p>Le modèle nominal est positionné par rapport à A</p>

<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Les deux cylindres $\varnothing D$ centrés sur B sont hors matière</p>		
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Les deux cylindres $\varnothing D$ centrés sur B sont dans la matière</p>		
<p>A : Cylindre primaire Le cylindre $\varnothing D1$ centré sur A est hors matière.</p> <p>B : Les deux plans distants de D2 centrés sur B sont hors matière.</p>		<p>Le cylindre $\varnothing D1$ et les deux plans distants de D2 sont des surfaces offsets du même modèle nominal.</p>
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Le cylindre $\varnothing D1$ centré sur B est dans la matière</p> <p>C : Cylindre tertiaire Le cylindre $\varnothing D2$ centré sur C est dans la matière</p>		

1.2.3 Système de références avec décalage

Système de références Critère	Désignation des surfaces	Association
<p>A : Cylindre primaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>B : Plan secondaire Plan nominal minimax avec décalage</p>		<p>La surface associée 3 est décalée de δ par rapport à la référence B</p>

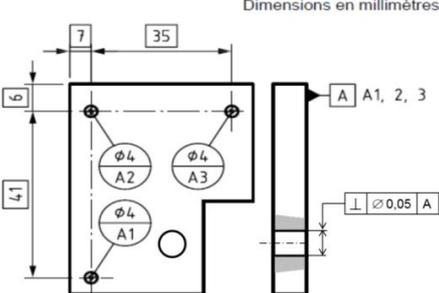
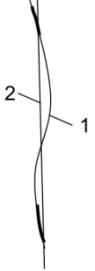
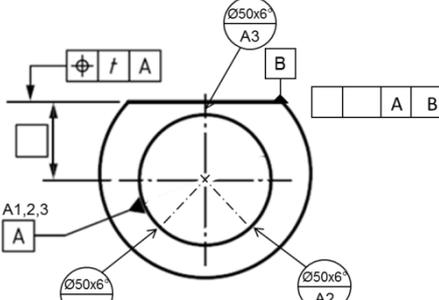
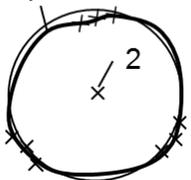
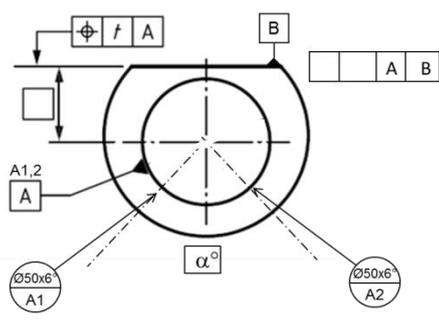
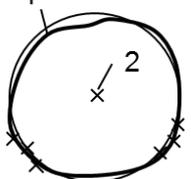
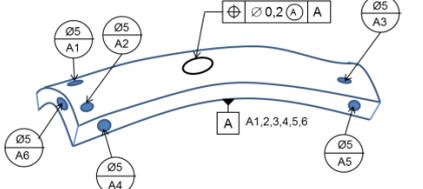
<p>A : Plan primaire Critère minimax</p> <p>B : Cylindre secondaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>C : Cylindre tertiaire Cylindre nominal moindres carrés avec offset et décalage dans la direction B-C</p>		 <p>Le cylindre associé 3 est décalé de δ par rapport à la référence C</p>
--	---	---

1.3 Références partielles

Notations des tableaux

1 : Élément de référence = surface réelle

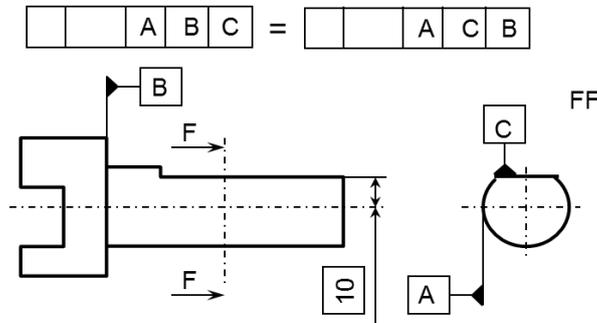
2 : Référence = surface(s) du modèle nominal ou élément médian

Système de références Critère	Désignation des surfaces	Association
<p>A : Plan minimax Aux 3 zones partielles A1, 2, 3.</p>	<p>Dimensions en millimètres</p> 	 <p>La référence A est minimax aux zones partielles uniquement</p>
<p>A : Cylindre primaire Critère moindres carrés avec offset</p> <p>(les points sont prélevés de manière uniforme dans les 3 zones A1, 2, 3 qui sont identifiées sur la surface à l'aide de la référence B)</p>		 <p>La référence A est le cylindre nominal, associé par les moindres carrés avec offset aux points des 3 zones partielles.</p>
<p>A : Cylindre primaire de rayon nominal Si $\alpha + 6^\circ \leq 30^\circ$: critère minimax Si $\alpha + 6^\circ > 30^\circ$: Critère moindres carrés</p> <p>(les points sont prélevés de manière uniforme dans les 2 zones A1, 2 qui sont identifiées à l'aide de la référence B)</p>		 <p>La référence A est le cylindre nominal, associé par minimax ou les moindres carrés aux points des 2 zones partielles.</p>
<p>A : Surface nominale des moindres carrés</p> <p>(les points sont prélevés de manière uniforme dans les 6 zones A1 à A6)</p>		 <p>La surface associée est la surface nominale, moindres carrés aux points des zones partielles.</p>

1.4 Ordre des références

Dans un système de références, la surface prioritaire est celle qui bloque le plus de degrés de liberté en rotation.
Exception : une liaison sphérique est toujours placée en premier.
L'ordre des références est donc imposé par le concepteur. Il ne faut pas permuter l'ordre des références.

Dans quelques rares cas, l'ordre des références peut être inversé si les constructions sont indépendantes.
La pièce Figure 1 comporte un plan secondaire B perpendiculaire à A et un plan tertiaire C parallèle à A. Il n'y a pas de contrainte de construction entre C et B.
Les deux systèmes de références A | B | C et A | C | B sont donc strictement équivalents. On peut donc trouver sur ce dessin des systèmes de références A | B et des systèmes A | C.



2. Exemples

2.1 Principe de lecture

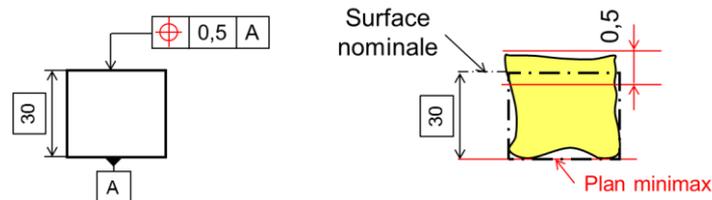
La lecture peut être facilitée en détaillant les rubriques suivantes :

- Symbole
- Élément toléré
- Référence
- Élément nominal
- Zone de tolérance
- La spécification est vérifiée si...

2.2 Spécifications de position

2.2.1 Localisation d'un plan

- Symbole : Localisation
- Élément toléré : surface réelle plane supérieure (tous les points de la surface)
- Référence : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Élément nominal : plan situé à 30 mm de A
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,5. La zone est centrée sur l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément toléré est contenu dans la zone de tolérance.



2.2.2 Localisation de l'axe réel d'un cylindre

- Symbole : Localisation
- Élément toléré : axe réel de l'alésage (lieu des centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle B
- Élément nominal : axe situé à 13 mm de A et 15 mm de B
- Zone de tolérance : zone cylindrique de diamètre 0,5. La zone est centrée sur l'élément nominal.

- La spécification est vérifiée si l'élément toléré est contenu dans la zone de tolérance.

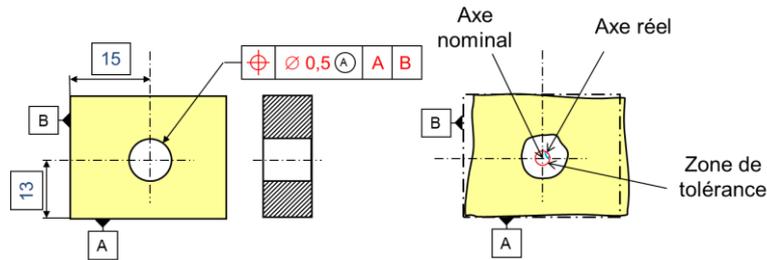


Figure 3 - Localisation d'un axe

2.2.3 Symétrie d'un tenon

La symétrie est équivalente à une localisation, avec une cote encadrée « 0 » qui devient implicite.

- Symbole : Symétrie
- Élément toléré : surface médiane du tenon supérieur (lieu des milieux des bipoints)
- Référence primaire A : 2 plans nominaux associés par les moindres carrés avec offsets identiques de chaque côté.
- Élément nominal : plan médian du tenon
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,5. La zone est centrée sur l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément toléré est contenu dans la zone de tolérance.

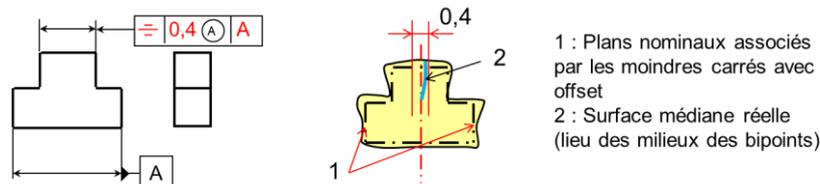


Figure 4 - Symétrie d'un tenon

2.2.4 Coaxialité de l'axe

La coaxialité positionne une surface de révolution par rapport à un système de références de révolution et coaxial.

La Figure 5 porte sur la coaxialité de l'axe associé, par exemple pour une liaison avec serrage.

- Élément toléré : axe associé au cylindre réel par les moindres carrés limité aux deux points extrêmes
- Référence primaire A : axe du plus petit cylindre contenant l'élément de références A
- Surface nominale = axe de A
- Zone de tolérance : zone cylindrique de diamètre 0,4. La zone est centrée sur la surface nominale.
- La spécification est vérifiée si l'élément toléré est contenu dans la zone de tolérance.

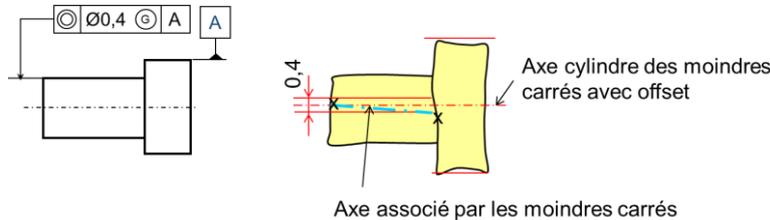


Figure 5 - Coaxialité de l'axe associé

La Figure 6 porte sur la coaxialité de l'axe réel, par exemple pour une liaison avec un élément serré, mais mobile le long de cet axe.

- Symbole : Coaxialité
- Élément toléré : axe réel du cylindre (lieu des centres des sections)
- Référence primaire A : Cylindre nominal associé par les moindres carrés avec offset
- Élément nominal : axe de A
- Zone de tolérance : zone cylindrique de diamètre 0,4. La zone est centrée sur l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément toléré est contenu dans la zone de tolérance.

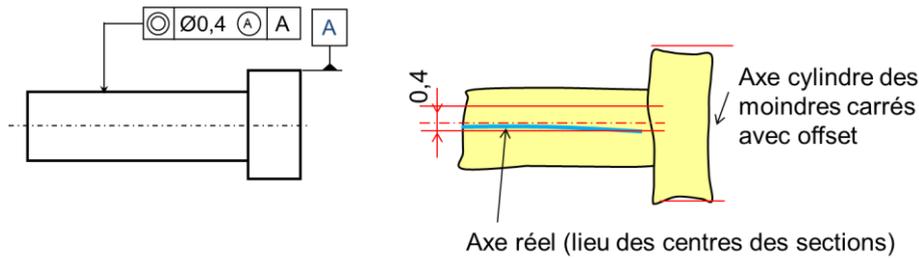


Figure 6 - Coaxialité de l'axe réel

2.2.5 Localisation sur un groupe de trous.

Le compteur nx indique les trous forment un groupe de n trous avec n zones de tolérances. (Lorsque les n trous sont répartis sur un cercles, implicitement, l'angle entre les trous est $360^\circ/n$).

- Symbole : Localisation
- Élément tolérancé : 3 axes réels des 3 alésages (lieu des centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D
- Référence secondaire : Cylindre nominal associé par les moindres carrés avec offset
- Élément nominal : 3 axes situés à 20 mm de D tous les 360°
- Zone de tolérance : 3 zones cylindriques de diamètre 0,3. Chaque zone est centrée sur son axe nominal.
- La spécification est vérifiée si les éléments tolérancés sont contenus dans les 3 zones de tolérance (Le modèle nominal peut être orienté autour de E pour que les 3 axes tolérancés appartiennent simultanément aux 3 zones de tolérance).

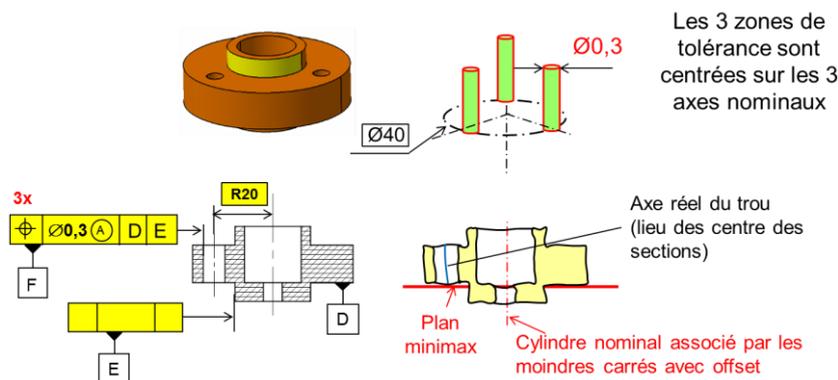


Figure 7 - Localisation d'un groupe de trous

2.3 Spécifications d'orientation

2.3.1 Parallélisme par rapport à la surface secondaire

- Symbole : Parallélisme
- Élément tolérancé : Surface réelle plane verticale (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle B
- Élément nominal : plan situé à 15 mm de B
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,2. La zone est parallèle à l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

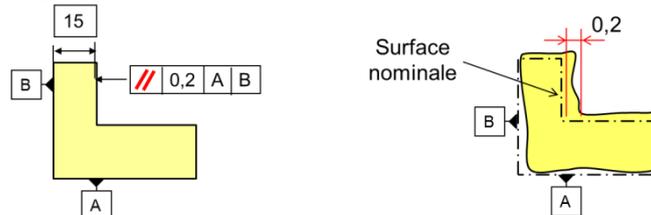


Figure 8- Parallélisme par rapport à la référence secondaire

2.3.2 Inclinaison d'un plan

- Symbole : Inclinaison
- Élément tolérancé : Surface réelle plane inclinée (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle B
- Élément nominal : plan incliné de 30° passant par une droite à 35 mm de B et à 40 mm de A
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,1. La zone est parallèle à l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

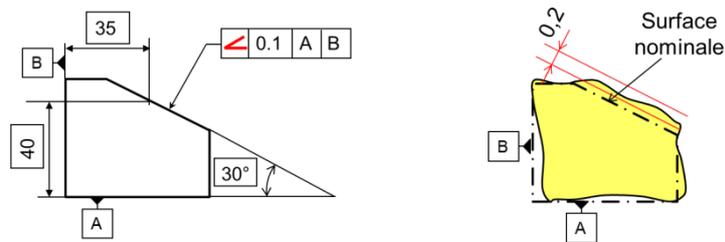


Figure 9 - Inclinaison par rapport à un système de références

2.3.3 Parallélisme d'un plan

- Symbole : Parallélisme
- Élément tolérancé : Surface réelle plane supérieure (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Élément nominal : plan situé à 30 mm de A
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,2. La zone est parallèle à l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

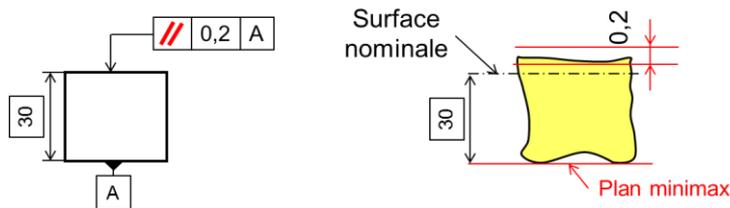


Figure 10 - Parallélisme d'un plan

2.3.4 Perpendicularité d'un plan

- Symbole : Perpendicularité
- Élément tolérancé : Surface réelle plane verticale (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Élément nominal : plan perpendiculaire à A
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,2. La zone est parallèle à l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. (Les mobilités résiduelles du plan de référence permettent de déplacer le modèle nominal pour placer si possible la surface tolérancée dans la zone de tolérance - le modèle peut glisser sur le plan A).

