

# PARTIE 3 : Références complémentaires

---

## SOMMAIRE

1.	Déplacement des références .....	2
1.1	Introduction .....	2
1.2	Décalage entre une référence et la surface associée ▷ .....	2
1.3	Auto-centrage dans une référence commune .....	5
1.4	Zone partielle mobile .....	7
1.5	Déplacement du nominal par rapport au système de références .....	8
2.	Référence sur des lignes .....	11
2.1	Référence primaire sur deux sections .....	11
2.2	Référence secondaire sur une ligne .....	11
2.3	Référence primaire sur une ligne .....	12
3.	Référence sur surface associée .....	14
3.1	Références sur surface associée par © .....	15
3.2	Références sur plage projetée © .....	16
4.	Référence définie avec un élément de situation .....	18
4.1	Principe de l'élément de situation .....	18
4.2	Éléments de situation construit dans un système de références .....	20
4.3	Construction d'une référence avec un élément de situation .....	22
4.4	Élément de situation indépendant .....	22
4.5	Association du modèle nominal avec un élément de situation .....	24
5.	Références sur élément de contact .....	27
5.1	Principe et définition .....	27
5.2	Critères d'association .....	30
5.3	Élément de contact fixe .....	31
5.4	Éléments de contact mobile .....	32
5.5	Éléments de contact hyperstatiques .....	35
5.6	Éléments de contact libres .....	36

Les exemples sont donnés en annexe C

# 1. Déplacement des références

## 1.1 Introduction

Une pièce est positionnée dans le mécanisme par des surfaces de mise en position qui constitue le système de références principal de la pièce. Chaque surface fonctionnelle est donc positionnée par rapport à ce système de références.

Les références d'un système de références sont les surfaces nominales du modèle, par définition en position parfaite par rapport au nominal. Lors de l'association du modèle nominal à la pièce, les surfaces de références du modèle nominal sont associées successivement aux éléments de références réels en respectant l'ordre primaire, secondaire et tertiaire.

Pour certains mécanismes, la mobilité permise par la cinématique ou par des déformations permet d'admettre un décalage entre la surface nominale et la surface associée à la surface réelle. Pour représenter au mieux ces décalages, il est nécessaire de mettre un modificateur sur les références.

- Le modificateur  $\triangleright$  s'emploie pour décaler la surface associée par rapport à une référence, lorsqu'il y a un degré de liberté pour compenser les écarts de position ou d'orientation (déformation, lumière, cinématique...).
- Le modificateur [DV] s'emploie pour une référence composée de plusieurs liaisons parallèles ou hyperstatiques avec une déformation symétrique de la pièce pour compenser les écarts de distance entre les éléments de référence de cette référence. Il faut un plan de symétrie.
- Les zones partielles mobiles  $\textcircled{B1}$  sont utilisées pour une surface composée avec des appuis fixes et des appuis mobiles assurant un autocentrage de la pièce (par exemple par déformation).
- La translation  $\text{><}[//D]F$  ou la rotation  $\text{)}(=[D]F$  du modèle nominal s'emploient lorsque la pièce est mise en position par un système de références, mais qu'un processus de réglage permet de recalibrer la pièce sur une autre surface F.

## 1.2 Décalage entre une référence et la surface associée $\triangleright$

### 1.2.1 Contexte d'emploi

Dans certains mécanismes, la mise en position est assurée par des pièces différentes ayant des mobilités entre-elles. Ces mobilités modifient la mise en position.

NOTE : Cette section ne considère que la mobilité des références secondaires et tertiaires. En effet, la mobilité d'une référence primaire revient à déplacer le modèle nominal selon le processus présenté au chapitre 1.5.

Sur la pièce spécifiée, le système de références est A|B ou A|B|C.

- La Figure 1a représente un système articulé. La variation de l'entraxe de C par rapport à B est compensée par la rotation des deux pièces. La position nominale de l'alésage T doit être établie dans un système de référence insensible au déplacement de la référence C sur l'arc de cercle imposé par l'autre bielle.
- La Figure 1b comporte un dispositif de rattrapage du jeu. Le centrage sur B est indépendant de la profondeur du cône.
- Dans la Figure 1c, la liaison tertiaire est assurée par un insert monté sur une articulation. Le système de référence est donc insensible aux défauts d'orientation de cette référence C autour de cet axe.

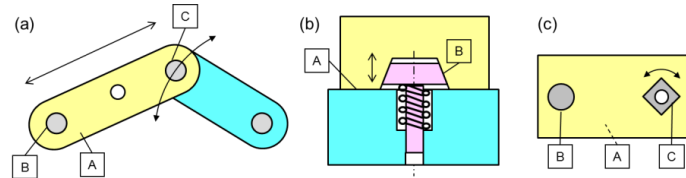


Figure 1 - Mobilité de la référence en vis à vis

NOTE : Pour permettre le calcul des chaînes de cotes 3D, il faut que les modèles nominaux des pièces en contact soient superposables en confondant les systèmes de références. Le système de références est toujours défini sur les surfaces nominales. Par contre, la surface associée à la surface réelle peut être décalée par translation ou rotation par rapport à la surface nominale.

### 1.2.2 Principe de l'indicateur de décalage $\triangleright$ par défaut

**Définition :** Le modificateur  $\triangleright$  « Décalage de la surface associée », permet de décaler la surface associée par rapport à la référence, par défaut par translation selon la direction  $\vec{p}$  de contrainte entre les références.

NOTE : ce modificateur ne s'applique que pour une référence secondaire ou tertiaire. Le décalage de la surface associée se fait donc par rapport à la surface nominale positionnée par les références prioritaires. Le modificateur ne s'applique que s'il y a une contrainte de distance entre les références. Le modificateur  $\triangleright$  permet d'associer à la surface réelle une surface identique à la surface de référence, translatée par un décalage  $\delta$  dans la direction  $\vec{p}$ . Le décalage  $\delta$  est calculé par le critère d'association

- Le critère minimax consiste à minimiser le plus grand des  $e_i$ .
- Le critère des moindres carrés consiste à minimiser  $S = \sum e_i^2$

Si l'une des références en contrainte est un plan, la direction  $\vec{p}$  est par défaut la normale au plan.

Si les deux références sont des cylindres parallèles, la direction  $\vec{p}$  est par défaut la direction formée par la perpendiculaire commune aux deux axes des deux cylindres.

Dans le cas général, il peut être nécessaire de définir la direction  $\vec{p}$  à l'aide d'un indicateur de mobilité.

Dans cet exemple Figure 2, l'arbre est guidé par le secteur cylindrique sur la zone partielle inférieure. L'orientation est donnée par un plat. La référence primaire A est définie sur un cylindre nominal tangent au secteur cylindrique. La référence secondaire est le plan B à 10 mm de l'axe de A. L'orientation de l'arbre est assurée par un plan minimax décalé de  $\delta$  par rapport à la référence B (Figure 2c).

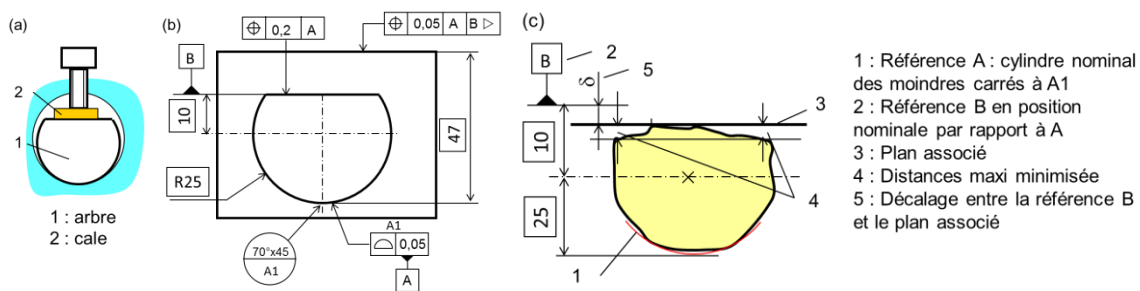


Figure 2 – Décalage par défaut d'une surface associée

### 1.2.3 Indication du décalage de la surface associée

Le décalage de la surface associée par rapport à la référence peut être une translation et/ou une rotation

L'indicateur de translation (Figure 3a) définit une translation de direction  $\vec{p}$  qui peut être perpendiculaire à un plan ou parallèle à une droite identifié dans la seconde case de l'indicateur.