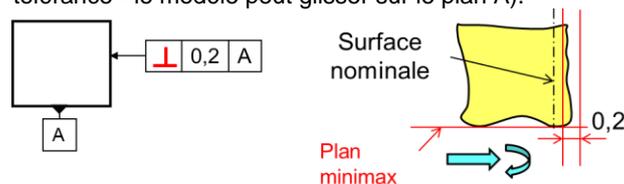


Figure 11 - Perpendicularité d'un plan

2.3.5 Perpendicularité d'un cylindre

- Symbole : Perpendicularité

- Élément tolérancé : axe réel de l'alésage (lieu des centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Élément nominal : droite perpendiculaire à A
- Zone de tolérance : zone cylindrique de diamètre 0,2. La zone est parallèle à l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. (Les mobilités résiduelles du plan de référence permettent de déplacer le modèle nominal pour placer si possible la surface tolérancée dans la zone de tolérance - le modèle peut glisser sur le plan A).

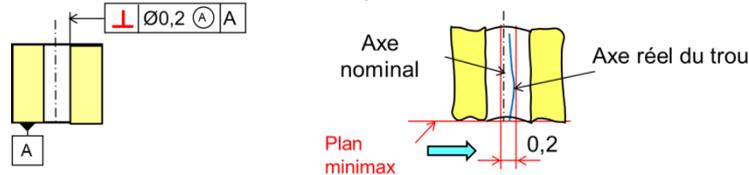


Figure 12 - Perpendicularité d'un axe

2.3.6 Inclinaison d'un cylindre

- Symbole : Inclinaison
- Élément tolérancé : Axe réel du cylindre (lieu des centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle B
- Référence tertiaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle C
- Élément nominal : droite inclinée de 30° à 20 mm de C passant par une droite à 35 mm de B et à 40 mm de A
- Zone de tolérance : zone cylindrique $\varnothing 0,1$. La zone est parallèle à la droite nominale.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

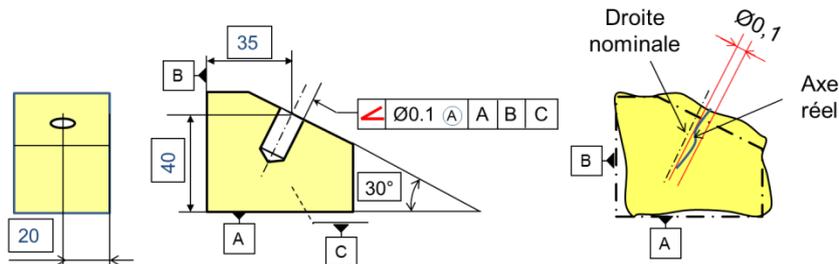


Figure 13 - Inclinaison d'un cylindre

2.4 Spécifications de forme

Les spécifications de forme ont pour objectif de garantir la qualité du contact entre les pièces. La zone de tolérance est libre par rapport à l'élément nominal.

2.4.1 Planéité d'un plan

- Symbole : Planéité
- Élément tolérancé : Surface réelle plane supérieure (tous les points de la surface)
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,1.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

Garantir le contact entre 2 plans.

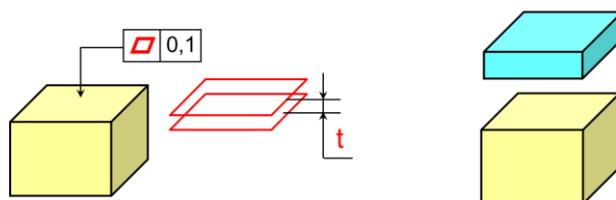


Figure 14 - Planéité

2.4.2 Cylindricité d'un cylindre

- Symbole : Cylindricité
- Élément tolérancé : Surface réelle cylindrique
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 cylindres coaxiaux dont la différence de rayon est 0,1
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

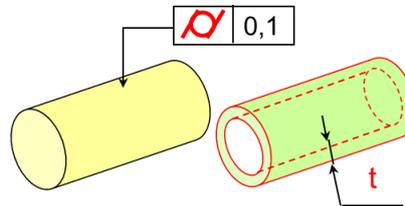


Figure 15 - Cylindricité

2.4.3 Rectitude de l'axe réel d'un cylindre

- Symbole : Rectitude
- Élément tolérancé : axe réel du cylindre (lieu des centres des sections)
- Zone de tolérance : cylindre de diamètre 0,02.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

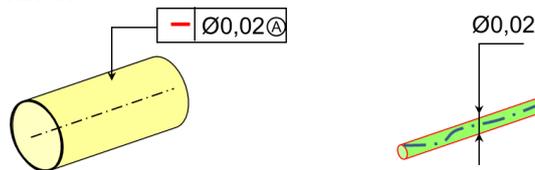


Figure 16 - Rectitude de l'axe

2.5 Spécification d'une composition d'éléments tolérancés

2.5.1 Spécification d'entité de plans parallèles

La pièce Figure 17 comporte une poche avec deux entités formées par deux plans parallèles face à face. La spécification est une orientation.

Dans la Figure 17a, ces entités forment une seule surface composée des 4 plans. L'élément tolérancé est la surface médiane de la surface composée. Il n'y a qu'une seule zone de tolérance parallèle à A devant contenir la surface médiane.

Dans la Figure 17b, ces entités forment un groupe de deux entités. Les deux éléments tolérancés sont les deux surfaces médianes des paires de plans. Il y a deux zones de tolérance indépendantes devant contenir chacune la surface médiane réelle de l'entité. Chaque zone est par parallèle à A.

NOTE 1 : en position, les deux spécifications seraient équivalentes car les zones de tolérances sont toujours centrées sur la même surface nominale.

NOTE 2 : dans les deux cas, la surface B désigne l'ensemble des surfaces spécifiées, c'est-à-dire les 4 plans. La construction d'une référence avec B sera donc identique.

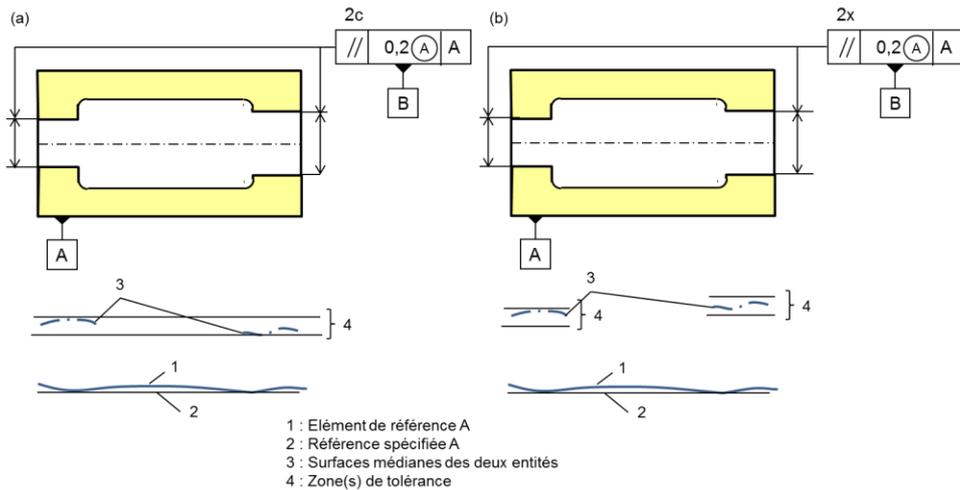


Figure 17 - Orientation d'entités plans parallèles face à face

La Figure 18a comporte une poche avec deux entités formées par deux plans parallèles face à face. Dans la Figure 18a, la surface spécifiée est composée des 2 paires de plans, soit des 4 plans. La spécification impose une seule zone de tolérance de largeur 20,1 (L).

La Figure 18b est équivalente. La zone de tolérance est définie par une surface offset des surfaces spécifiées nominale avec un décalage de 0,05 ($20 + 2 \cdot 0,05 = 20,1$).

Dans la Figure 18c, la surface spécifiée est composée des 4 plans. considère séparément les 4 surfaces. La surface spécifiée est une surface composée des 4 surfaces. La zone de tolérance est définie par une surface offset des surfaces spécifiées nominale avec un décalage de 0,05.

Dans les 3 cas, la signification est identique et la référence B désigne l'ensemble des 4 surfaces.

NOTE : les deux exemples (a) et (c) montre que le compteur n dans l'indication nc est le nombre d'éléments tolérancés. Si l'élément tolérancé est déjà défini sur une entité constituée de 2 surfaces, le nombre n désigne le nombre d'entités.

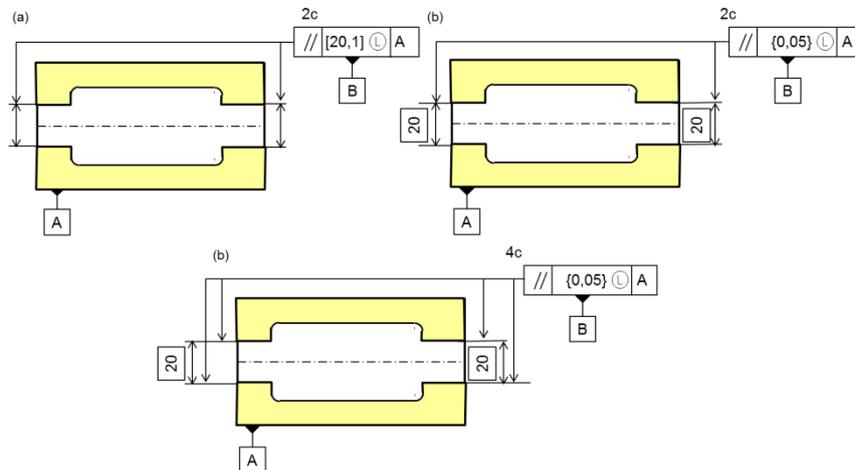


Figure 18 - Orientation d'une entité plans parallèles face à face au minimum de matière

2.5.2 Spécification d'entité cylindriques

La Figure 19a représente la rectitude des axes réels des cylindres : le lieu des centres des sections doit appartenir à une zone de tolérance $\varnothing 0,04$.

La Figure 19b représente la rectitude des axes associés des cylindres : Pour chaque cylindre, l'axe est associé par les moindres carrés. L'étendue est limitée aux extrémités du cylindres. Les deux axes limités aux 4 points doivent appartenir à une zone de tolérance $\varnothing 0,04$.

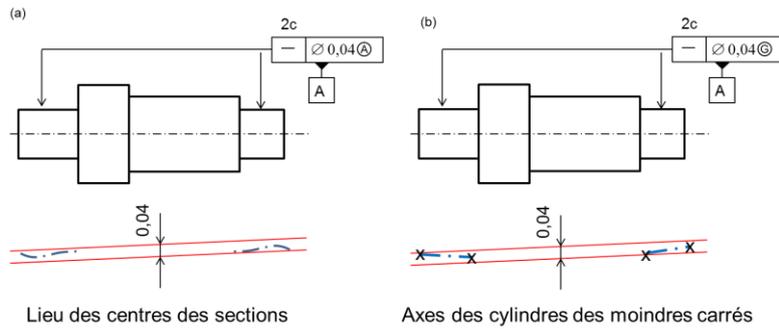


Figure 19 - Rectitude sur une composition de deux cylindres

NOTE : le modificateur \textcircled{C} peut être utilisé par exemple pour identifier la rectitude des axes pour des roulements serrés sur l'arbre. Ce modificateur est beaucoup plus simple à traiter en métrologie que le modificateur \textcircled{A} .

3. Spécifications en zones projetées

3.1 Projection d'un cylindre

La Figure 20a présente un arbre prolongé par une bague. La coaxialité Figure 20b porte sur la plage de projection \textcircled{P} qui correspond à la partie extérieure de la bague.

Le modèle nominal est associé à la référence primaire A.

La surface spécifiée est le cylindre réel de l'arbre. L'élément tolérancé est l'axe du cylindre associé par la méthode des moindres carrés. Cet axe doit se trouver dans la zone de tolérance cylindrique $\varnothing 0,4$ centrée sur l'axe nominal de C sur toute la plage \textcircled{P} .

La Figure 20b présente le même cas, avec une bague de longueur identique à celle du cylindre. Le modificateur \textcircled{C} précise que l'élément tolérancé est l'axe du cylindre des moindres carrés. Cette écriture est donc rigoureusement équivalente à la spécification en zone projetée, en considérant une longueur projetée identique à la longueur du cylindre.

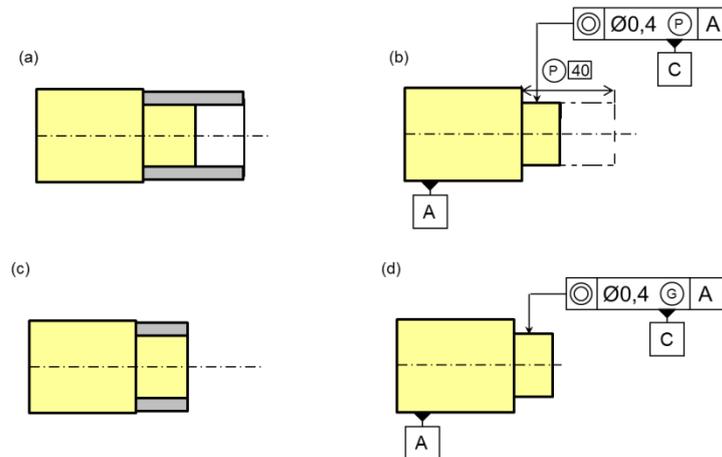


Figure 20 - Projection d'un arbre

3.2 Projection de plusieurs cylindres

La Figure 21 présente différents types de cotation et la représentation de l'élément projeté.

- (a) La surface spécifiée est le cylindre complet. Un cylindre est associé par les moindres carrés à cette surface. La plage de projection est \textcircled{P} .
- (b) La surface spécifiée est le cylindre limité à la zone partielle C1. Un cylindre est associé par les moindres carrés à cette surface. La plage de projection est \textcircled{P} .
- (c) La surface spécifiée est le cylindre défini par les 2 zones partielles C1 et C2. Un cylindre est associé par les moindres carrés à C1 et C2. La plage de projection est \textcircled{P} .
- (d) La surface spécifiée est le cylindre défini par les 2 zones partielles C1 et C2. Un cylindre est associé par les moindres carrés à C1 et C2. La plage de projection est \textcircled{P} qui dépasse de deux côtés de la pièce.

(e) L'indication 2x précise qu'il y a un groupe de deux éléments tolérancés avec 2 zones de tolérance. Pour chaque élément du groupe, la surface spécifiée est le cylindre complet. Un cylindre est associé par les moindres carrés à chaque surface. L'élément tolérancé est l'axe du cylindre associé. La plage de projection est P (Il suffit de définir la plage P pour un seul élément du groupe).

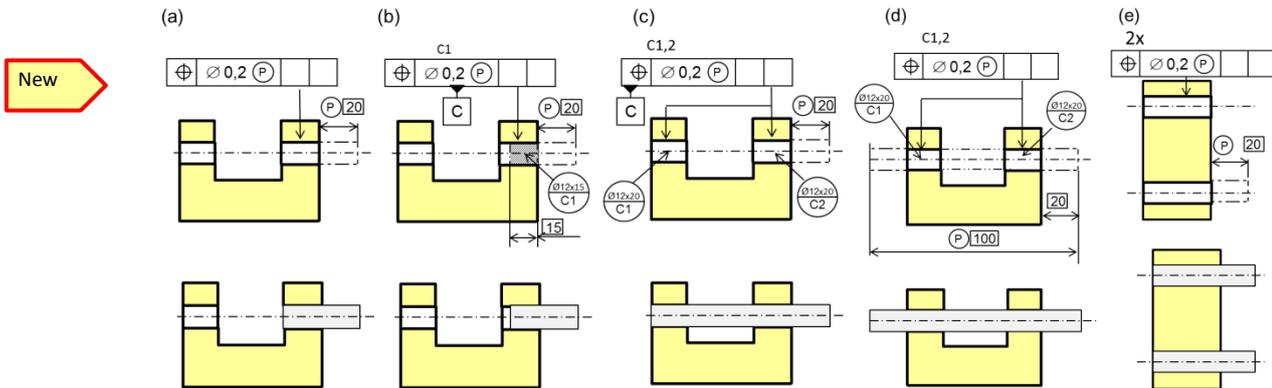


Figure 21- Expression de différents types de projections

3.3 Projection de deux plans parallèles

La Figure 22 comporte une entité C constituée avec 2 plans parallèles. C est projetée dans la plage 40x50 représentée en vue de gauche. L'élément tolérancé est le plan médian de deux plans parallèles de distance variable des moindres carrés aux deux surfaces latérales réelles.

Si besoin, la référence $C\text{P}$ sur la partie projetée peut être utilisée dans un système de références.

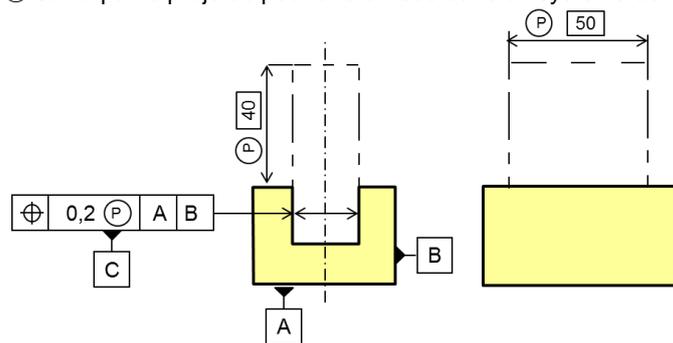


Figure 22 - Encastrement entre deux plans parallèles

4. Applications

4.1 Analyse des références

4.1.1 Références sans modificateur

La Figure 23 représente une chape serrée sur A en appui sur B. Un axe est serré dans C pour recevoir un bras articulé entre les plans D. Les dimensions théoriquement exactes sont supposées mesurables en CAO et n'ont pas été reportées sur le dessin.

(1) Dimension au maximum de matière $\text{Ø}20\text{M}$

- Élément tolérancé : surface cylindrique réelle A (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace contenu dans le cylindre $\text{Ø}20\text{M}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(1) Dimension au minimum de matière $\text{Ø}19,95\text{L}$

- Élément tolérancé : surface cylindrique réelle A (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace extérieur au cylindre $\text{Ø}19,95\text{L}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(2) Perpendicularité

- Élément tolérancé : Surface réelle plane B
- Référence : cylindre nominal associé par moindres carrés avec offset au cylindre réel A
- Élément nominal : plan perpendiculaire à A
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,03 parallèle à l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. (Les mobilités résiduelles du cylindre A sont identiques à la mobilité de la zone).

(3) Localisation

- Élément tolérancé : Surface réelle plane inférieure (tous les points de la surface)
- Référence primaire : cylindre nominal associé par moindres carrés avec offset au cylindre réel A
- Référence secondaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle B
- Élément nominal : plan nominal
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,3. La zone est centrée sur l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(4) localisation

- Élément tolérancé : axe réel de la surface composée des deux cylindres coaxiaux (lieu des centre des sections)
- Référence primaire : cylindre nominal associé par moindres carrés avec offset au cylindre réel A
- Référence secondaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle B
- Élément nominal : droite nominale
- Zone de tolérance : zone cylindrique de diamètre 0,1. La zone est centrée sur l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut-être orienté autour de A pour que l'axe réel tolérancé soit si possible dans la zone de tolérance.

(5) Dimension au maximum de matière $\varnothing 7,98^{\textcircled{M}}$

- Élément tolérancé : surface composée des deux cylindres réels C (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace extérieur au cylindre $\varnothing 7,98^{\textcircled{M}}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(5) Dimension au minimum de matière $\varnothing 8^{\textcircled{L}}$

- Élément tolérancé : surface composée des deux cylindres réels C (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace contenu dans le cylindre $\varnothing 8^{\textcircled{L}}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(6) symétrie

- Élément tolérancé : Deux surfaces planes réelles de la rainure D
- Référence primaire : cylindre nominal associé par moindres carrés avec offset au cylindre réel A
- Élément nominal : Deux plans nominaux
- Zone de tolérance : espace entre deux plans distants de $14,06^{\textcircled{L}}$ centrés sur les plans nominaux D (avec un offset identique de chaque côté)
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut-être orienté autour de A pour que l'élément tolérancé soit si possible dans la zone de tolérance.

(7) perpendicularité

- Élément tolérancé : Deux surfaces planes réelles de la rainure D
- Référence primaire : cylindre nominal associé par moindres carrés avec offset au cylindre réel C
- Élément nominal : Deux plans nominaux

- Zone de tolérance : espace extérieur aux deux plans distants de 14M centrés sur les plans nominaux D (avec un offset identique de chaque côté)
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut-être translaté suivant C pour que l'élément tolérancé soit si possible dans la zone de tolérance.

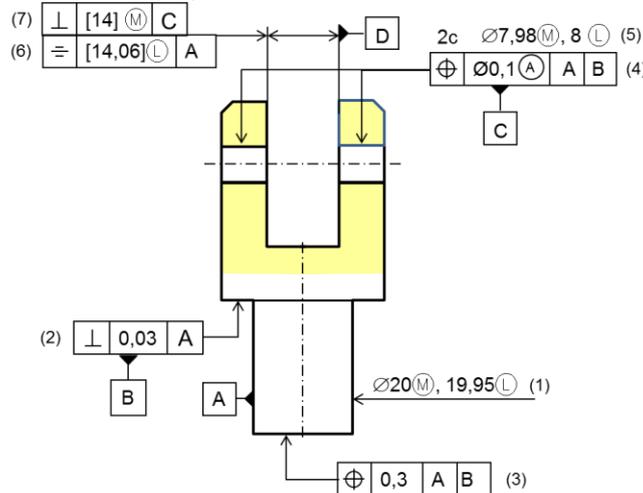


Figure 23 - Exemple avec références sans modificateur

4.1.2 Référence au maxi/mini matière

La Figure 24 illustre la cotation d'une entretoise positionnée par un appui plan sur A, un centrage court avec jeu sur B et une orientation tertiaire par les quatre alésages C.

(1) Planéité

- Élément tolérancé : Surface réelle plane A (tous les points de la surface)
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,02.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(2) Perpendicularité

- Élément tolérancé : Surface réelle cylindrique B
- Référence : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Élément nominal : cylindre perpendiculaire à A
- Zone de tolérance : espace contenu dans un cylindre $\text{Ø}26\text{M}$ centré sur le cylindre nominal B.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut glisser sur A pour que l'élément tolérancé soit si possible dans la zone de tolérance.

(3) Localisation

- Élément tolérancé : Groupe de 3 cylindres réels C (tous les points des surfaces réelles)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : cylindre nominal centré dans un cylindre $\text{Ø}26\text{M}$ flottant hors matière de l'élément de référence B.
- Surfaces nominales : 3 axes nominaux des 3 alésages C
- Zones de tolérance : 3 espaces extérieurs aux cylindres $\text{Ø}6,3\text{M}$ centrés sur les axes nominaux.
- La spécification est vérifiée si les éléments tolérancés sont contenus dans les 3 zones de tolérance. Le modèle nominal peut glisser sur A et tourner autour de B pour que les éléments tolérancés soient si possible dans les 3 zones de tolérance.

(4) Dimension au minimum de matière $\text{Ø}6,8\text{L}$

- Élément tolérancé : Groupe de 3 cylindres réels C (tous les points des surfaces réelles)
- Zones de tolérances : 3 espaces contenus dans 3 cylindres $\text{Ø}6,8\text{L}$ (les zones sont indépendantes)

- La spécification est vérifiée si les éléments tolérancés sont contenus dans les 3 zones de tolérance.

(5) Localisation

- Élément tolérancé : Surface réelle plane supérieure (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Élément nominal : plan nominal
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,6. La zone est centrée sur l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(6) Planéité

- Élément tolérancé : Surface réelle plane D (tous les points de la surface)
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,02.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(7) Perpendicularité

- Élément tolérancé : Surface réelle cylindrique E
- Référence : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D
- Élément nominal : cylindre perpendiculaire à D
- Zone de tolérance : espace contenu dans un cylindre $\varnothing 26$ (M) centré sur le cylindre nominal E.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut glisser sur D pour que l'élément tolérancé soit si possible dans la zone de tolérance.

(8) Localisation

- Élément tolérancé : Surface réelle plane D (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Élément nominal : plan nominal
- Zone de tolérance : zone comprise entre 2 plans distants de 0,2. La zone est centrée sur l'élément nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(9) Localisation

- Élément tolérancé : Surface réelle cylindrique E
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : cylindre nominal centré dans un cylindre $\varnothing 25,95$ (L).
- Élément nominal : Cylindre nominal E
- Zone de tolérance : espace extérieur au cylindre $\varnothing 25,95$ (L) centré sur l'axe nominal.
- Critère de conformité : le gabarit de contrôle est formé par un plan et un alésage $\varnothing 26$. Le jeu maxi est $26 - 25,95 = 0,05$. Le flottement secondaire est donc $0,025$ dans les deux sens. La zone de tolérance étendue est un cylindre $\varnothing 25,95 + 0,05 = \varnothing 26$. La surface réelle tolérancée doit rester dans la zone de tolérance étendue, quelle que soit la position permise par le jeu entre la pièce réelle et le gabarit de contrôle.

NOTE : les spécifications (1), (2), (3) assurent la montabilité de l'entretoise sur son environnement. La spécification (4) garantit une surface de contact suffisante avec la tête de vis pour limiter la pression de contact. La localisation (5) évite les interférences avec la pièce voisine.

Les spécifications (6), (7) assurent la montabilité de la pièce voisine sur l'entretoise. Les spécifications (8) et (9) imposent la position relative des deux jonctions avec les pièces voisines.

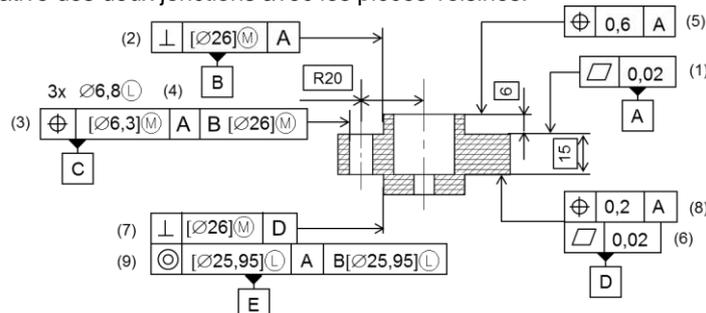


Figure 24 - Exemple avec références au maxi/mini matière

4.1.3 Référence sur cylindres coaxiaux identiques

La Figure 25 présente un arbre monté sur deux paliers avec du jeu.

(1) Rectitude

- Élément tolérancé : surface composée des deux portions de cylindres réels A1 et A2 (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace compris dans un cylindre $\varnothing 12$ (M)
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

(2) Coaxialité

- Élément tolérancé : axe réel du cylindre central (lieu des centres des sections)
- Référence : cylindre nominal A centré sur un cylindre $\varnothing 11,96$ (L) flottant dans la matière de l'élément de référence A constitué par les deux portions de cylindres réels A1 et A2.
- Élément nominal : axe nominal de A
- Zone de tolérance : zone cylindrique de diamètre 0,05. La zone est centrée sur l'élément nominal.
- Critère de conformité : le gabarit est formé par deux alésages $\varnothing 12$. Le calibre au minimum de matière est une pièce nominale avec deux cylindres A $\varnothing 11,96$. Le jeu entre le calibre et le gabarit est $12 - 11,96 = 0,04$. Le flottement du calibre dans le gabarit est 0,02 dans les deux sens, pour tout point de la surface spécifiée. La zone de tolérance étendue est un cylindre $\varnothing 0,05 + 0,04 = \varnothing 0,09$. L'élément tolérancé doit rester dans la zone de tolérance étendue, quelle que soit la position permise par le jeu entre la pièce réelle et le gabarit.

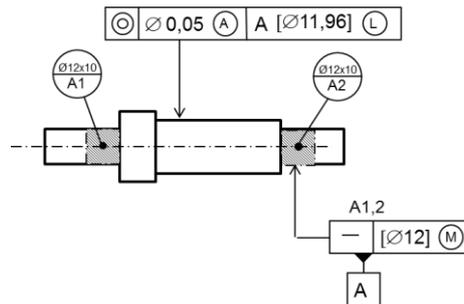


Figure 25 : Exemple avec références sur cylindres coaxiaux

4.1.4 Spécification de fabrication avec un centreur

Dans un dessin de phase, la spécification de fabrication ne peut imposer des exigences que sur des surfaces maîtrisées par le régleur. Avec un montage d'usinage muni d'un centreur (Figure 26a), le régleur positionne son repère d'usinage sur le centreur. La spécification de fabrication maîtrisée est une position par rapport à la référence au maximum de matière, avec un gabarit qui correspond au centreur.

Dans le dessin de phase Figure 26b, la localisation comporte une référence B au maximum de matière en indiquant directement le diamètre du centreur.

La spécification est respectée, si l'élément de référence B est dans la zone de tolérance extérieure au cylindre $\varnothing 30,02$ et l'axe réel tolérancé dans la zone de tolérance $\varnothing 0,2$.

NOTE : l'écriture traditionnelle du maximum de matière imposerait d'écrire le diamètre de l'alésage sur le dessin de phase. Ce diamètre ne peut pas être une spécification de fabrication imposée au régleur. De plus, le diamètre indiqué doit être le diamètre du centreur et pas de l'alésage de la pièce, ce qui impose une fausse cotation avec une tolérance différente de la cotation de l'alésage.

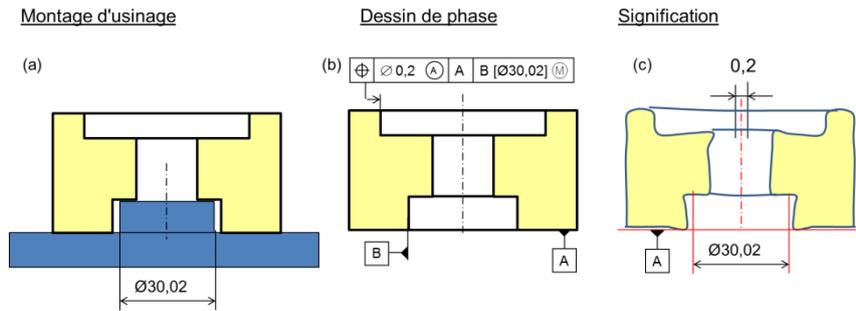


Figure 26 - Cotation de phase avec un centreur

4.2 Références sur zones partielles

4.2.1 Désignation des surfaces

La Figure 27 comporte deux groupes fonctionnels en liaison avec deux systèmes identiques.

Les références partielles A1 à A4, B1 à B4 sont utilisées pour désigner chacun des plans d'appui en évitant de multiplier les flèches ou les noms de surfaces.

Toute la surface de chaque appui est utilisée comme référence. L'étendue de la zone partielle est donc simplement indiquée par le symbole □.

La planéité (1) porte sur les 4 éléments tolérancés A1 à A4 considérés comme une seule surface : les 4 portions de surface doivent pouvoir être placées simultanément entre deux plans distants de 0,2.

La référence A est définie sur ces 4 zones partielles A1 à A4.

La localisation (2) positionne le plan au fond du lamage par rapport à A.

La planéité (3) porte sur les 8 éléments tolérancés A1 à A4 et B1 à B4 considérés comme une seule surface. Les 4 portions de surface doivent pouvoir être placées simultanément entre deux plans distants de 0,8.