L'indicateur de rotation (Figure 3b) définit une rotation autour d'une droite identifiée dans la seconde case de l'indicateur.

La surface utilisée dans l'indicateur de décalage peut être une surface du modèle de la pièce, de préférence une surface du système de références ou une surface construite spécialement dans le modèle nominal (qui est donc équivalente à un élément de situation).

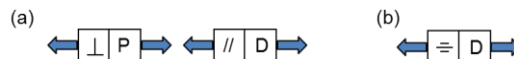


Figure 3- Indicateur de mobilité d'une référence décalée par  $\triangleright$

NOTE : dans une référence commune sur une surface composée, il y a deux cas :

- (A-B)  $\triangleright$  : les deux surfaces sont associées simultanément, avec le même décalage par rapport aux surfaces nominales.
- A $\triangleright$ -B $\triangleright$  : les deux surfaces sont associées simultanément, mais avec deux décalages indépendants.

Dans le second cas, si les indicateurs de mobilité sont identiques, il est suffisant de l'indiquer qu'une seule fois.

### 1.2.4 Translation de la surface associée tertiaire

La Figure 4 présente une pièce a recevant une pièce f. Pour compenser la variation de distance du centreur tertiaire F par rapport au centreur E, la pièce f comporte une glissière avec un coulisseau permettant de recevoir le centreur F. Il y a du jeu sur E et F.

La cotation de la pièce a comporte les spécifications suivantes :

- (1) Perpendicularité assurant la montabilité du centreur E dans la pièce f.
- (2) Perpendicularité assurant la montabilité du centreur F dans la pièce f.
- (3) Localisation (avec une tolérance large) assurant la position du centreur F par rapport à E, afin de rester dans la limite de la course du coulisseau. (Cette exigence pourrait être déjà assurée par un tolérancement général).

- (4) indication d'un plan d'annotation P, défini dans le modèle nominal, perpendiculairement à la direction du coulisseau de la pièce f.
- (5) Localisation des 4 trous par rapport au système de référence D|E|F.

Pour la localisation (5), le modèle nominal est associé au plan réel D avec le critère minimax.

Le modèle nominal peut glisser sur ce plan (une rotation et deux translations) avec deux contraintes :

- Le cylindre réel E doit se trouver dans la zone de tolérance  $\varnothing 30$ , centrée du l'axe nominal D.
- Le cylindre réel F doit se trouver dans la zone de tolérance  $\varnothing 8$ , dont l'arbre se situe à une distance  $\delta$  dans la direction  $\vec{p}$ , par rapport à l'axe nominal F.

La mobilité résiduelle permis par le flottement et le déplacement  $\delta$  suivant la direction  $\vec{p}$ , permet de placer si possible, les 4 alésages réels dans les 4 zones de tolérance  $\varnothing 6,2$ .

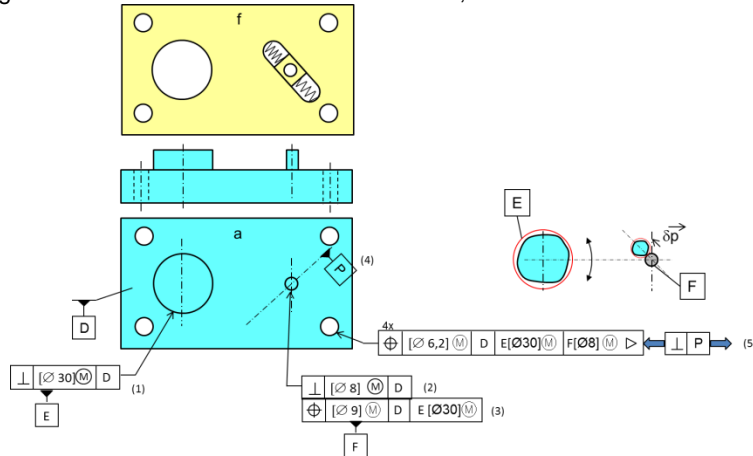


Figure 4 - Direction imposée par la mobilité de la pièce complémentaire

NOTE : Cet exemple montre que la direction de mobilité n'est pas liée à la contrainte de distance entre les deux cylindres.

### 1.2.5 Translation d'une surface associée quelconque

La Figure 5a présente un arbre indexé en rotation par un poussoir avec un patin de forme complexe. La mobilité du poussoir compense les défauts de position de la surface sur l'arbre selon la direction de la glissière du poussoir.

Le modèle nominal de l'arbre comporte un plan P qui est nominalelement perpendiculaire à la direction de la glissière (Figure 5b). Pour la localisation (2), le cylindre A laisse une mobilité en rotation autour de l'axe. La référence secondaire B du modèle nominal doit être associée à la surface réelle B avec un décalage  $\delta$  à calculer pour minimiser le critère minimax. La direction de translation  $\vec{p}$  qui est définie par l'indicateur de mobilité est perpendiculaire au plan P.

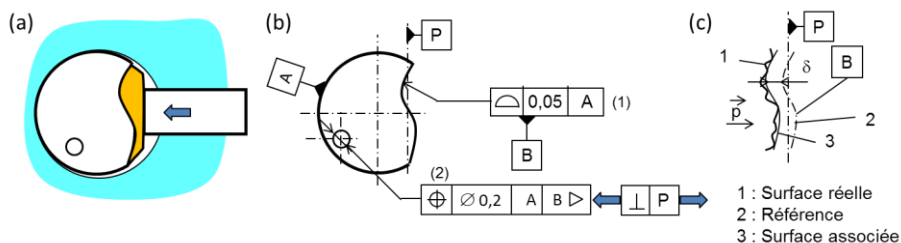


Figure 5 - Référence complexe décalée selon l'indicateur de décalage

### 1.2.6 Rotation d'une surface associée quelconque

La Figure 6 comporte un système de référence A|B|C. La liaison C est réalisée par une surface complexe fixée sur une liaison pivot d'axe D perpendiculaire à A.

- La perpendicularité (1) assure la montabilité de la secondaire.
- Le défaut de position (2) assure la montabilité de la liaison secondaire, sans imposer de distance par rapport à la secondaire B.
- La localisation (3) porte sur l'axe conventionnel de la surface C (lieu des axes des tronçons) qui doit respecter une position par rapport à A|B.
- Dans la localisation (4), le modèle nominal est associé à A et à B. Il est orienté autour de B de sorte que l'axe D associé à la surface C soit à 80mm de B. (L'angle  $\varphi$  peut être choisi pour orienter la surface

associée afin de minimiser la somme des écarts aux carrés entre la surface réelle C et la surface associée.

- Le défaut de position (5) limite de défaut d'orientation de la surface C autour de D.

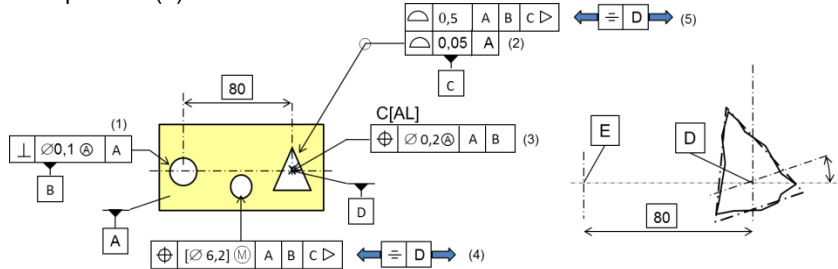


Figure 6 - Décalage d'une référence par rotation

### 1.3 Auto-centrage dans une référence commune

#### 1.3.1 Contexte d'emploi

Dans certains mécanismes, une référence est assurée par plusieurs entités en parallèles. Le mécanisme est hyperstatique. Par défaut, l'assemblage est considéré comme rigide. Les références sont directement associées aux surfaces réelles. Les jeux peuvent compenser l'hyperstatisme.