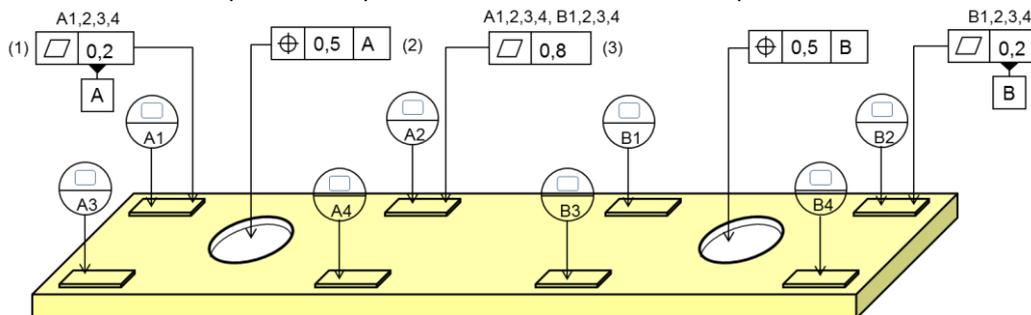


Figure 27 - Désignation des surfaces

4.2.2 Système de références plan/plan/plan

Le système de références de la Figure 28 est constitué des 3 plans nominaux A, B et C perpendiculaires entre eux. L'association du modèle nominal de la pièce à ces éléments de références est réalisée séquentiellement en 3 étapes :

- Le plan de référence primaire A est associé avec le critère minimax aux 3 zones partielles A1,2,3.
- Le plan de référence secondaire B est associé avec le critère minimax aux deux zones partielles B1,2. (B est implicitement perpendiculaire à A)
- Le plan de référence tertiaire C est associé avec le critère minimax à la zone partielle C1. (C est implicitement perpendiculaire à A et perpendiculaire à B)

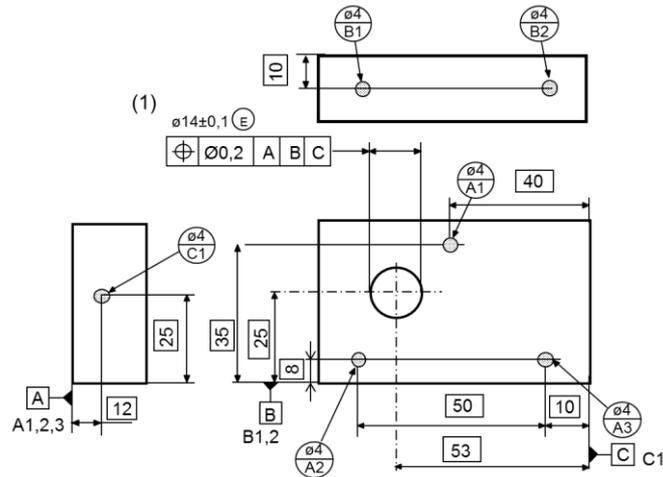


Figure 28 - Système de références plan | plan | plan

L'axe nominal de l'alésage spécifié par la localisation est parfaitement identifié par ce modèle nominal. La zone de tolérance est centrée sur cet axe nominal.

4.2.3 Système de références plan/plan incliné

Pour la spécification d'inclinaison (1) de la Figure 29, la référence primaire A est un plan appartenant au modèle nominal, associé aux trois zones partielles surfaciques $\varnothing 4$ (A1, A2, A3) par le critère minimax. La surface spécifiée est la totalité du plan incliné. La zone de tolérance d'orientation est parallèle au plan nominal B (qui est incliné à 135° par rapport à A). Les mobilités résiduelles du plan A permettent de déplacer le modèle nominal pour que la surface réelle tolérancée soit, si possible, dans la zone de tolérance.

Pour la spécification de localisation (2), l'association de la référence primaire est identique. La référence secondaire B est un plan appartenant au modèle nominal (incliné à 135° par rapport à A). Le modèle nominal est déplacé sur le plan A, avec les mobilités résiduelles, pour associer le plan de référence B à la zone partielle linéique B1 de longueur 40 et de largeur 4 par le critère minimax. La zone de tolérance de localisation est centrée sur l'élément nominal tolérancée.

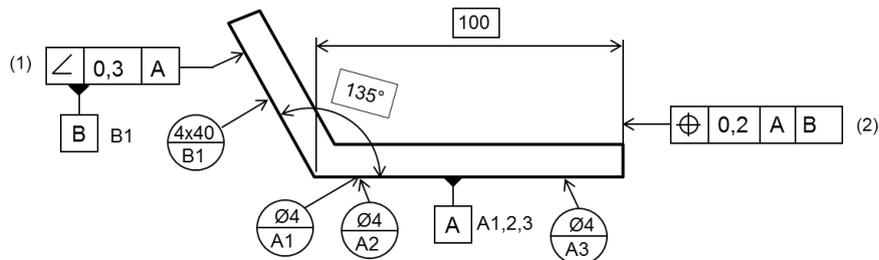


Figure 29 - Système de références plan | plan incliné

4.2.4 Surfaces complexes

La Figure 30 présente une porte supposée rigide. La pièce étant complexe, seule une définition numérique est possible.

La référence A est constituée de 6 zones partielles fixes A1 à A6. Le modèle nominal de la porte est directement associé aux 6 zones A1 à A6 par les moindres carrés.

Pour les spécifications de position (1), (2), (3), la surface spécifiée doit appartenir à la zone de tolérance définie par les deux surfaces offset de la surface nominale.

- La spécification de position (1) localise la surface supérieure de la porte par rapport à A.
- La spécification de position (2) localise le contour intérieur de la porte correspondant à la fenêtre par rapport à A.
- La spécification de position (3) localise uniquement quelques zones de mesure ponctuelles B1, B2 et B3 par rapport à A.

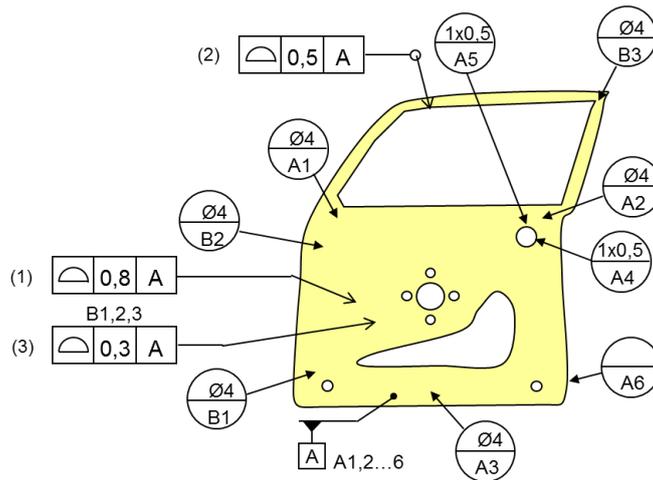


Figure 30 - Spécification en zones partielles

4.3 Cotation d'un brut

L'analyse des chaînes de cotes d'interférence d'une pièce avec les pièces voisines montrent que les surfaces brutes doivent être positionnées par rapport à un système de références de la pièce, généralement le système principal de mise en position.

La Figure 31 illustre la cotation type d'un brut.

La spécification (1) positionne toutes les surfaces de la pièce par rapport au système de références principal A|B|C de la pièce. Ce système n'a pas de modificateur. La tolérance est assez large.

NOTE 1 : Si nécessaire, des spécifications supplémentaires peuvent être ajoutées pour localiser certaines surfaces plus précisément.

NOTE 2 : Il est recommandé de ne pas mettre de modificateur sur le système de références, même s'il y a du jeu dans les liaisons. En effet, cette spécification regroupe essentiellement des exigences pour lesquelles le jeu est défavorable, ce qui imposerait des références au minimum de matière. Ce contrôle nécessiterait de mesurer toutes les surfaces pour faire le balancement et vérifier que toutes les surfaces appartiennent simultanément à la zone de tolérance tout en respectant la zone de tolérance des références. Cela est généralement impossible pour des problèmes d'accessibilité.

Cette spécification générale (1) n'est pas suffisante pour maîtriser les congés et les chanfreins. Il est nécessaire d'ajouter des spécifications du type $R\pm 0,3$ et $ch\ 2\pm 0,3$ à 45° .

NOTE 3 : certains congés définis par la CAO ont des formes très complexes. Les surfaces générées par le processus de fabrication ne respectent pas forcément les surfaces nominales. Une spécification de la forme $R\pm 0,3$ définit une zone de tolérance permettant de rejeter des congés trop petits ou trop grands.

La spécification (1) autorise une trop grande variation sur l'épaisseur des parois fines. La spécification de forme (3) porte sur la surface composée des deux faces latérales de la nervure, du plan supérieur et des deux congés. La zone de tolérance de forme impose ainsi une tolérance plus sévère sur la largeur de la rainure, y compris si les faces latérales ont des dépouilles.

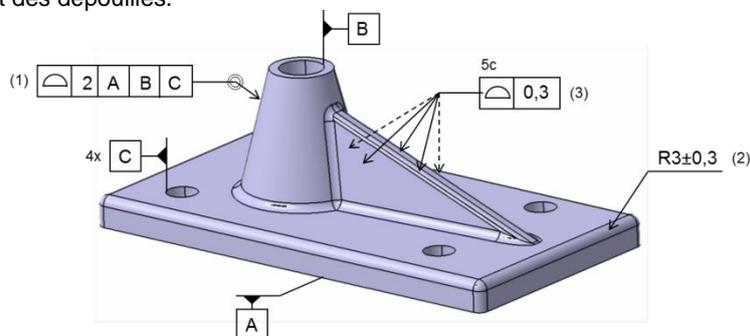


Figure 31 - Cotation fonctionnelle type d'un brut

Il est possible d'affiner la cotation des parois fines, en particulier des nervures avec la démarche suivante :

La spécification de forme Figure 32a porte sur une surface composée des deux zones partielles A1 et A2 qui incluent le pied de la nervure et les deux faces, mais pas le sommet. Cette zone de tolérance va ainsi garantir l'épaisseur du pied de la nervure, tout en laissant libre la hauteur de la nervure.

La spécification de forme Figure 32b porte sur une surface composée de la zone partielle A1 qui inclut les deux faces et le sommet, mais pas le pied de la nervure. Cette zone de tolérance va ainsi garantir l'épaisseur au sommet de la nervure, tout en laissant libre la largeur du pied de la nervure.

La spécification d'inclinaison Figure 32c est similaire, mais impose en plus que la nervure soit bien orientée par rapport à A.

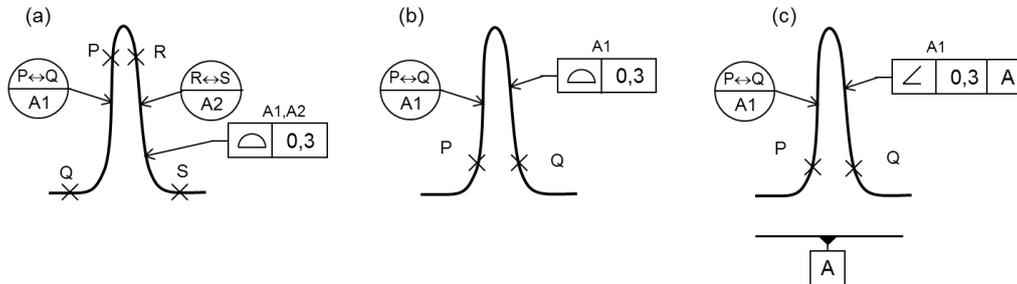


Figure 32 - Cotation des nervures

4.4 Cotation d'une gorge de circlips

La Figure 33a représente un arbre qui reçoit une bague en appui sur un circlips. Quatre exigences fonctionnelles sont imposées. La cotation correspondante est définie Figure 33b.

L'exigence E1 impose un jeu pour assurer la montabilité du circlips dans la gorge, suivant l'axe de l'arbre. Le circlips étant une pièce déformable, il suffit d'imposer une cote d'épaisseur (1)

L'exigence E2 est la montabilité du circlips avec un jeu maxi ou avec une précontrainte maximale avec le fond de gorge, qui impose un diamètre au maximum de matière (2).

L'exigence E3 correspond à l'étendue de la surface en contact entre le circlips et la face gauche de la gorge pour limiter la pression de contact. Cette résultante sera mini, lorsque le cylindre de fond de gorge et le diamètre extérieur de l'arête de contact seront au minimum de matière. En supposant qu'il n'y a pas de chanfrein, l'arête peut être définie par le cylindre extérieur G matérialisé par une zone partielle cylindrique étroite G1 (par exemple de 2 mm de large). Le circlips étant en appui sur le plan F, le maillon correspondant à cette exigence est donné par la coaxialité au minimum de matière (3) par rapport à F et G.

L'exigence E4 correspond à l'étendue de la surface en contact entre le circlips et la face gauche de la bague pour limiter la pression de contact. Cette résultante sera mini, lorsque le cylindre de fond de gorge et le diamètre extérieur du cylindre extérieur H matérialisé par une zone partielle cylindrique H1 seront au minimum de matière. Le maillon correspondant à cette exigence est donné par la coaxialité au minimum de matière (4) par rapport à H.

NOTE : les deux spécifications (3) et (4) sont très similaires. Il faut faire les chaînes de cotes correspondants aux exigences E3 et E4, et répartir les tolérances, pour déterminer le diamètre au minimum de matière extérieur nécessaire et suffisant pour répondre au besoin. Eventuellement, seule la spécification la plus sévère pourra être conservée.

L'exigence E5 est une exigence de position de la bague par rapport à une surface extérieure. La bague est en appui sur le circlips, lui-même en appui sur le flanc gauche de la gorge. Ce plan F doit donc être localisé par rapport au système de références A|B qui assure la mise en position de l'arbre.

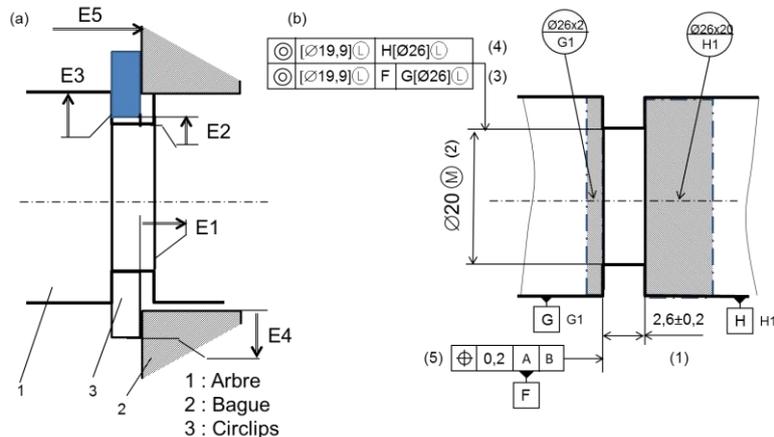


Figure 33 - Gorge de circlips

5. Mauvais usage du modificateur de décalage ▷

5.1 Rainure décalée par rapport à un cylindre

La localisation de la Figure 34 comporte un système de références sans modificateur :

- Référence primaire : plan nominal associé par le critère minimax à la surface réelle A.
- Référence secondaire : cylindre nominal associé par moindres carrés avec offset au cylindre réel B
- Référence tertiaire : 2 plans nominaux associés par les moindres carrés avec offset identiques de chaque côté aux deux plans réels de la rainure avec un décalage entre le plan médian des surfaces offset et la référence B.

Si la rainure réelle est légèrement décalée par rapport à l'axe B, le système de références passe par B et est orienté parallèlement à la direction donnée par la rainure. Ce système ne correspond pas au comportement de la liaison.

NOTE : la logique de cette règle repose sur le comportement d'une liaison réalisée par exemple par un lardon serré dans la rainure. Si le lardon est long, il positionne et oriente la pièce, alors que le cylindre B ne l'oriente pas. Il faudrait donc que la rainure soit en référence secondaire et l'alésage B en tertiaire, avec le modificateur ▷.

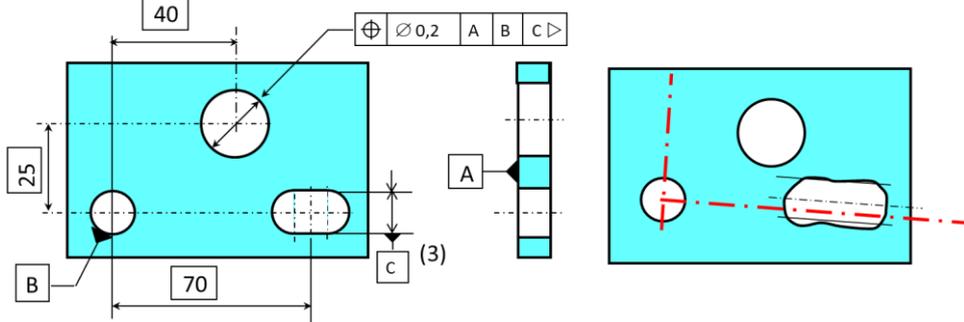


Figure 34- Décalage d'une rainure

5.2 Plan décalé par rapport à un cylindre

La pièce de la Figure 35 est articulée autour de A et vient en appui sur un plan parallèle à la liaison cylindrique, à une distance de 30 mm.

La cotation Figure 35a comporte un cylindre primaire A et un plan nominal secondaire B respectant donc la distance nominale de 30 entre B et A. La rotation autour de A permet de placer la référence secondaire tangente extérieure matière à l'élément de référence B (Figure 35b).