Si les jeux ne sont pas suffisants, la déformation de l'une des pièces ou une cinématique particulière peut permettre de compenser les écarts de position.

- La Figure 7a représente un assemblage dans lequel une des pièces peut se déformer pour compenser les écarts d'entraxes entre les deux alésages.
- La Figure 7b représente l'assemblage d'une surface sur une autre surface. La flexibilité d'une des pièces compense les écarts de forme en assurant le contact sur le fond.
- Dans la Figure 7c, l'écart d'entraxe entre les trous taraudés et les cônes est compensé par la position axiale des vis, puis par la déformation des vis.

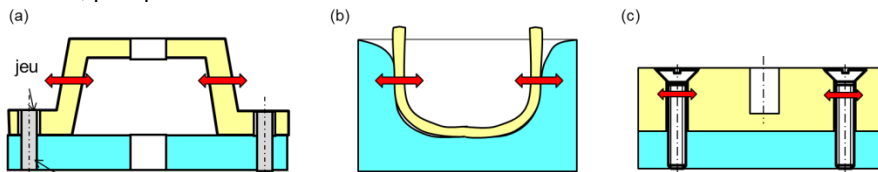


Figure 7 - Autocentrage dans une référence commune

NOTE 1 : le modificateur [DV] considère que la liaison est auto-centrante. Les déformations doivent être symétriques.

#### 1.3.2 Distance variable [DV] dans une référence commune

Définition : Le modificateur [DV] « distance variable » est applicable à l'intérieur d'une référence composée de plusieurs surfaces parfaitement symétriques par rapport à un plan clairement identifié.

**REGLE :** Les écarts des points de l'élément de référence à la surface nominale de chaque côté du plan de symétrie sont compensés d'un écart  $\delta$  identique pour tous les points dans la direction normale au plan de symétrie.

Dans la symétrie de la Figure 8, la référence commune C-D est constituée de deux alésages symétriques par rapport à un plan de normale  $\vec{p}$ . La pièce est suffisamment fine pour être considérée comme déformable avec une déformation symétrique.

Les deux alésages sont associés en admettant respectivement un décalage dans la direction  $\vec{p}$  de  $\delta$  pour l'alésage de gauche et de  $-\delta$  pour l'alésage de droite. La variable  $\delta$  est à calculer par le critère d'association des moindres carrés avec offset. Le modèle nominal est ainsi centré entre les deux alésages.

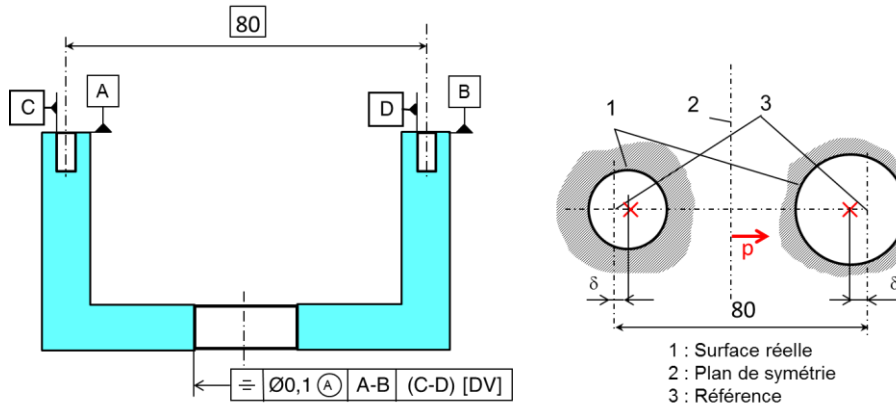


Figure 8 - Référence à distance variable

NOTE : Le modificateur [DV] peut être appliqué pour tous les types d'entités qui définissent un plan de symétrie pour positionner l'origine.

Dans la Figure 9, comme les 3 axes sont indépendants, il existe une multitude de façons de positionner le modèle nominal en déplaçant les éléments associés. Le positionnement ne peut pas être donné par défaut car il dépend des mobilités ou des directions de déformations des pièces de l'assemblage.

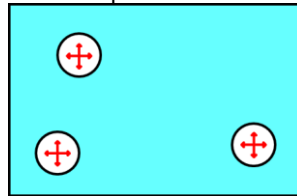


Figure 9 - Emploi impossible du modificateur [DV] par défaut

### 1.3.3 Distance variable [DV] dans une référence simple fractionnée

La Figure 10 comporte une localisation (2) avec une référence A [DV]. La surface A est prismatique et symétrique par rapport à un plan de normale  $\vec{p}$ . Les flancs sont suffisamment fins pour être considérés comme déformables avec une déformation symétrique.

La surface A est fractionnée en 2 parties de chaque côté du plan de symétrie. La surface réelle est associée à la surface nominale en admettant respectivement un décalage dans la direction normale  $\vec{p}$  de  $\delta$  pour un côté et de  $-\delta$  pour l'autre côté. La variable  $\delta$  doit être calculée lors de l'association par les moindres carrés. Le modèle nominal est ainsi centré entre les deux flancs de la surface réelle A tous en assurant un contact au fond de la poche.

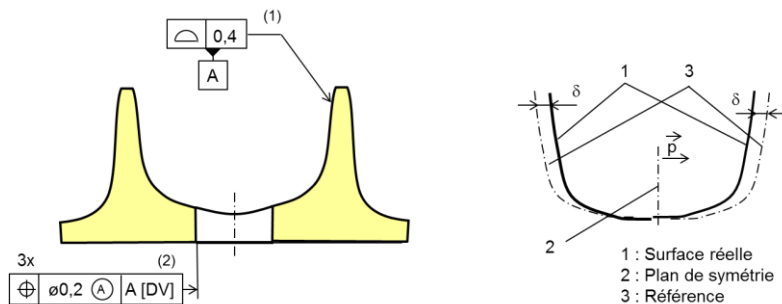


Figure 10 - Modificateur [DV] sur une surface symétrique

### 1.3.4 Distance variable obtenue par décalage des surfaces associées

La Figure 10a correspond à l'assemblage Figure 7c. Le centrage est assuré par des vis à tête fraisée. La profondeur du fraisurage n'a aucune influence sur la qualité du centrage. Les écarts d'entraxes sont compensés dans un premier temps par un enfoncement partiel des vis jusqu'au contact, puis par la déformation des vis.

- La planéité (1) assure le bon contact de la pièce sur son support
- La spécification de position (2) assure la forme du fraisurage et son altitude par rapport à A.
- La localisation (3) de l'axe des cônes assurent la position des axes des fraisurages, pour permettre l'assemblage des vis dans les taraudages.

- La coaxialité (4) du cylindre par rapport au cône. La surface associée au cône est décalée par rapport à la surface nominale dans la direction perpendiculaire à A. Le critère d'association est les moindres carrés. Cette spécification est dupliquée deux fois.
- La localisation (5) de l'alésage central est définie par rapport au modèle nominal associé à A, puis, en une seule opération, aux cônes réels : les surfaces associées aux cônes sont décalés indépendamment dans la direction perpendiculaire à A ( $\delta_1 \neq \delta_2$ ) (Figure 10b). Le critère d'association est les moindres carrés

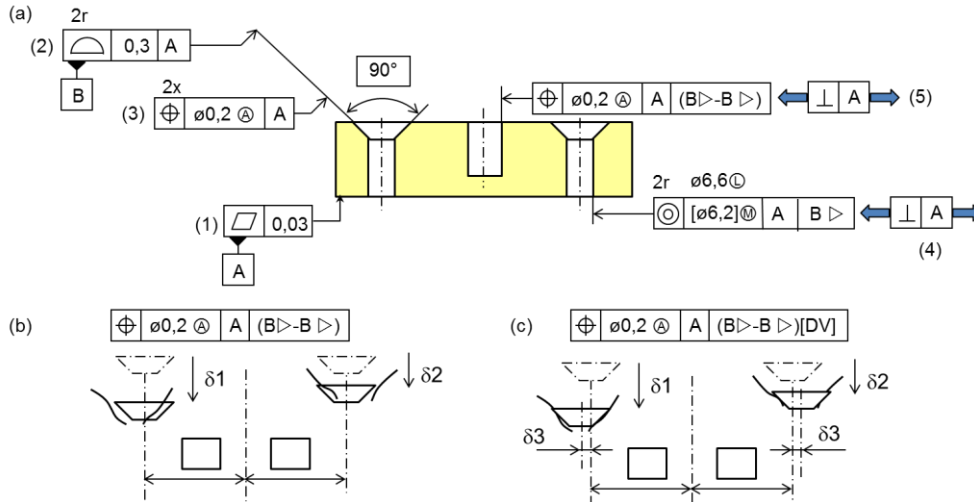


Figure 11 – Autocentrage par décalage des surfaces associées

NOTE 1 : dans ce cas, l'indicateur de direction de la translation est facultatif, car la référence primaire est un plan. Seule une translation perpendiculaire à ce plan est possible. Le symbole  $\triangleright$  a son sens par défaut.

NOTE 2 : la spécification (5) est applicable avec un nombre quelconque de vis. S'il n'y a que deux vis, il est possible d'ajouter le modificateur [DV] (Figure 10c). Dans ce cas, l'association se fait avec un troisième décalage  $\delta_3$  identique et de sens contraire pour chaque cône associé. Ce décalage  $\delta_3$  correspond à la déformation latérale de la vis pour s'adapter au cône réel.

## 1.4 Zone partielle mobile

### 1.4.1 Principe des zones partielles mobile

Les zones partielles mobiles représentent des contacts déformables ou auto-centrants.

L'indicateur de zone partielle mobile est similaire à un indicateur de zone partiel. Il est complété par deux lignes tangentes en trait fin continu à partir du cercle du cadre de zone partielle vers le segment médian (Figure 12).

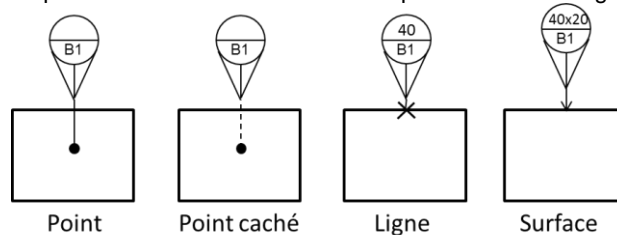


Figure 12 - Indication de zone partielle mobile visible, cachée et sur le côté

New

**REGLÉ :** Dans une référence, les zones partielles mobiles identifiées par la même lettre sont associées aux surfaces nominales avec un offset identique pour toutes les zones partielles mobiles portant la même lettre.

### 1.4.2 Référence avec zones partielles mobiles

La Figure 13 montre un carter en appui sur le plan A. Le centrage est assuré par quatre zones partielles surfaciques B1 à B4. Les deux appuis B1 et B2 sont sur des zones rigides. Les deux appuis B3 et B4 sont assurés par deux lames souples. La souplesse des lames compense l'hyperstatisme et assure le centrage de la pièce.

Le plan A et les 4 zones B1 à B4 doivent être identifiés directement sur la pièce réelle. Les zones partielles B3 et B4 ont été définies par des zones mobiles avec la même lettre. Elles sont synchrones.

Le système de références doit être construit séquentiellement.

La référence primaire A est un plan associé avec le critère minimax.

La référence secondaire B est la surface nominale correspondant au contour complet. Elle est associée avec les critères suivants :

- Les écarts en B1 et B2 sont déterminés par rapport à la surface nominale.
- Les écarts en B3 et B4 sont déterminés par rapport à une surface offset de la surface nominale, avec un offset  $\delta$ .

La valeur de  $\delta$  doit être calculée pour minimiser le critère d'association qui est ici le critère des moindres carrés.

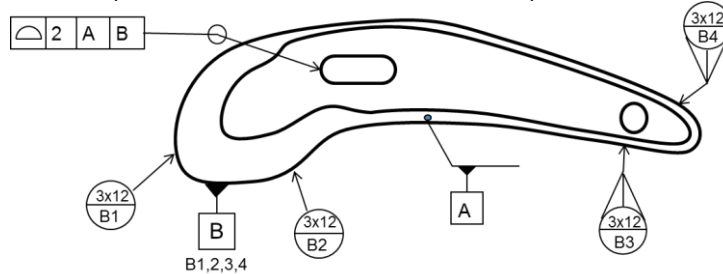


Figure 13 - Références avec des zones mobiles ponctuelles

NOTE : Après optimisation la valeur de  $\delta$  correspond à la déformation identique des deux lames B3 et B4 pour assurer le centrage de la pièce.

### 1.4.3 Mobilité équivalente à une variation de rayon

L'emploi des zones partielles mobiles est souvent inutile, car la mobilité est souvent déjà prise en compte par les critères classiques.

Dans la Figure 14a, la référence est un cylindre de diamètre nominal, associé par la méthode des moindres carrés avec offset.

Dans la Figure 14b, la référence est un cylindre de diamètre nominal, associé par la méthode des moindres carrés avec offset. De plus, l'emploi de zones partielles mobiles impose d'associer la surface nominale avec un offset identique pour chaque appui. Cet emploi des références partielles mobiles est donc complètement redondant avec l'offset sur le cylindre nominal.

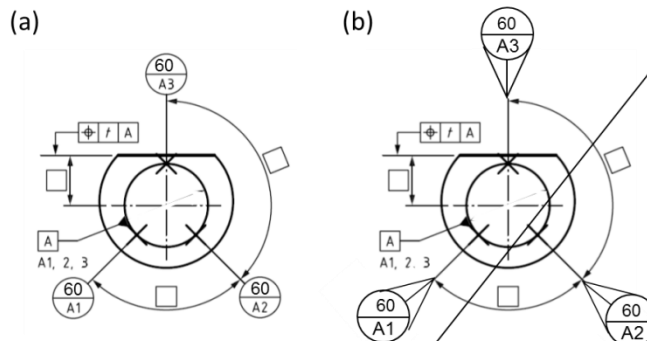


Figure 14 - Références avec des zones mobiles concentriques

## 1.5 Déplacement du nominal par rapport au système de références

### 1.5.1 Contexte d'emploi

Certains mécanismes possèdent des réglages en translation et/ou en orientation permettant de déplacer la pièce de sorte qu'une surface particulière F de la pièce soit dans une position ou une orientation donnée par rapport au mécanisme.

Sur la pièce spécifiée, la surface spécifiée est S. La surface positionnée ou orientée par le réglage est F. Le système de références est A|B ou A|B|C.

- La Figure 15a comporte un dispositif de translation dans la direction perpendiculaire à P pour placer la surface F à une distance donnée d'une autre surface.
- La Figure 15b comporte un dispositif de réglage en orientation autour d'une liaison pivot D pour placer la surface F parallèlement à une autre surface.
- Dans la Figure 15c, le système de références de mise en position est incomplet. La mobilité en rotation doit être exploitée pour orienter la surface F en même temps que le réglage en translation (si la rotation est effectuée avant, il faut inclure la surface F dans le système de références).



Ces exemples montrent que les réglages ne sont pas appliqués de manière isolée aux surfaces du système de références, mais déplacent globalement la pièce et le modèle nominal.  
 Les cas (b) montrent qu'il peut y avoir du jeu dans la liaison. Suivant le cas, les vis peuvent bloquer le flottement avant de faire le réglage (jeu défavorable) ou après le réglage (jeu favorable au réglage).  
 Ces cas montrent également que la position des zones partielles sont définies dans le système de références A|B|C et ne sont pas indépendantes du déplacement de la pièce.