La cotation Figure 35c est similaire, mais avec un modificateur ▷ sur B qui impose d'associer la référence B avec un décalage δ pour minimiser la distance maxi entre l'élément de référence B et la surface associée. L'orientation de la pièce autour de A est donc donnée par B. Cette seconde cotation ne convient sans doute pas car ce comportement ne correspond pas à un simple appui sur un plan.

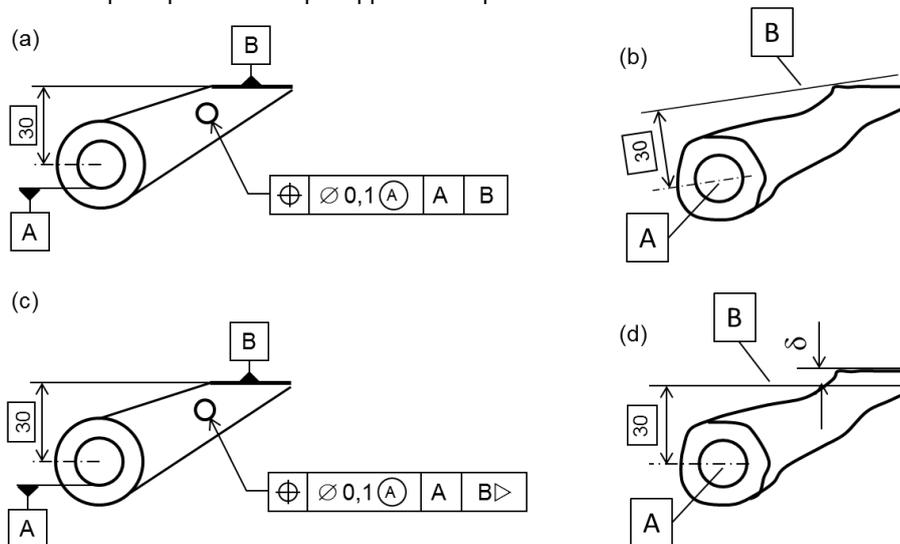


Figure 35 - Système de références cylindre | plan en porte-à-faux

6. Démarche cotation / contrôle avec maxi et mini matière

6.1 Spécification au (M) avec référence secondaire au (L)

6.1.1 Démarche cotation fonctionnelle avec jeu secondaire défavorable

Dans le mécanisme Figure 36, le contact est interdit entre les surfaces terminales. Pour cela, la distance minimale de 0,2 entre les surfaces terminales de l'exigence doit être respectée, quelle que soit la position permise par le jeu dans la jonction. Si le jeu augmente, les surfaces terminales se rapprochent. Le jeu est donc défavorable. Le jeu mini de 0,02 est imposé pour assurer la montabilité dans la jonction.

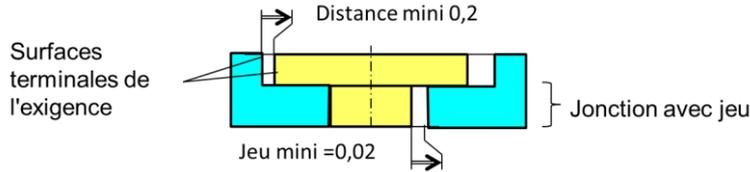


Figure 36 - Exigence de non contact

6.1.2 Détermination des limites des zones de tolérance

L'exigence est critique lorsque les surfaces terminales sont au maximum de matière et lorsque les surfaces de jonction sont au minimum de matière. Les pièces virtuelles critiques sont décrites Figure 37.

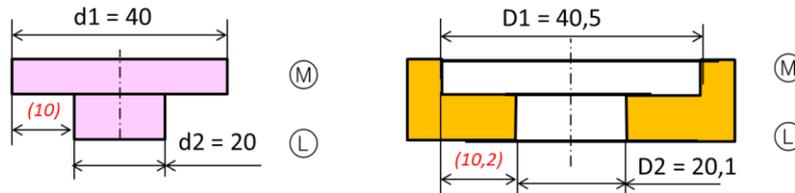


Figure 37 - Pièces virtuelles critiques

NOTE : les caractéristiques essentielles de ces deux pièces sont les deux distances de 10 et 10,2 entre les génératrices des cylindres. La différence laisse bien la distance mini de 0,2 désirée. Les pièces étant de révolution, ces cotes sont exprimées avec des coaxialités.

6.1.3 Cotation des pièces

Chaque pièce est spécifiée avec la surface terminale au maximum de matière et la référence au minimum de matière.

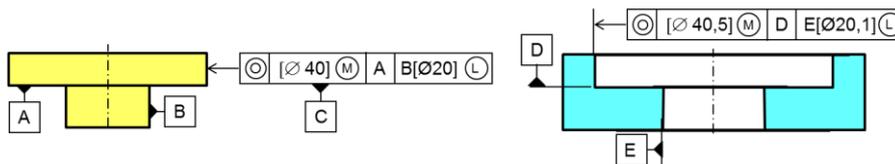


Figure 38 - Dessins de définition des deux pièces

NOTE : cette cotation impose des distances de 10,2 mini et 10 maxi entre les génératrices des cylindres, dans toutes les directions.

Le modèle de chaîne de cotes montre que la résultante au pire des cas respecte l'exigence de 0,2 mini. Cette chaîne de cotes comporte un maillon représentant le flottement permis par le jeu dans la jonction.

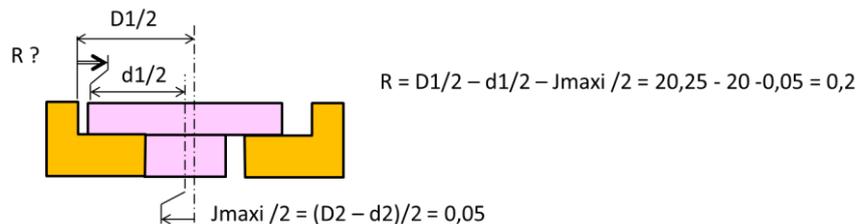


Figure 39 - Chaîne de cotes au pire des cas

NOTE : Le jeu maxi peut être décomposé en $J_{\max} = j_{\min} + t_B + t_E$, t_B et t_E étant les tolérances respectivement sur les cylindres B et E de la liaison avec jeu.

La relation de transfert donnant la résultante R devient :

$$2R = D1 - d1 - (J_{\min} + t_B + t_E)$$

Cette relation révèle la possibilité suivante :

- si la tolérance t_B n'est pas totalement exploitée, il est possible d'admettre un diamètre $d1$ plus grand que 40.
- si la tolérance t_E n'est pas totalement exploitée, il est possible d'admettre un diamètre $D1$ plus petit que 40,5.

Dans les deux cas, le cylindre limite au maximum de matière peut être dépassé.

6.1.4 Analyse de la spécification de l'arbre

La conformité de l'arbre spécifié selon la Figure 38 peut être réalisée avec un gabarit utilisé comme montage de contrôle et un calibre. Le gabarit comporte un alésage $\varnothing D2$ capable de recevoir toutes les pièces réelles. Le calibre virtuel au \textcircled{L} représente la pièce virtuelle avec le diamètre au minimum de matière sur la référence et le diamètre au maximum de matière sur la surface spécifiée.

Le jeu J entre le calibre et le gabarit est $J = D2 - d2 = 0,1$.

L'espace balayé par le cylindre C supérieur est un cylindre diamètre $40 + J = 40,1$. Le gabarit doit donc comporter un alésage $D1 = 40,1$ coaxial à $D2$.

La condition de conformité d'une pièce réelle avec ce gabarit est :

« La pièce réelle ne doit pas toucher le gabarit quelle que soit sa position permise par le jeu en B ».

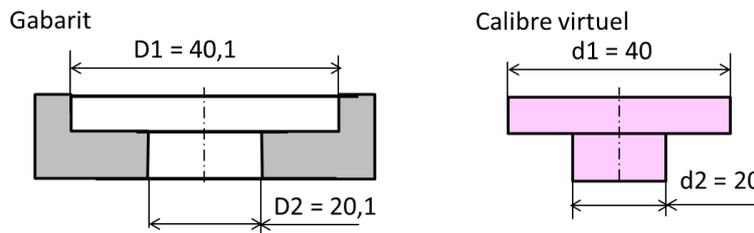


Figure 40 - Contrôle au gabarit

La mesure de la marge sur cette spécification peut être réalisée avec un montage de contrôle comportant un alésage de diamètre supérieur ou égal au diamètre maxi de l'alésage. Le comparateur est mis à "0" en rapprochant le plus possible le calibre du comparateur.

La pièce réelle doit être placée dans le gabarit de contrôle. Le comparateur ne doit jamais dépasser le "0", quelle que soit la position angulaire de la pièce réelle et quelle que soit la position permise par le jeu (il suffit de rapprocher la pièce contre le comparateur et de faire tourner la pièce...).

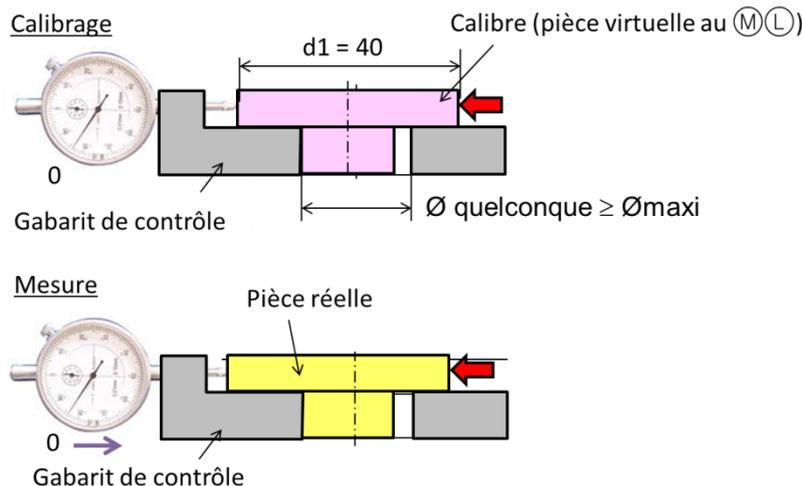


Figure 41 - Mesure avec un montage de contrôle

La plus petite valeur observée sur une pièce est la marge m sur la spécification. L'ensemble des marges mesurées sur un lot de pièces permet par exemple de calculer la capabilité pour cette spécification.

$$Cpk = \frac{\bar{m}}{\sigma_m}$$

La Figure 42 présente deux pièces conformes. Le jeu J entre la pièce réelle et le gabarit est $J = 0,02$.

Pour la pièce n°1, l'espace balayé par le cylindre supérieur C est un cylindre $\varnothing d1 + J = \varnothing 40,08 + 0,02 = \varnothing 40,1$.

Pour la pièce n°2, le cylindre supérieur C est décalé de 0,03 par rapport à B. L'espace balayé par le cylindre supérieur est un cylindre $\varnothing d1 + 2.e + J = 40,02 + 2.0,03 + 0,02 = \varnothing 40,1$.

Ces deux pièces respectent bien l'exigence et peuvent être déclarées conformes, bien que les diamètres $d1$ soient supérieurs au diamètre au maximum de matière $\varnothing 40(M)$! La référence au maximum de matière permet donc d'étendre la zone de tolérance sur l'élément tolérancé.

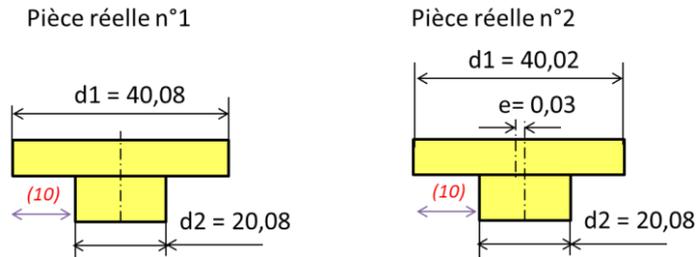


Figure 42 - Pièces réelles conformes

6.1.5 Contrôle des pièces avec les zones de tolérance

Cette section illustre une définition uniquement basée sur les zones de tolérance qui s'avère inutilement sévère. Cette condition impose que l'élément de références respecte la zone de tolérance au minimum de matière.

Dans le cas de l'arbre et de sa spécification Figure 38, les zones de tolérance sont décrites Figure 43a.

Condition simple de conformité : Quel que soit le point M appartenant à l'élément tolérancé, il existe une position des zones de tolérance telle que les éléments de référence et le point tolérancé soient simultanément dans les zones de tolérance.

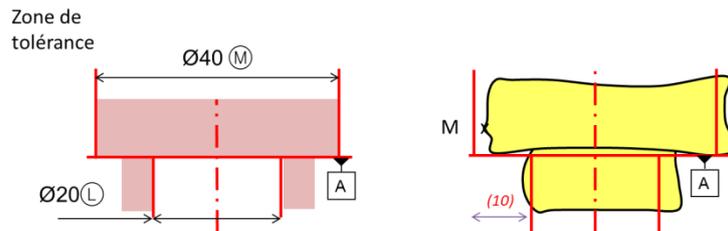


Figure 43 - Contrôle par zone de tolérance

Les contrôles sont presque équivalents au défaut d'orientation de la génératrice près.

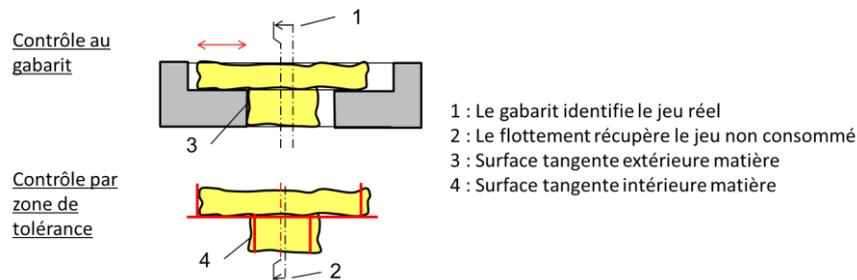


Figure 44 - Comparaison des deux règles de conformité

L'écart entre les deux évaluations est d'autant plus important qu'il y a un défaut de forme ou d'orientation de B par rapport à A. Ces défauts limitent le flottement de l'arbre dans l'alésage, ce qui permet d'accepter un défaut plus grand sur la surface spécifiée. Inversement, il est plus difficile de respecter la zone de tolérance, ce qui peut conduire au rebut inutile de la pièce.

La condition suffisante de conformité avec un montage de contrôle représente très bien le comportement réel des pièces. Le contrôle par zone de tolérance est inutilement pessimiste.

6.2 Spécification au (L) avec référence secondaire au (L)

6.2.1 Démarche cotation fonctionnelle avec jeu secondaire défavorable

La Figure 45 comporte une exigence de distance maxi lorsque les surfaces terminales sont écartées. L'assemblage est critique pour des pièces avec les surfaces terminales au minimum de matière et des références au minimum de matière. La chaîne de cotes comporte un maillon de flottement maxi.

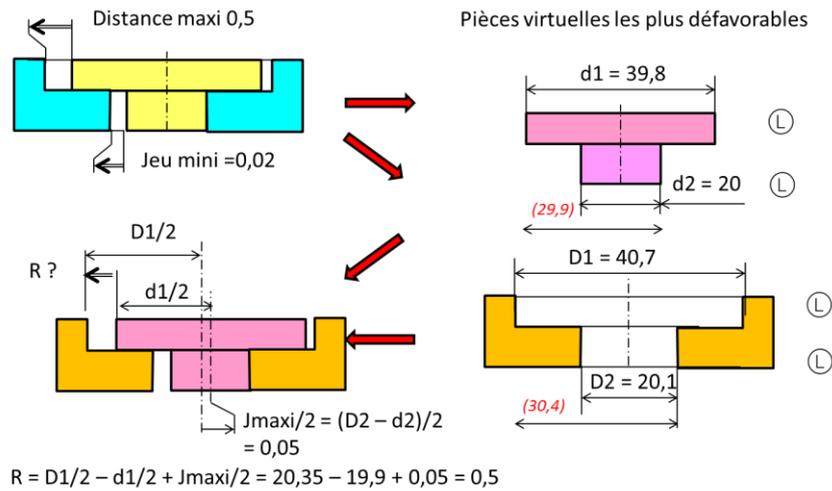


Figure 45 - Exigence et pièces virtuelles

NOTE : les caractéristiques essentielles de ces deux pièces sont les deux distances de 30,4 et 29,9 entre les génératrices des cylindres. La différence laisse bien la distance maxi de 0,5 désirée.

Le dessin de définition comporte une surface spécifiée et une référence au minimum de matière.

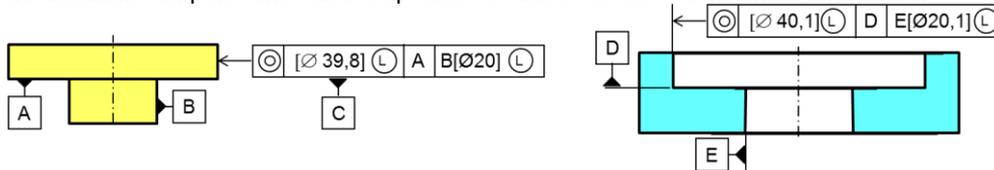


Figure 46 - Dessins de définition des deux pièces

6.2.2 Analyse de la spécification de l'arbre

Le jeu J entre le calibre et le gabarit (Figure 47) est $J=0,1$.

L'espace intérieur balayé par le cylindre C est un cylindre $d1 - J = \text{Ø}39,8 - 0,1 = \text{Ø}39,7$.

Condition de conformité avec un gabarit : Une bille de diamètre 0,2 ne doit pas pouvoir être placée entre la pièce et le gabarit quelle que soit sa position permise par le jeu en B.

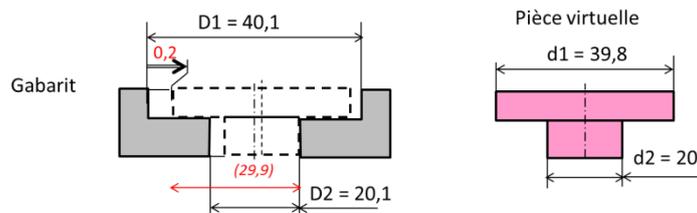


Figure 47 - Contrôle au gabarit

Le comparateur est mis à "0" à l'aide du calibre représentant la pièce virtuelle limite en écartant le calibre du comparateur.

La pièce réelle doit être placée dans le gabarit de contrôle. Le comparateur ne doit jamais dépasser le "0", quelle que soit la position angulaire de la pièce réelle et quelle que soit la position permise par le jeu. (Il suffit d'écartier la pièce du comparateur et de faire tourner la pièce).

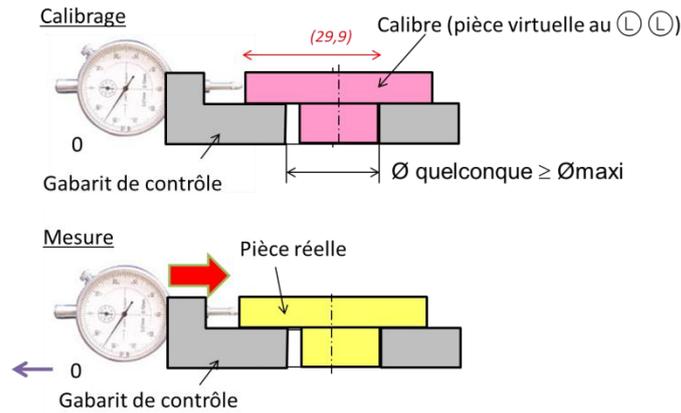


Figure 48 - Mesure avec un montage de contrôle

La Figure 49 présente deux pièces conformes.

Le jeu J entre la pièce réelle et le gabarit est $J=0,02$.

Pour la pièce n°1, l'espace balayé par le cylindre C est un cylindre $\varnothing d1 - J = \varnothing 39,72 - 0,02 = \varnothing 39,70$.

Pour la pièce n°2, Le cylindre C est décalé de 0,03 par rapport à B. L'espace intérieur balayé par le cylindre C est un cylindre $\varnothing d1 - 2 \cdot e - J = \varnothing 39,78 - 2 \cdot 0,03 - 0,02 = \varnothing 39,70$.

Ces deux pièces respectent bien l'exigence et peuvent être déclarées conformes, bien que les diamètres $d1$ soient inférieurs au diamètre au minimum de matière $\varnothing 39,8 \text{ (L)}$!

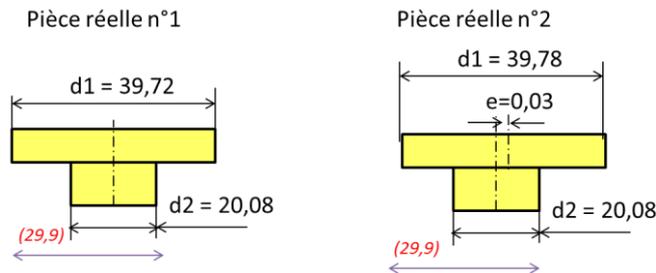


Figure 49 - Exemple de pièces conformes

6.2.3 Contrôle par zone de tolérance

Condition de conformité : Quel que soit le point M appartenant à l'élément tolérancé, il existe une position des zones de tolérance telle que les éléments de référence et le point tolérancé soient simultanément dans les zones de tolérance

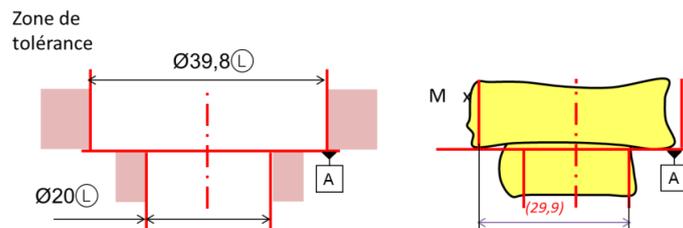


Figure 50 - Contrôle par zone de tolérance

Les contrôles sont presque équivalents au défaut d'orientation de la génératrice près.

- Le gabarit identifie le jeu réel,
- Le flottement de l'état virtuel récupère le jeu non consommé.

Le contrôle par zone de tolérance est inutilement pessimiste.

6.3 Application avec référence sur un groupe de trous

6.3.1 Dessin de définition

Le mécanisme Figure 51 comporte un carter mis en position sur la base par les deux alésages B avec du jeu. Le flasque est également centré dans le carter par l'alésage D avec du jeu.

Le carter est supposé rigide. Le jeu doit compenser les écarts d'entraxes entre les centreurs de la base et les alésages B du carter.

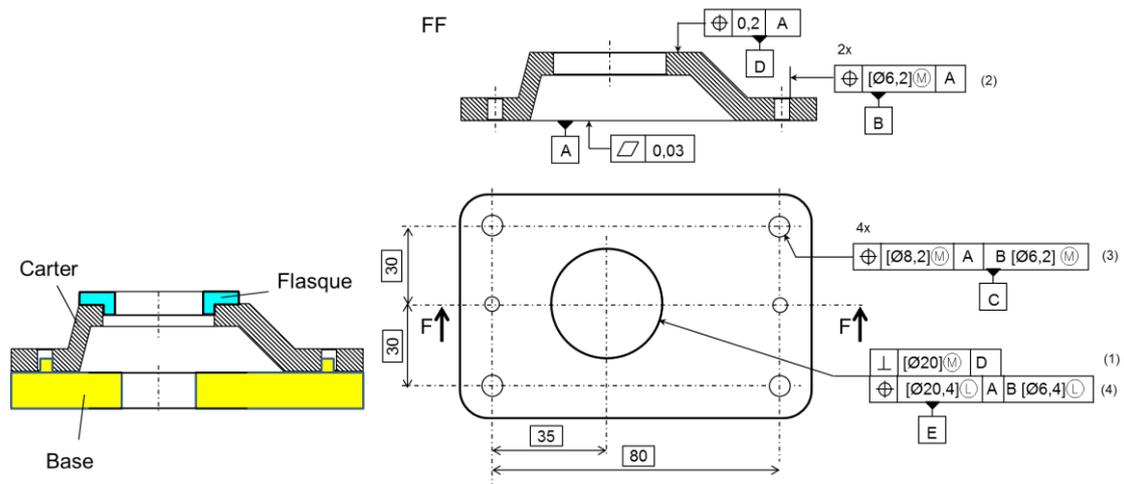


Figure 51 - Système de références au maxi et au minimum de matière

6.3.2 Conditions de montabilité au maximum de matière

Avec un système de références au maximum de matière, les éléments tolérancés et les éléments de référence doivent respecter simultanément toutes les zones de tolérance. Autrement dit, il existe une position du modèle nominal telle que cette condition est vérifiée.

La perpendicularité (1) (Figure 51) assure la montabilité du flisque en appui sur D et centré dans l'alésage E. La frontière entre les deux pièces est un cylindre $\varnothing 20 \text{ (M)}$ qui doit être hors matière :

- Élément tolérancé : Surface réelle cylindrique E Figure 52 (1)
- Référence : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D
- Élément nominal : cylindre perpendiculaire à D
- Zone de tolérance : espace à l'extérieur d'un cylindre $\varnothing 20 \text{ (M)}$ centré sur le cylindre nominal E.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut glisser sur D pour que l'élément tolérancé soit si possible dans la zone de tolérance.

La localisation (2) (Figure 51) assure la montabilité du carter sur les deux centreurs de la base avec un appui plan sur A :

- Élément tolérancé : Groupe de 2 cylindres réels B (tous les points des surfaces réelles) Figure 52 (2)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Surfaces nominales : 2 cylindres nominaux B (distants de 80mm)
- Zones de tolérance : 2 espaces extérieurs aux cylindres $\varnothing 6,2 \text{ (M)}$ centrés sur les cylindres nominaux.
- La spécification est vérifiée si les éléments tolérancés sont contenus dans les 2 zones de tolérance. Le modèle nominal peut glisser sur A pour que les éléments tolérancés soient si possible dans les 2 zones de tolérance.

La localisation (3) (Figure 51) assure la montabilité de 4 vis de fixation, lorsque la pièce est centrée par B.

- Élément tolérancé : Groupe de 4 cylindres réels C (tous les points des surfaces réelles) : Figure 52 (3)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : 2 cylindres nominaux B centrés dans des cylindres $\varnothing 6,2 \text{ (M)}$ flottants hors matière dans les éléments de référence B.
- Surfaces nominales : 4 axes nominaux des 4 alésages C
- Zones de tolérance : 4 espaces extérieurs aux cylindres $\varnothing 8,2 \text{ (M)}$ centrés sur les axes nominaux C.
- La spécification est vérifiée si les éléments tolérancés sont contenus simultanément dans les 4 zones de tolérance. Le modèle nominal peut glisser sur A et flotter autour de B pour que les éléments tolérancés soient si possible dans les 4 zones de tolérance.

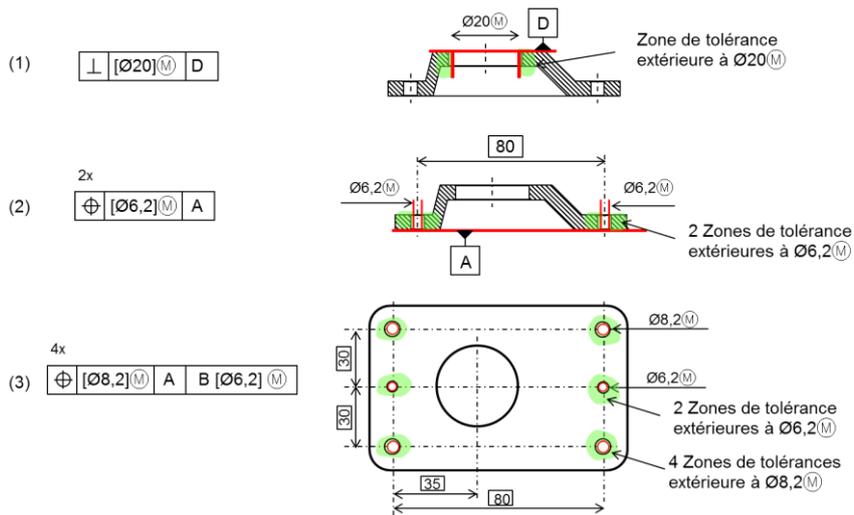


Figure 52 - Zone de tolérance au maximum de matière

NOTE : la condition de conformité de la localisation (3) impose implicitement le respect de la localisation (2). Cette localisation (2) pourrait être supprimée, mais il peut être intéressant de la maintenir afin d'assurer la bonne gestion de cette exigence, par exemple à l'aide d'une carte de contrôle.

6.3.3 Conditions de précision avec une référence au minimum de matière

L'exigence fonctionnelle d'alignement des axes des deux alésages du flasque et de la base impose la localisation (4) (Figure 51) .

- Élément toléré : Surface réelle cylindrique E Figure 53 (2)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : 2 cylindres nominaux B centrés dans des cylindres Ø6,4(L).
- Surface nominale : axe nominal de l'alésage E.
- Zone de tolérance : espace intérieur au cylindre Ø20,4(L) centré sur l'axe nominal E.
- Critère de conformité : Le calibre est une pièce nominale avec un plan A et deux alésages B Ø6,4 (Figure 54). Le gabarit est formé par un plan et par 2 piges Ø6,2 (Figure 55). Le jeu entre le gabarit et le calibre est de 0,2 mm. L'alésage toléré ayant son centre sur la droite passant par les deux alésages B, le flottement de tous les points P de l'alésage toléré est égal au jeu/2 dans les deux sens. La zone de tolérance étendue est $\text{Ø}20,4+0,2 = \text{Ø}20,6$. La surface réelle tolérée doit rester dans la zone de tolérance étendue, quelle que soit la position permise par le jeu entre la pièce réelle et le gabarit.

NOTE : la position du nominal peut changer pour les différents points de l'élément toléré.

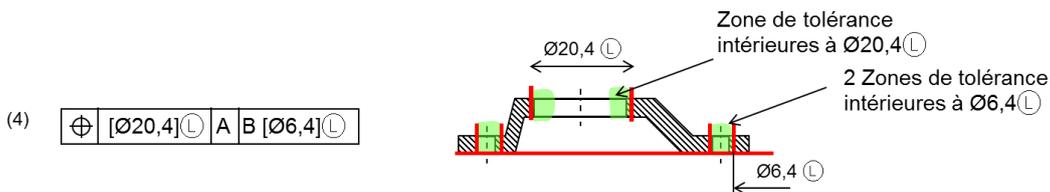


Figure 53 - - Zone de tolérance au mini matière

6.3.4 Analyse du contrôle avec référence au minimum de matière

Le calibre défini Figure 54 correspond à la localisation au minimum de matière (4) de la Figure 51.

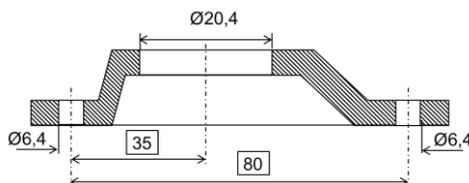


Figure 54 – Calibre avec référence au minimum de matière

Toute pièce réelle qui a davantage de matière sera conforme. Cette condition simple est suffisante pour déclarer la conformité, mais n'est pas nécessaire. Pour cela, il faut globaliser les mobilités permises sur la référence et la zone de tolérance sur l'élément toléré.

Ce calibre Figure 54 est considéré comme la pièce la plus défavorable pour valider les chaînes de cotes correspondant à une exigence. Cela signifie que quelle que soit la position de la pièce permise par les jeux dans les alésages B, la paroi de l'alésage E doit assurer le guidage du flasque. Cette chaîne de cotes 3D comporte donc un maillon qui caractérise le jeu dans les centrages B.

La condition de conformité impose de définir un gabarit (physique ou numérique) composé d'un plan et de deux pignes Ø6,2 (Figure 55).

La Figure 55 illustre l'assemblage du calibre sur le gabarit. Le jeu entre les alésages Ø6,4 du calibre et Ø6,2 du gabarit est $J=0,2\text{mm}$.

La droite Δ liée au gabarit représente la position nominale de l'axe de l'alésage E.

Le calibre peut librement se déplacer de $\pm J/2$ avec $J=0,2$ sur le gabarit. L'alésage E au minimum de matière Ø20,4 admet donc une paroi jusqu'à un cylindre de diamètre $20,4 + J = 20,6$ centré sur Δ .

NOTE : si l'alésage E n'est pas situé entre les alésages B, les déplacements dépendent de la direction. La zone étendue n'est pas de forme circulaire.

Il est possible de fixer des comparateurs sur le gabarit. Chaque comparateur est mis à « 0 » sur le calibre en déplaçant au maximum le calibre dans la direction du comparateur. Cette valeur « 0 » ne doit pas être dépassée.