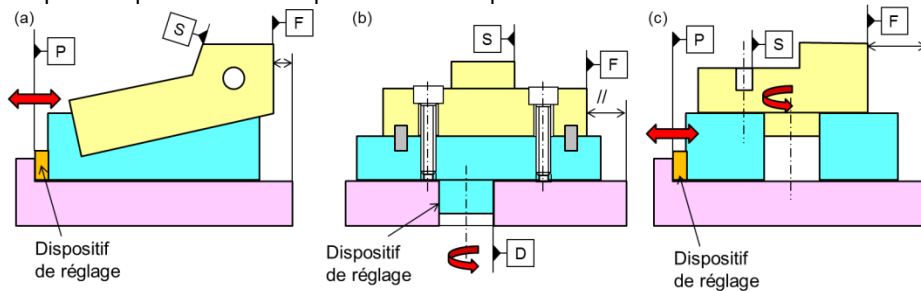


Figure 15 – Exemple de dispositif de réglage

NOTE 1 : Cette procédure est fréquente pour la fabrication sur machines-outils à commande numérique :

- Le repère programme est translaté en fonction d'une mesure sur la surface F.
- Le plateau tournant est orienté par une opération de dégauchissage sur la surface F.

Cette cotation est donc bien adaptée à la rédaction des dessins de phase.

Le principe de cotation consiste à définir le système de références sur les surfaces de mise en position de la pièce, puis les opérations à appliquer pour déplacer le modèle nominal pour associer le modèle nominal à la surface F. Les zones de tolérance sont alors définies par rapport à ce nominal déplacé. Les éventuelles mobilités résiduelles ou les flottements résiduels disponibles peuvent être utilisés pour placer si possible la surface tolérancée dans la zone de tolérance.

NOTE 2 : certaines mobilités peuvent aussi être laissées avec des éléments de situation.

### 1.5.2 Principe de l'indicateur de translation ><

New

Définition : Pour une spécification, le modèle nominal est associé aux surfaces réelles du système de références. Un indicateur de translation du modèle permet ensuite de translater le modèle pour l'associer à une nouvelle surface de la pièce.

L'indicateur de translation décrit la direction de translation et la surface réelle F à associer.

- La direction peut être un vecteur parallèle à une droite D ou perpendiculaire à un plan P (Figure 16a).
- La direction peut être tous les vecteurs parallèles à un plan P ou perpendiculaires à une droite D (Figure 16b).
- La direction peut être quelconque dans les 3 directions (Figure 16c).

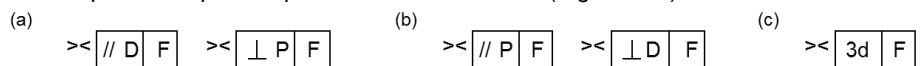


Figure 16 - Indicateur de translation du nominal avec surface associée

Les mobilités résiduelles éventuelles du système de références sont utilisées simultanément à la translation du modèle pour orienter ou positionner au mieux le modèle nominal. La direction de la translation est alors décrite dans ce modèle nominal pour associer le modèle nominal à la surface F

Les mobilités résiduelles non bloquées après la translation restent disponibles pour place si possible la surface tolérancée dans la zone de tolérance.

Lorsque le système de références A|B|C comporte des modificateurs ⊙, le jeu est défavorable. La spécification doit être respectée quelle que soit la position permise par le flottement. La translation doit être calculée pour chaque position du système de références.

Lorsque le système de références A|B|C comporte des modificateurs ⊗, le jeu est favorable. Le flottement peut être utilisé pour placer si possible la surface tolérancée dans la zone de tolérance.

Plusieurs translations dans des directions différentes peuvent être imposées successivement pour associer le modèle nominal à des surfaces différentes. L'ordre des opérations de déplacement est défini de gauche à droite par l'ordre des indicateurs de translation.

La surface F peut être définie à l'aide de zones partielles ou d'un élément de situation, voire d'une zone partielle ponctuelle pour imposer le passage du modèle nominal par un point.

NOTE : cette indication généralise le modificateur >> « orientation seulement » défini dans la norme ISO5459 qui consiste à contraindre le modèle uniquement en orientation par rapport à une référence.

### 1.5.3 Exemple de translation du modèle sur un plan

La Figure 17a correspond au mécanisme décrit Figure 15a.

Le système de références A|B permet de positionner le modèle nominal. Dans ce modèle, le plan P est parfaitement défini. La translation est décrite par un vecteur  $\vec{p}$  normal à ce plan. Le modèle nominal est translaté de  $\delta$  dans la direction  $\vec{p}$ , pour associer la surface nominale F à la surface réelle F par le critère minimax.

La surface réelle S doit se trouver dans une zone de tolérance de 0,05 centrée sur la surface nominale S après déplacement du modèle.

L'axe réel du trou T doit se trouver dans une zone de tolérance de  $\varnothing 0,2$  centrée sur l'axe nominal T après déplacement du modèle.

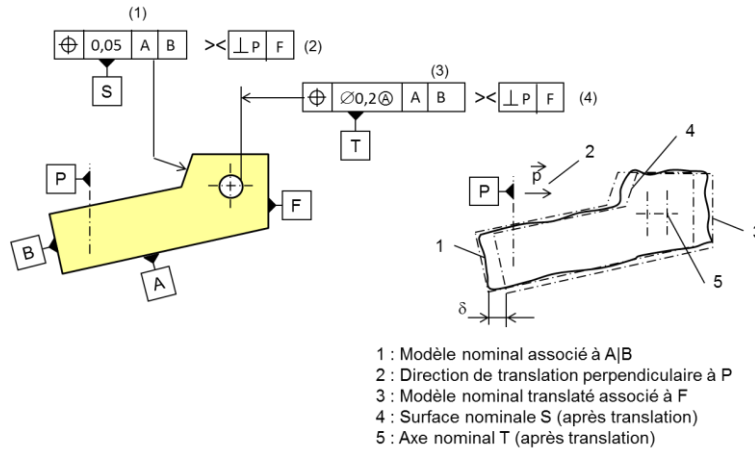


Figure 17 - Translation modèle nominal selon une direction perpendiculaire à un plan

### 1.5.4 Principe de l'indicateur de rotation ) (

New

Définition : Pour une spécification, le modèle nominal est associé aux surfaces réelles du système de références. Un indicateur de rotation du modèle permet ensuite d'orienter le modèle autour d'un axe pour l'associer à un plan, une droite ou un élément de situation de type plan ou droite associé à une surface indépendamment des autres surfaces.

NOTE : le plan ne peut pas être perpendiculaire à l'axe. La droite ne peut pas être parallèle à l'axe.

L'indicateur de rotation décrit l'axe de rotation et la surface réelle à associer.

Dans la Figure 18, l'indicateur précise que l'axe de rotation passe par le droite D.

Figure 18a : le modèle nominal est orienté par un cylindre G. La normale commune à l'axe D et à l'axe de G doit être parallèle à la normale commune à l'axe D et à l'axe associé par les moindres carrés à la surface réelle G.

Figure 18b : le modèle nominal est orienté par un plan F. La normale au plan nominal F, la normale au plan associé par les moindres carrés à la surface réelle F et le vecteur de l'axe D doivent être coplanaires..

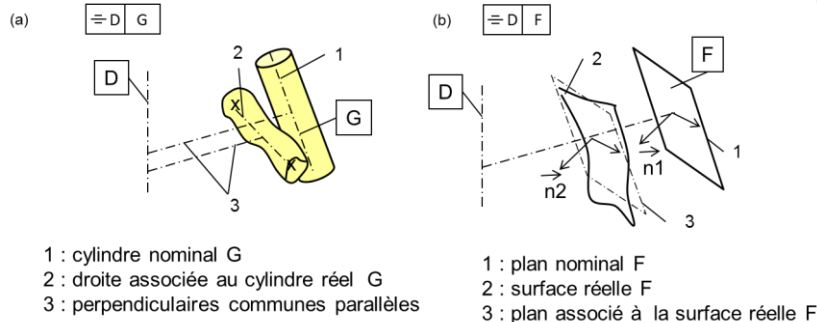


Figure 18 - Indicateur de translation du nominal avec surface associée

NOTE 1 : Avec la même règle, l'orientation peut être assurée par un élément de situation de type droite ou plan.

NOTE 2 : l'orientation du modèle nominal avec deux ou trois rotations n'est pas nécessaire. Il est préférable de changer le système de références.

NOTE 3 : le critère d'association n'est pas défini par une optimisation type minimax ou moindres carrés, pour permettre la gestion des flottements dans les systèmes de références.

### 1.5.5 Exemple de translation du modèle sur un plan

La Figure 19 correspond au mécanisme décrit Figure 15b.

Le système de références A|B permet de positionner le modèle nominal. Dans ce modèle, la droite D est parfaitement définie. Le modèle nominal est orienté à l'aide du plan F.

La surface réelle S doit se trouver dans une zone de tolérance de 0,2 centrée sur la surface nominale S après déplacement du modèle.

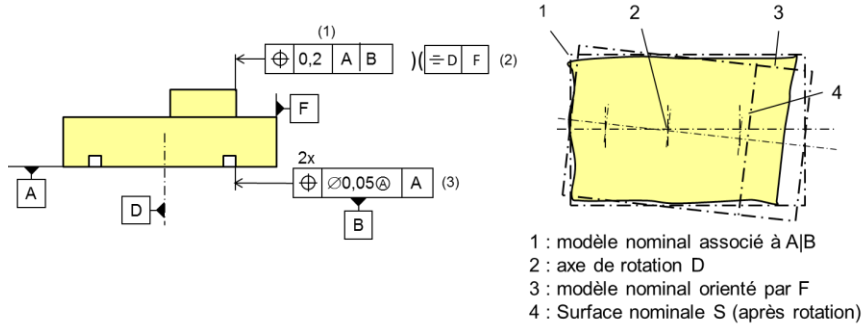


Figure 19 - Orientation du modèle nominal par un plan

### 1.5.6 Combinaison de déplacements

Il est possible d'effectuer plusieurs déplacements successifs, dans l'ordre des indicateurs. Certains déplacements peuvent modifier les réglages effectués précédemment.

Dans certains cas, il est préférable de regrouper deux translations en une translation dans un plan.

### 1.5.7 Modificateur M ou C sur le système de références

La maîtrise du jeu dans le système de références impose de définir un gabarit de contrôle physique ou numérique) avec la mobilité supplémentaire décrite par l'indicateur de déplacement. Le réglage dépend de la position permise par le flottement.

## 2. Référence sur des lignes

### 2.1 Référence primaire sur deux sections

La Figure 20a représente une référence primaire A constituée avec deux zones partielles linéiques circulaires appartenant à deux cylindres coaxiaux de diamètres différents. Les points sont palpés au voisinage des deux sections (Figure 20b).

Le modèle nominal constitué par les deux cylindres nominaux coaxiaux est associé en une seule opération par les moindres carrés avec deux offsets  $\delta_1$  et  $\delta_2$  différents aux points identifiés au voisinage des deux lignes. Les valeurs de  $\delta_1$  et  $\delta_2$  doivent être calculées pour minimiser la somme S des carrés des écarts.

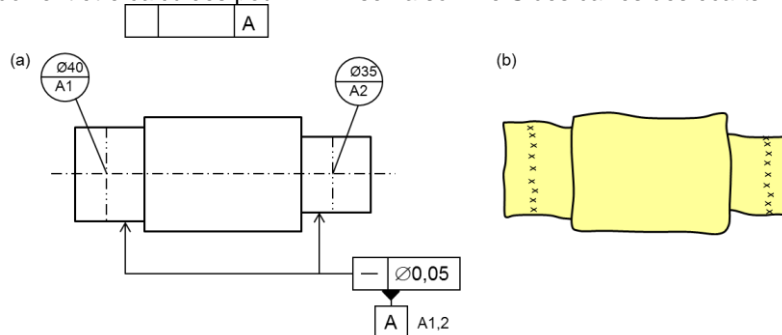


Figure 20 - Référence primaire sur deux sections

NOTE : Cette définition serait identique pour des zones partielles A1 et A2 surfaciques et de faibles largeurs.

### 2.2 Référence secondaire sur une ligne

La Figure 21a représente un système de référence A | B dans lequel A et B sont des plans, B1 est une zone partielle linéique.

Le modèle nominal est associé à l'élément de référence primaire A par le critère minimax puis à l'élément de référence secondaire B par le critère minimax.

NOTE : L'orientation du plan de référence secondaire autour de la ligne est naturellement imposée par le plan primaire. Les points de la zone B1 sont identifiés au voisinage de la ligne secondaire (Figure 21b).

La Figure 21c représente un système de référence A | B dans lequel A est un plan, B un cylindre. B1 est une zone partielle linéique circulaire.

Le modèle nominal est associé à l'élément de référence primaire par le critère minimax puis à l'élément de référence secondaire par le critère des moindres carrés avec offset.

NOTE : L'orientation du cylindre de référence secondaire est naturellement imposée par le plan primaire. Les points de la zone B1 sont identifiés au voisinage de la ligne circulaire secondaire (Figure 21d).

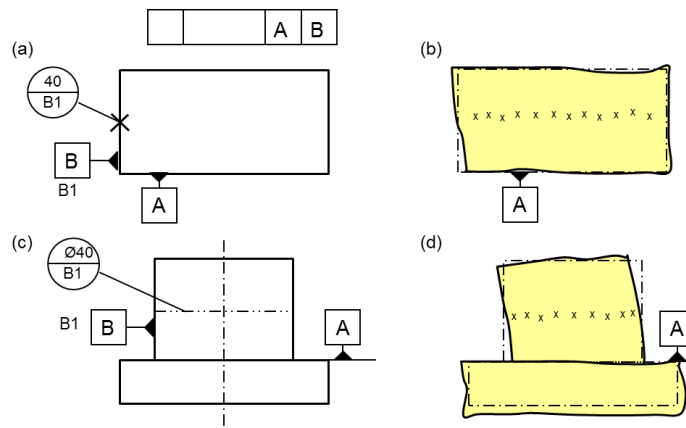


Figure 21 - Référence secondaire sur une ligne

NOTE : la définition serait identique pour une zone partielle B1 surfacique de faible largeur.

## 2.3 Référence primaire sur une ligne

### 2.3.1 Préambule

Les références partielles doivent permettre de bloquer tous les degrés nécessaires pour associer la surface nominale complète aux zones partielles.

Généralement, il n'est donc pas possible d'associer par exemple un cylindre à une seule section d'un cylindre réel ou à une seule génératrice. Il n'est pas possible d'associer un plan avec une seule référence partielle linéique.

Par contre, certaines spécifications peuvent admettre une référence sur une ligne appartenant à une surface, par exemple pour étudier la coaxialité d'une section par rapport à une autre section coplanaire. Dans ce cas, il est admissible de définir une référence par un processus dégradé qui génère inévitablement une forte incertitude sur la référence, à condition que cette incertitude ait une influence négligeable sur l'évaluation de la spécification.

### 2.3.2 Section perpendiculaire à l'axe

La buse Figure 22 nécessite une bonne coaxialité des deux sections intérieures notées A1 et B1 appartenant à deux surfaces de révolution nominalement coaxiales.

Les deux zones partielles linéiques nominales A1 et B1 sont définies dans une section à 15 mm d'une face. La référence A est un cône d'angle nominal identifié par la zone partielle A1.

La spécification de concentricité porte sur le centre de la section définie par la zone partielle B1 appartenant à la surface de révolution.

NOTE : cette spécification de concentricité n'est possible que parce que l'élément spécifié et l'élément de référence sont définis dans le même plan. Les incertitudes sur les orientations des axes ont un effet négligeable sur l'évaluation de la coaxialité.