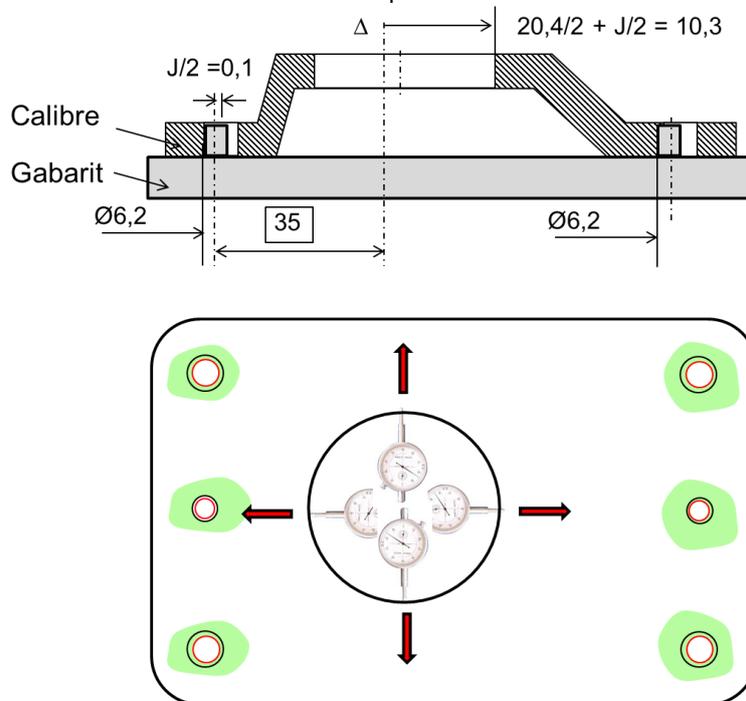


Figure 55 - Position de l'alésage admis par la chaîne de cotes

Le critère de conformité d'un carter est obtenu en plaçant le carter réel dans le gabarit. Il faut que la surface réelle respecte la zone de tolérance étendue quelle que soit la position de la pièce dans le gabarit, autrement dit, les comparateurs doivent indiquer des valeurs supérieures ou égales à « 0 » quelle que soit la position de la pièce dans le gabarit.

La Figure 56a présente une pièce conforme avec un alésage E Ø20,6, centré sur la droite Δ . Les deux alésages 6,4 sont décalés avec un entraxe de 80,2. Cette pièce a une mobilité nulle sur le gabarit. Elle respecte donc la zone de tolérance étendue bien que la zone de tolérance Ø20,4 $\text{\textcircled{L}}$ sur l'alésage E ne soit pas respectée et que les zones de tolérance sur B ne soient pas respectées en raison de l'entraxe trop grand.

Ce carter respecte donc la zone de tolérance étendue bien que la zone de tolérance Ø20,4 $\text{\textcircled{L}}$ sur l'alésage E et les zones de tolérance sur B ne soient pas respectées.

La Figure 56b présente une pièce conforme avec un alésage E Ø20,4, centré sur la droite Δ . Les deux alésages 6,5 sont décalés avec un entraxe de 80,2. Cette pièce a un jeu $J=0,1$ par rapport au gabarit. Chaque point de l'alésage E peut donc se déplacer de $\pm 0,05$. Malgré ce flottement, chaque point respecte la zone de tolérance étendue Ø20,6.

Ce carter respecte donc la zone de tolérance étendue bien que les zones de tolérance sur B ne soient pas respectées.

Ce dépassement est acceptable car le tolérancement au minimum de matière des centres de la base garantit la présence de points de contact partout autour des cylindres Ø6,1 avec un entraxe nominal, condition qui est validée par le gabarit.

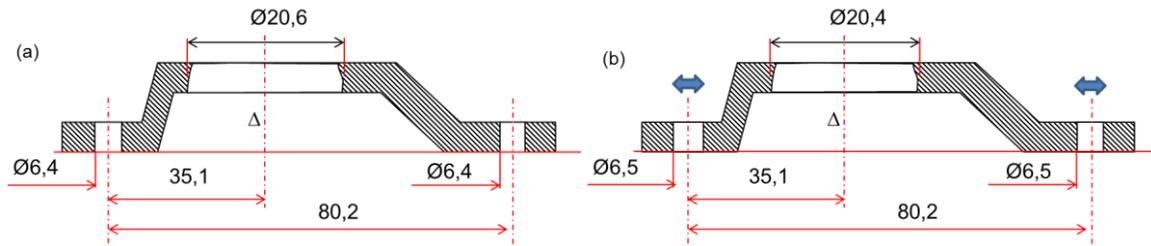


Figure 56 - Exemple de pièce conforme

NOTE 1 : cette pièce respecte l'exigence. Le diamètre Ø20,6 est pourtant plus grand que le diamètre au minimum de matière Ø20,4. Cette surface tolérancée respecte bien la zone de tolérance étendue. Ceci est possible car le système de références est au minimum de matière.

NOTE 2 : il serait impossible d'accepter cette pièce avec la notation classique du minimum de matière qui impose inutilement une dimension locale plus petite que le diamètre au minimum de matière.

6.4 Application avec référence sur une composition de cylindres

La Figure 57a présente une spécification (1) sur une surface composée A. La zone de tolérance est définie à l'intérieur de deux cylindres coaxiaux Ø30 et Ø40. Les deux cylindres réels doivent être dans la zone de tolérance.

La coaxialité (2) impose deux zones de tolérance :

- Pour la surface réelle spécifiée D, la zone de tolérance est extérieure au cylindre Ø25 centrée sur l'axe nominal.
- Pour les éléments de référence, la zone de tolérance est extérieure aux deux cylindres coaxiaux Ø29,9 et Ø39,9 centrés sur l'axe nominal.

Critère de conformité : le gabarit comporte deux alésages Ø30 et Ø40. Le calibre au minimum de matière est formé par une pièce nominale avec deux cylindres A Ø29,9 et Ø39,9 et un cylindre spécifié D coaxial Ø25.

Un comparateur est initialisé à « 0 » à l'extrémité M de la surface spécifiée en écartant la surface. (Figure 57b)

La pièce réelle doit être placée dans le gabarit (Figure 57c). Le comparateur ne doit pas dépasser la valeur « 0 » quelle que soit la position de la pièce, en particulier en écartant la surface et en tournant la pièce dans le gabarit.

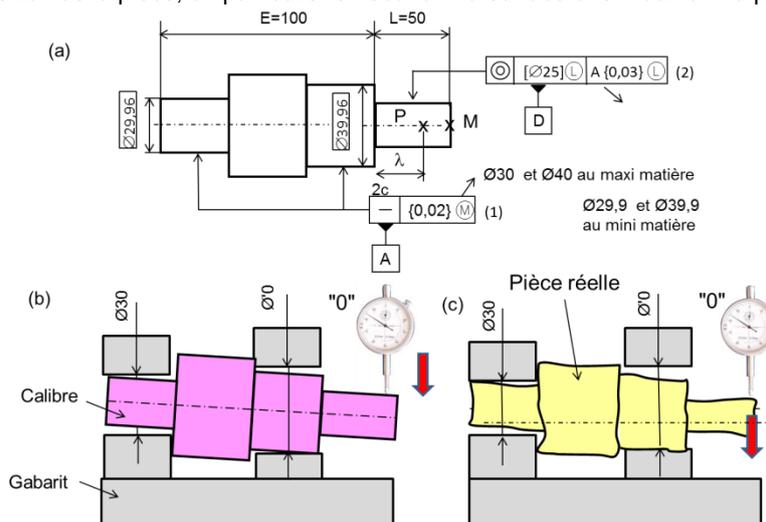


Figure 57 - Maxi/mini matière sur une surface composée

Pour un contrôle numérique, il faut calculer le flottement dû au jeu entre le calibre et le gabarit.

Ce jeu est $J = 2 \cdot (0,03 + 0,02) = 0,1$.

Le flottement f_P du calibre dans le gabarit dépend du point P avec : $f_P = 0,05 + J \cdot \lambda / E = 0,05 + 0,1 \cdot \lambda / 100$

Pour $\lambda = L = 50$, $f_P = 0,05 + 0,1 \cdot 50 / 100 = 0,1$.

Pour $\lambda = 0$, $fP = 0,05$.

La zone de tolérance étendue est un cône de diamètre $\varnothing 25 - 2x fP$ variant entre 24,9 et 24,8

La surface réelle tolérancée doit rester dans la zone de tolérance étendue extérieure au cylindre $\varnothing 24,8$, quelle que soit la position permise par le jeu entre la pièce réelle et le gabarit.

6.5 Orientation par rapport à une surface au (M) et (L)

6.5.1 Perpendicularité par rapport à un cylindre au (M)

La Figure 58a comporte une référence au maximum de matière, qui traduit un jeu dans la liaison favorable à l'exigence.

- Élément tolérancé : surface réelle B
- Référence primaire : cylindre A
- Surface nominale : plan B perpendiculaire à A
- Zone de tolérance : zone comprise entre deux plans distants de 0,2 et perpendiculaires à un cylindre $\varnothing 20$ devant contenir l'élément de référence A.
- Critère de conformité : il existe une position de la référence A telle que l'élément tolérancé soit dans la zone de tolérance.

Ce contrôle peut être réalisé avec un gabarit comportant un alésage $\varnothing 20$ correspondant au diamètre au maximum de matière de A et un plan perpendiculaire au cylindre Le calibre peut être un simple plan (Figure 58b).

Un comparateur est mis à « 0 » avec le calibre posé sur le gabarit (Figure 58c). La pièce à vérifier est placée dans le gabarit. Un effort doit être appliqué sur la pièce pour placer si possible la surface tolérancée dans la zone de tolérance de 0,2 (Figure 58d). La pièce doit être testée pour différentes position angulaire autour de A.

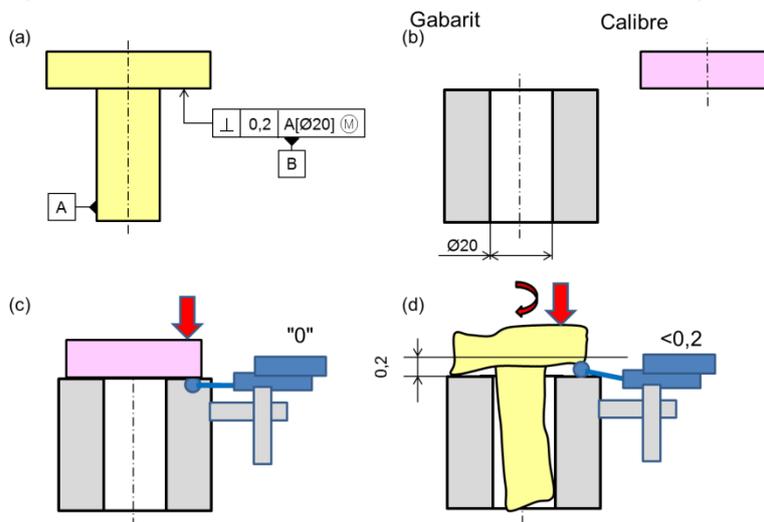


Figure 58 - Perpendicularité avec référence au maximum de matière

6.5.2 Perpendicularité par rapport à un cylindre au (L)

La Figure 59a comporte une référence au minimum de matière, qui traduit un jeu dans la liaison défavorable à l'exigence.

- Élément tolérancé : surface réelle B
- Référence primaire : cylindre A
- Surface nominale : plan B perpendiculaire à A
- Zone de tolérance : zone comprise entre deux plans distants de 0,2 et perpendiculaires à un cylindre $\varnothing 20$ devant être contenu dans l'élément de référence A.
- Critère de conformité : Le calibre est une pièce nominale avec un cylindre A $\varnothing 19,9$ (Figure 59b). Le gabarit est formé par un alésage $\varnothing 20$ et un plan. Le jeu entre le gabarit et le calibre est de 0,1 mm.

Le plan tolérancé du calibre peut se déplacer de fP en raison du jeu sur A. La zone de tolérance étendue est $0,2 + fP$. La surface réelle tolérancée doit rester dans la zone de tolérance étendue, quelle que soit la position permise par le jeu entre la pièce réelle et le gabarit.

Ce contrôle peut être réalisé avec un gabarit et un calibre (Figure 59b). Un comparateur est mis à « 0 » avec le calibre posé sur le gabarit (Figure 59c) en basculant le calibre. L'écart avec le plan correspond au flottage fP en ce point. La pièce à vérifier est placée dans le gabarit. Un effort doit être appliqué sur la pièce pour basculer la

pièce. La surface doit respecter la zone de tolérance indiquée par la déviation du comparateur limitée à 0,2, quelle que soit la position de la pièce notamment pour différentes position angulaire autour de A.

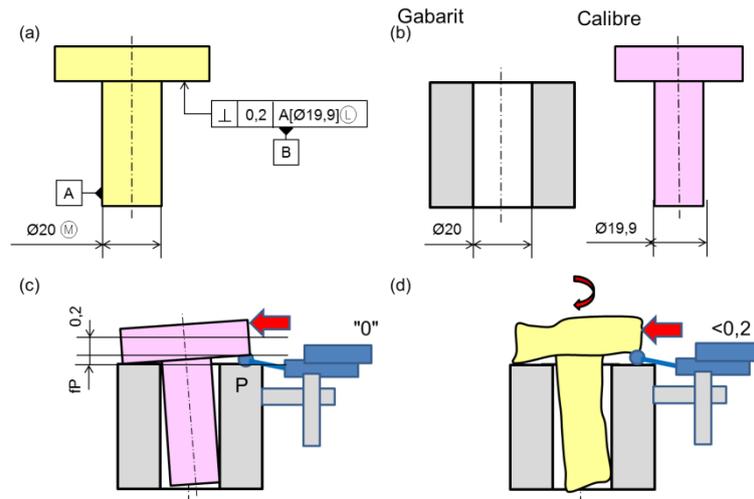


Figure 59 - Perpendicularité avec référence au minimum de matière

6.5.3 Orientation avec une référence au minimum de matière

REGLE : La condition suffisante de conformité d'une spécification d'orientation avec une référence au minimum de matière est :

La surface tolérancée doit être dans la zone de tolérance étendue, quelle que soit la position de la pièce dans le montage de contrôle.

- Un calibre représente la pièce virtuelle avec la référence au minimum de matière.
- Le montage de contrôle représente le système de références, mais avec des dimensions permettant de recevoir toutes les pièces réelles (le plus souvent, les dimensions au maximum de matière). Le montage est calibré avec le calibre au minimum de matière pour identifier le flottement maximal f_P de chaque point tolérancé P au minimum de matière.
- La zone de tolérance est étendue de la valeur f_P en chaque point P de la surface tolérancée.

Pour la spécification de parallélisme Figure 60a, la surface spécifiée est un plan. La référence primaire A au minimum de matière est définie par deux plans parallèles distants de 10,05. La zone de tolérance d'orientation est limitée par deux plans distants de $t=0,2$ mm. Cette zone est parallèle à la surface nominale spécifiée.

Le calibre Figure 60b représente la pièce nominale avec la référence A au minimum de matière de largeur $d=10,05$ (L). La surface nominale spécifiée est représentée par la face supérieure du calibre.

Le gabarit de contrôle Figure 60c comporte deux tenons de largeur d capable de laisser passer toutes les pièces. La largeur d doit donc être inférieure ou égale à la dimension au maximum de matière $d_M = 10$.

Placé dans ce gabarit, le calibre peut flotter. Pour ce mécanisme, le déplacement est identique en tous les points P de la surface nominale, et dans les 2 sens. Le flottement est $f_P = d - d_M = 10,05 - 10 = 0,05$

La zone de tolérance dans laquelle doit se trouver la surface réelle spécifiée est étendue pour chaque point P à la largeur $T = t + f_P = 0,2 + 0,05 = 0,25$.

La pièce réelle doit être placée dans le gabarit de contrôle Figure 60d. La surface spécifiée doit rester dans la zone de tolérance de largeur T, quelle que soit la position de la pièce dans le montage de contrôle.

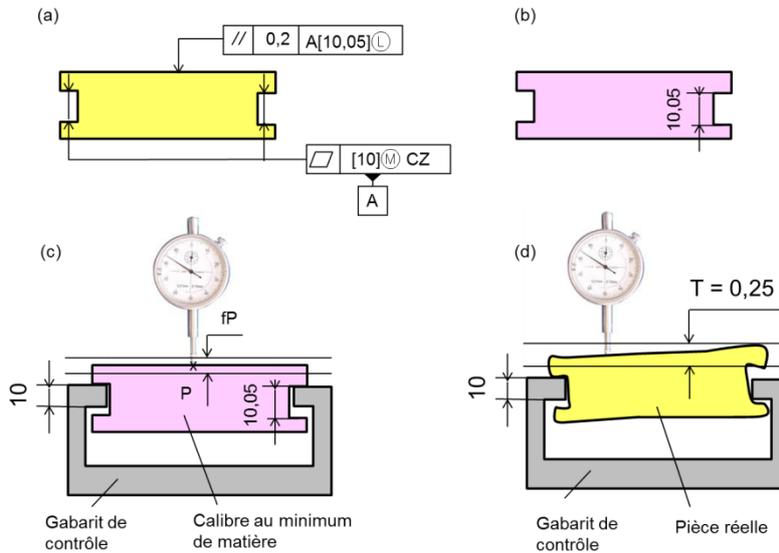


Figure 60 - Contrôle d'une orientation avec une référence au mini matière

NOTE : Cet exemple montre qu'une pièce avec un défaut de planité de 0,25 peut être acceptée, si la référence est proche du maximum de matière.