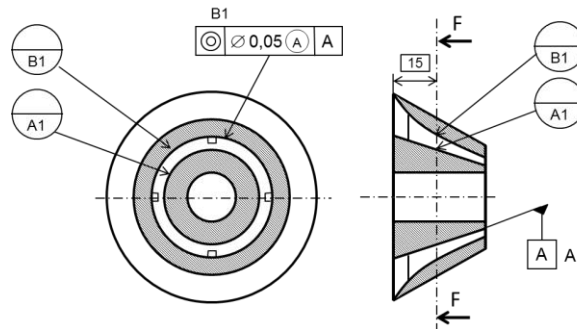


Figure 22 - Référence dans une section

La zone partielle A1 n'est pas suffisante à elle seule pour définir l'axe du cône en tant que référence primaire. Pour pallier à cette lacune, la méthode se déroule en deux étapes :

- Etape 1 : (Figure 23a) Identification d'un cône approché en sélectionnant toute l'étendue de la surface conique et association d'un cône d'angle nominal par la méthode des moindres carrés. Cette association donne l'axe du cône noté  $\Delta$ .
- Etape 2 : (Figure 23b) La référence A est le cône nominal obtenue par une translation du cône approché dans un plan perpendiculaire à l'axe  $\Delta$ . Elle est associée par la méthode des moindres carrés avec offset aux points identifiés au voisinage de la zone partielle linéique A1.

Pour la concentricité, la zone de tolérance est une zone cylindrique de diamètre 0,05 centrée sur l'axe de A.

De la même façon, pour établir le centre de la section B1, il faut procéder en deux étapes :

- Etape 1 : (Figure 23c) identification de la surface de révolution en sélectionnant toute l'étendue de la surface et association de la surface nominale par la méthode des moindres carrés. Cette association donne l'axe de la surface noté  $\Delta'$ .
- Etape 2 : L'axe spécifié de B1 est l'axe de la surface nominale obtenue par translation de la surface approchée dans un plan perpendiculaire à l'axe  $\Delta'$ . Elle est associée par la méthode des moindres carrés avec offset aux points identifiés au voisinage de la zone partielle linéique B1.

Le centre de la section de B1 est le point d'intersection de l'axe de cette surface de révolution avec le plan de la section. Ce centre doit être dans la zone de tolérance.

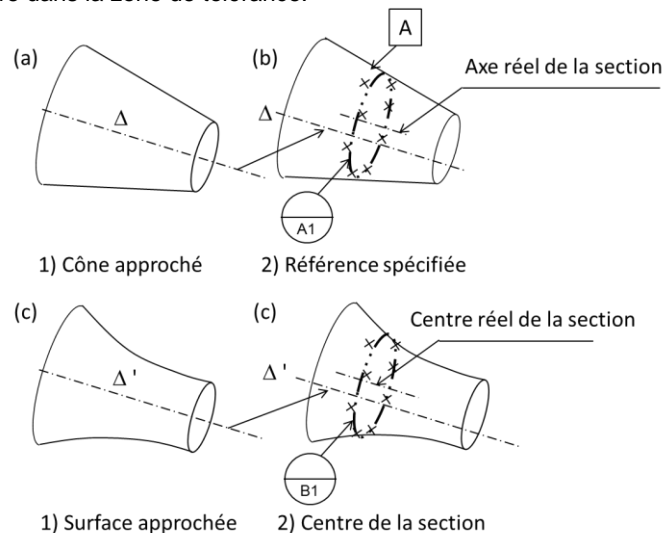


Figure 23 - Référence dans une section et centre d'une section

NOTE : Cette méthode permet de s'affranchir de toutes les difficultés de prélèvement des points rigoureusement dans la section, de projection des points sur cette section et de calcul de l'écart des points selon une direction normale à la surface. De plus, cette méthode réutilise l'association d'un cône ou d'une surface complexe et ne nécessite pas d'algorithme spécifique pour des sections.

### 2.3.3 Référence dans toutes les sections perpendiculaires à l'axe

La Figure 24a est une variante de la Figure 23 dans laquelle la section se déplace. La zone partielle A1 est glissante entre les plans P et Q. De plus la zone partielle A2 sur la surface spécifiée porte la même lettre. Elle est donc solidaire de A1, ce qui signifie que la distance relative des sections est constante.

Cette écriture est donc identique à la Figure 23 avec un plan de section qui se déplace entre les plans P et Q. La spécification doit être respectée pour toutes les positions.

La Figure 24b est similaire, mais avec des sections circulaires passant par des points.

Le point P glisse en Q en parcourant une distance  $d_1$ . Le point R glisse en S en parcourant une distance curviligne  $d_2$ .

Les deux zones partielles glissent sur leurs surfaces respectives selon une loi paramétrée par  $t$  variant de 0 à 1.

L'abscisse curviligne de la ligne circulaire de la section A1 par rapport à P est  $t.d_1$

L'abscisse curviligne de la ligne circulaire de la section A2 par rapport à R est  $t.d_2$

Si P et R sont dans le même plan d'intersection passant par l'axe commun et si Q et S sont dans le même plan d'intersection passant par l'axe commun, les deux sections sont synchrones, mais pas tout à fait dans le même plan d'intersection car la génératrice RS est une courbe tandis que la génératrice PQ est une droite. Les sections ne sont donc pas parfaitement coplanaires, mais l'influence sur l'évaluation de la coaxialité est négligeable.

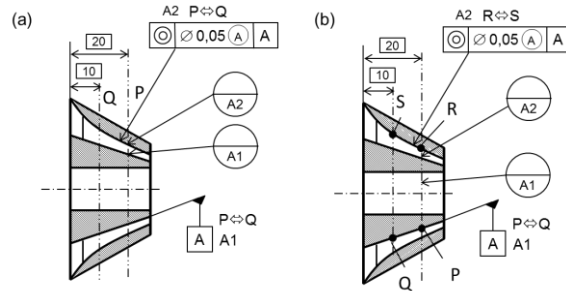


Figure 24 - Références dans toutes les sections

NOTE 1 : L'écriture Figure 24a formalise l'indication ACS de la norme ISO 1101 en la généralisant à des sections quelconques.

### 2.3.4 Référence sur une génératrice

La Figure 25a représente une référence A définie sur un cylindre avec une zone partielle linéique A1.

Cette ligne A1 n'est pas suffisante pour définir complètement le cylindre. La méthode se déroule en deux étapes Figure 25b :

- Etape 1 : Cette référence A est utilisée dans un système de références A|B. Le modèle nominal est donc associé avec le cylindre primaire A complet par le critère des moindres carrés avec un rayon nominal, puis avec l'alésage secondaire B, par le critère des moindres carrés avec un rayon nominal. L'axe du cylindre A est noté  $\Delta$ . La ligne nominale A1 est connue.
- Etape 2 : La référence A est l'axe du cylindre de diamètre nominal obtenu par une translation et une rotation du cylindre approché dans un plan passant par l'axe  $\Delta$  et par la ligne nominale A1. Ce cylindre de rayon nominal est associé par les moindres aux points identifiés au voisinage de la ligne A1.

Une méthode simplifiée équivalente consiste à associer un cylindre de rayon nominal aux points identifiés au voisinage de la ligne A1 auxquels on ajoute deux points mesurés sur le côté du cylindre (Figure 25c).

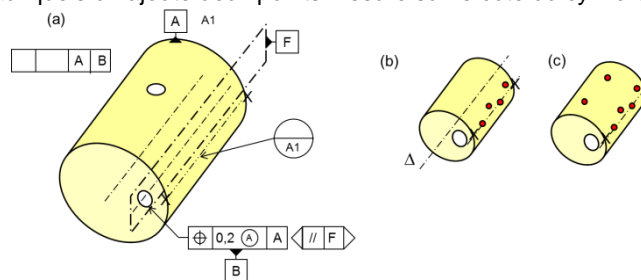


Figure 25 - Référence sur une génératrice

### 2.3.5 Référence sur une arête

Il est très difficile de définir directement une référence sur une arête, même en référence secondaire en raison de la difficulté d'identifier des points et de déterminer l'écart par rapport au nominal.

La référence peut éventuellement être définie avec un élément de contact.

Généralement, la référence est définie à l'aide de deux zones partielles définies sur les surfaces adjacentes à l'arête.

## 3. Référence sur surface associée

### 3.1 Références sur surface associée par $\textcircled{C}$

L'assemblage Figure 26a comporte deux coussinets serrés dans le bâti. La localisation (1) assure la montabilité du bâti sur ses glissières. La localisation (2) positionne l'alésage C par rapport au guidage.