6.6 Système de références avec une référence primaire avec Ⓜ ou Ⓛ

6.6.1 Association d'un plan après une référence avec Ⓜ ou Ⓛ

Une référence au maxi ou mini matière limite le balancement du modèle nominal selon des degrés de liberté qui ne peuvent plus être utilisés par les références suivantes du système de références.

Dans la spécification (1) de la Figure 61, la référence primaire A est définie au maximum de matière. La référence B est un plan perpendiculaire à A.

La référence A bloque partiellement les deux degrés de liberté en rotation et deux translations, mais le modèle nominal bénéficie d'une petite mobilité résiduelle si le cylindre A réel est plus petit que le cylindre au maximum de matière Ø20 pour placer si possible la surface tolérancée dans la zone de tolérance.

La référence secondaire B doit être associée à l'élément de références B. Les deux degrés de liberté en rotation de ce plan sont déjà bloqués par la référence primaire. L'association ne peut se faire qu'avec la translation selon la direction de l'axe de A. La référence spécifiée B du modèle nominal est simplement tangente à l'élément de référence B.

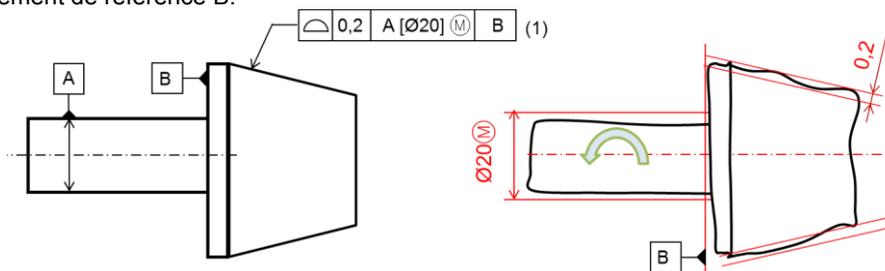


Figure 61 - Mobilité résiduelle sur une référence primaire

NOTE : Cette difficulté peut révéler une cotation parfaite en analysant différemment la mise en position de la pièce dans le mécanisme, par exemple en associant la référence primaire et la surface spécifiée dans une référence commune.

6.6.2 Association d'un plan après une référence avec Ⓛ

L'exigence étudiée Figure 62 est la position de l'alésage du corps par rapport à la référence A de l'embase. Cet assemblage comporte une liaison primaire avec un jeu maxi de 0,1.

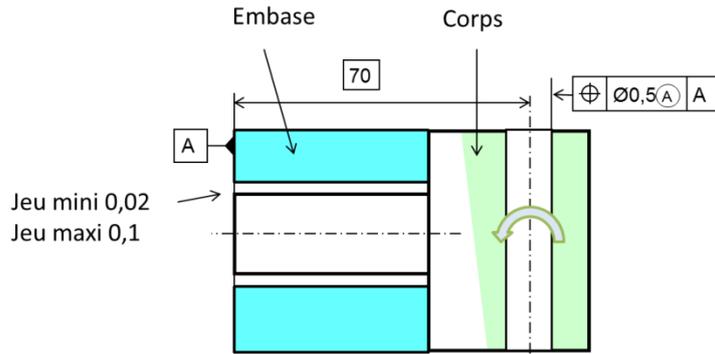


Figure 62 - Mécanisme avec référence primaire avec jeu

La cotation du corps impose une référence A au minimum de matière pour la localisation (1) et pour la perpendicularité (3).

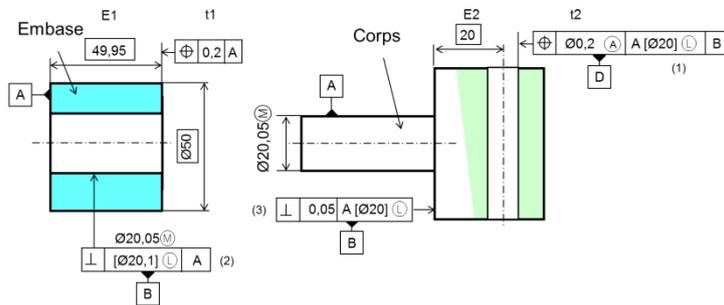


Figure 63 - Dessins de définition

Pour cette analyse, le défaut de perpendicularité du plan d'appui secondaire par rapport au cylindre primaire est supposé négligeable sur les deux pièces.

La position de l'alésage du corps est étudiée au point P à l'extrémité de l'axe. La résultante étudiée est la distance du point P au plan A de l'embase.

La configuration de la Figure 64a permet de calculer Rmini, lorsqu'un effort F1 plaque le corps sur l'embase. La mobilité dans la liaison primaire n'a pas d'effet. Le point P ne se déplace pas, par rapport à la position nominale (FP=0). La résultante mini en P est donnée par la relation suivante :

$$E1 + E2 - t1/2 - t2/2 = 49,95 + 20 - 0,2/2 - 0,2/2 = 69,75$$

Dans la configuration de la Figure 64b, l'effort F2 maintient le contact, mais fait basculer la pièce en déplaçant le point P.

$f_{P+} = J_{maxi} \cdot L1/E1$. La résultante maxi en P est donnée par la relation suivante :

$$E1 + E2 + t1/2 + t2/2 + J_{maxi} \cdot L1/E1 = 49,95 + 20 + 0,2/2 + 0,2/2 + 0,1 \cdot 50/49,95 = 70,25$$

Le déplacement du point Q dû au jeu est $f_{Q-} = 0$ sous l'effort F1 et $f_{Q+} = J_{maxi} \cdot L1/2 \cdot E1$ sous l'effort F2. La résultante maxi est largement respectée. Il aurait été possible de définir une zone de tolérance variable dans la spécification (1) Figure 63.

L'exigence est bien respectée en P et en Q avec cette cotation.

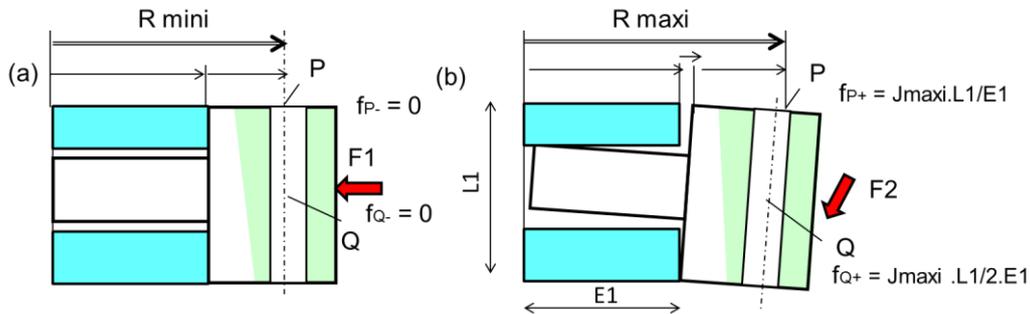


Figure 64 - Modèle de transfert

NOTE : le flottement au point P étudié n'est pas symétrique par rapport à la position nominale $|f_{P-}| \neq |f_{P+}|$.

Le flottement du point P a été pris en compte dans la chaîne de cotes pour réduire la tolérance de chaque pièce. Si le jeu est plus faible, le flottement du point P sera plus faible et il sera possible d'accepter un écart supplémentaire sur la position de l'alésage D.

6.6.3 Analyse de la spécification de l'arbre

Pour cette spécification (1) Figure 63, la référence au minimum de matière impose un gabarit représentant le système de références. Le diamètre choisi est $dM = \varnothing 20,05$ correspondant au maximum de matière, ce qui permet de vérifier simultanément la cote $\varnothing 20,05 \text{ (M)}$.

Le calibre représente l'alésage D spécifié en position nominale, par rapport à une référence A au minimum de matière avec $dL = 20$ et le plan B.

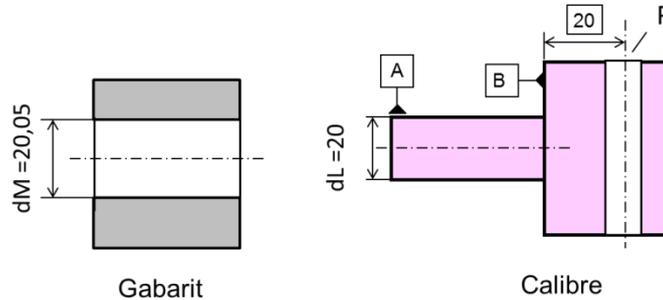


Figure 65 - Gabarit et calibre au minimum de matière

Le flottement du point P du appartenant au calibre est $f_{P-} = 0$ dans le sens $-X$ et $f_{P+} = J \cdot L1/E1$ de la sens $+X$, avec $J = dM-dL$ d'où $J = 0,05$; $f_{P-} = 0$; $f_{P+} = 0,05$.
 Au point Q, $f_{Q-} = 0$; $f_{Q+} = 0,025$.

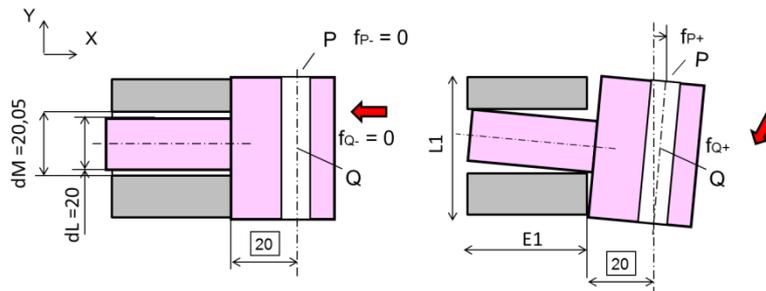


Figure 66 - Flottement des points P et Q

La tolérance de la spécification (1) Figure 63 est $t2 = 0,2$. Avec la référence au minimum de matière, la zone de tolérance est étendue :

- au point P de $f_{P-} = 0$ dans la direction $-x$ et de $f_{P+} = 0,05$ dans la direction $+x$.
- au point P de $f_{Q-} = 0$ dans la direction $-x$ et de $f_{Q+} = 0,025$ dans la direction $+x$.

La zone de tolérance étendue a donc une largeur variable.

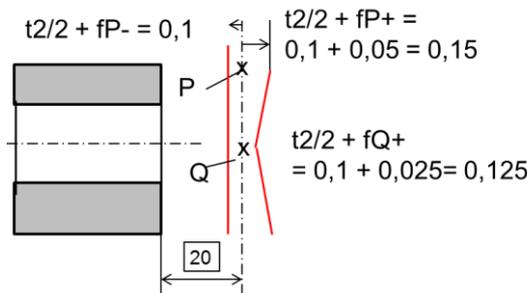


Figure 67 - Zone de tolérance étendue

6.6.4 Condition de conformité d'une pièce au gabarit

Pour effectuer le contrôle, la pièce réelle doit être placée dans le gabarit. Tous les points de l'axe réel de l'alésage doivent rester dans la zone de tolérance étendue quelle que soit la position de la pièce dans le gabarit, en particulier lorsque l'effort plaque le corps sur le gabarit (Figure 68a) ou si l'effort le fait basculer (Figure 68b).

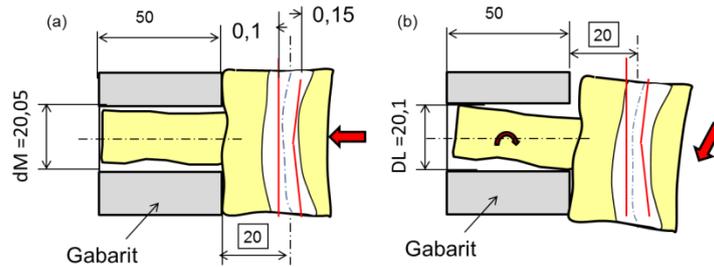


Figure 68 - Vérification de la pièce au calibre

En effet, si la pièce réelle est placée dans l'embase la plus défavorable pour l'exigence maxi, avec un alésage au minimum de matière de diamètre $DL = 20,1$, il y aura un flottement en P qui dépend du jeu réel J plus grand que le jeu calculé avec le gabarit de diamètre $dM = 20,05$. Le jeu supplémentaire est $J_s = 0,05$. Ce flottement supplémentaire en P est $fS = J_s \cdot L_1 / E_1 = 0,05$ suivant $+x$ et 0 suivant $-x$. Dans ces conditions, la résultante est $R = E_1 \text{maxi} + 20 + fP + fS = 50,05 + 20 + 0,15 + 0,05 = 70,25$. L'exigence est bien vérifiée.

6.6.5 Problème de la condition de conformité d'une pièce à la zone de tolérance

Ce cas montre que le contrôle de conformité en utilisant les zones de tolérance n'est pas satisfaisant.

Condition de conformité : Quel que soit le point M appartenant à l'élément tolérancé, il existe une position des zones de tolérance telle que les éléments de référence et le point tolérancé soient simultanément dans les zones de tolérance

La Figure 69a illustre une pièce avec le cylindre A proche de la limite au minimum de matière $d_{\text{mini}} = \varnothing 20$. La zone de tolérance n'a aucun flottement. L'axe réel de l'alésage doit appartenir à la zone de tolérance.

La Figure 69b illustre une pièce avec un cylindre A plus gros. Le modèle nominal peut flotter, tant que la surface réelle A reste dans la zone de tolérance extérieur au cylindre $\varnothing 20 \text{ (L)}$. Si le plan B reste tangent extérieur matière à la surface réelle, le flottement de la zone de tolérance permet d'accepter des pièces avec une distance à la surface réelle B inférieure à la dimension théoriquement exacte. Cette pièce serait conforme, mais ne respecterait par l'exigence mini. Cette règle de conformité ne convient pas.

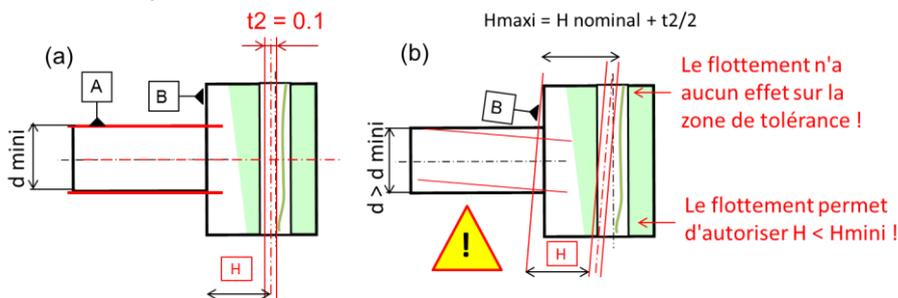


Figure 69 - Problème de contrôle par zone de tolérance

NOTE : Le principe du contrôle avec la zone de tolérance sur une référence au minimum de matière ne convient pas lorsque la référence est primaire et que la référence secondaire est un plan tangent extérieur matière.

L'écart angulaire est bien pris en compte, mais pas autour du bon centre instantané de rotation.

Dans la méthode avec le gabarit, le champ de déplacement est calculé en réduisant l'angle maxi déterminé par le minimum de matière dans la liaison : par exemple l'angle passe de 7° à 4° (la rotation est moins grande si la pièce réelle n'est pas au minimum de matière, donc la rotation est de -3°).

Dans la méthode avec la zone de tolérance, le champ de déplacement est calculé à partir de la position nominale. L'angle de rotation est bien négatif, avec angle final est de -3° .

Le problème est que le centre instantané de rotation n'est pas le même lorsque l'angle diminue de 7° à 4° ou de 0 à -3° , car il y a un changement de point de contact sur la surface secondaire.

En conclusion, il est probable que les deux méthodes soient très souvent équivalentes, aux approximations liées à une prise en compte différente des défauts de forme, voire d'orientation. Par contre, le contre-exemple ci-dessus incite à privilégier la méthode par calibre qui peut être exploitée aussi bien sous forme numérique qu'avec de simples comparateurs.