Les coussinets sont définis avec une référence E sur le cylindre extérieur. Figure 26b. L'hypothèse est que l'axe de la référence E (axe du cylindre des moindres carrés) est confondu avec l'axe associé à l'alésage (axe du cylindre des moindres carrés).

La cotation Figure 26c s'appuie sur les axes associés aux deux cylindres (axe associé par les moindres carrés, indépendamment pour chaque cylindre).

La localisation (3) impose que les axes associés soient contenu dans deux cylindres  $\varnothing 0,04$  par rapport à la position nominale. Dans chaque coussinet, l'alésage étant de  $12,04\textcircled{M}$ , l'espace laissé libre est  $12,04 - 0,04 = 12$ . L'exigence (1) est bien respectée. Pour cette

Dans la localisation (4), les axes associés aux deux alésages B doivent être dans un cylindre  $\varnothing 0,1$ . Dans chaque coussinet, l'alésage étant de  $12,1\textcircled{L}$ , l'alésage respecte la zone de tolérance  $12,1 + 0,1 = 12,2$  quelle que soit la position du nominale telle que les axes B associés soient dans les zones de tolérance  $\varnothing 0,1$ . L'exigence (2) est bien respectée.

Pour la localisation (2), le gabarit de contrôle comporte deux cylindres  $\varnothing 12$  distants de 50. Le calibre de contrôle au minimum de matière est similaire à la pièce avec deux alésages  $\varnothing 12,2$ . Ce calibre permet de déterminer le flottement  $f_P$  pour tous les points de l'alésage C. L'alésage étant au milieu de B, le flottement est égal à la moitié jeu maxi. La pièce réelle est posée sur le gabarit de contrôle. Tout point P de l'alésage réel C doit respecter la zone de tolérance  $\varnothing 10,4\textcircled{L}$  étendue de  $f_P$  quelle que soit la position permise par le jeu entre la pièce réelle et le gabarit.

Pour la localisation (4), il faut choisir arbitrairement deux diamètre D et d. A titre d'exemple,  $D = 12,1$  qui est le diamètre au minimum de matière du coussinet et  $d = 12$ , qui est le diamètre au maximum de matière de l'ensemble assemblé. Un calibre de diamètre D monté sur un gabarit de diamètre d donne le flottement maximum est  $f_P = (D-d)/2$ . On suppose qu'un coussinet de diamètre D est monté dans chaque alésage et que cet assemblage est monté sur le gabarit avec 2 pions  $\varnothing d$ .

Tout point P de l'alésage réel C doit respecter la zone de tolérance  $\varnothing 10,4\textcircled{L}$  étendue de  $f_P$  quelle que soit la position permise par le jeu entre la pièce réelle est le gabarit.

Il est possible de diminuer de la même valeur D et d, sans changer le résultat. Il est ainsi virtuellement possible de prendre  $d=0$ , soit un cylindre  $D = 12,1 - 12 = 0,1$ . Cela revient à vérifier qu'un cylindre  $\varnothing 0,1$  centré sur l'axe associé contient l'axe nominal ou à vérifier que l'axe associé est contenu dans un cylindre  $\varnothing 0,1$  centré sur le nominal (les deux principes sont équivalents, car le déplacement maximal de l'axe est égal à  $0,1 - \text{l'écart au rayon}$ ).

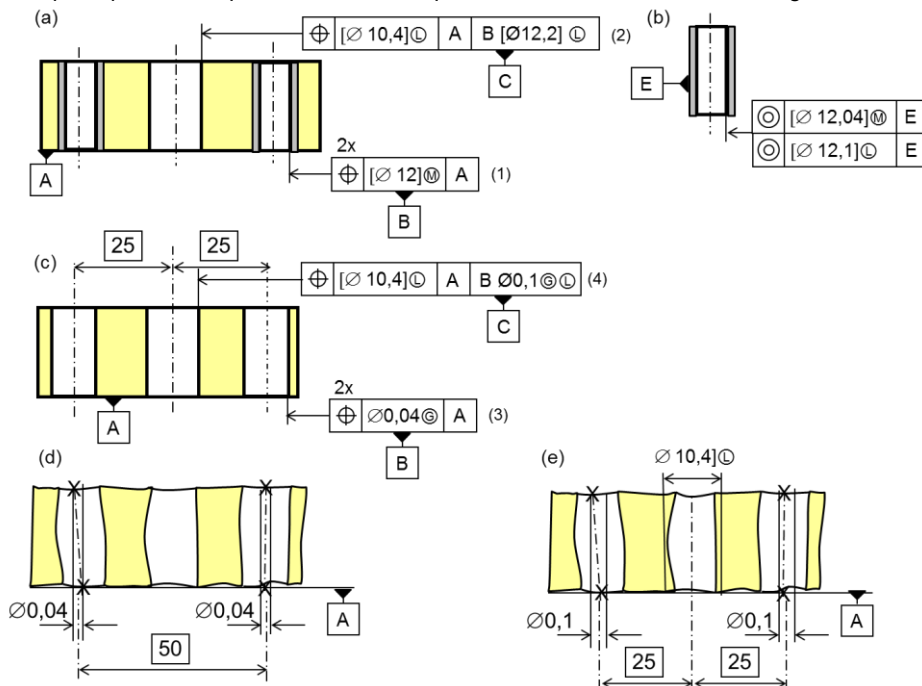


Figure 26 - Référence sur des surfaces associées

NOTE : avec cette cotation, chaque cylindre de B est associé indépendamment de A et de l'autre cylindre par les moindres carrés. L'association est indépendante des diamètres réels des alésages. Inversement, un système de référence A|B sans aucun modificateur associe simultanément deux axes perpendiculaires à A à distance nominale par les moindres carrés. Ce n'est pas équivalent et correspondrait à une liaison monobloc dans les deux pièces avec du serrage.

### 3.2 Références sur plage projetée $\text{\textcircled{P}}$

#### 3.2.1 Désignation des éléments à projeter

Généralement, la référence est simplement désignée par  $A\text{\textcircled{P}}$  ou  $\text{\textcircled{P}}\text{\textcircled{P}}$ .

A désigne l'élément spécifié à projeter.

- $\text{\textcircled{P}}$  est seul si la référence est associée par les moindres carrés aux points de l'axe ou de la surface médiane associée aux extrémités de la plage de projection.
- $\text{\textcircled{P}}$  est précédé d'une tolérance si l'axe ou la surface médiane associée doit respecter une zone de tolérance.

Si la référence constitue un groupe identifié par un compteur  $n_x$  (Figure 27a), chaque élément du groupe est projeté indépendamment des autres pour constituer l'élément de référence. Par défaut, la plage de projection est identique pour chaque élément du groupe. La définition est équivalente Figure 27b : E est une surface en plusieurs exemplaires, l'indication  $E\text{\textcircled{P}} - E\text{\textcircled{P}}$  est l'association de tous les axes des surfaces identiques à E  $\text{\textcircled{P}}$  dans les plages de projection (si la valeur de tolérance est identique pour toutes les références, elle peut être mise en commun après une parenthèse).

NOTE : cette écriture correspond bien à un ensemble de cylindres parallèles.

Si la référence est une surface composée identifiée par un compteur  $n_c$  (Figure 27c), la projection (unique) est réalisée sur l'association en une seule opération des différentes surfaces considérées comme une seule surface. La définition est équivalente Figure 27d : E est une surface en plusieurs exemplaires, l'indication  $(E-E)\text{\textcircled{P}}$  est l'association en une seule opération des différentes surfaces considérées comme une seule surface. L'axe associé est projeté dans la plage  $\text{\textcircled{P}}$ .

NOTE : cette écriture correspond bien à un ensemble de cylindres coaxiaux.

Si A et B désignent deux surfaces à projeter respectivement dans les zones P1 et P2, la référence est  $A\text{\textcircled{P1}} - B\text{\textcircled{P2}}$  (Figure 27e).

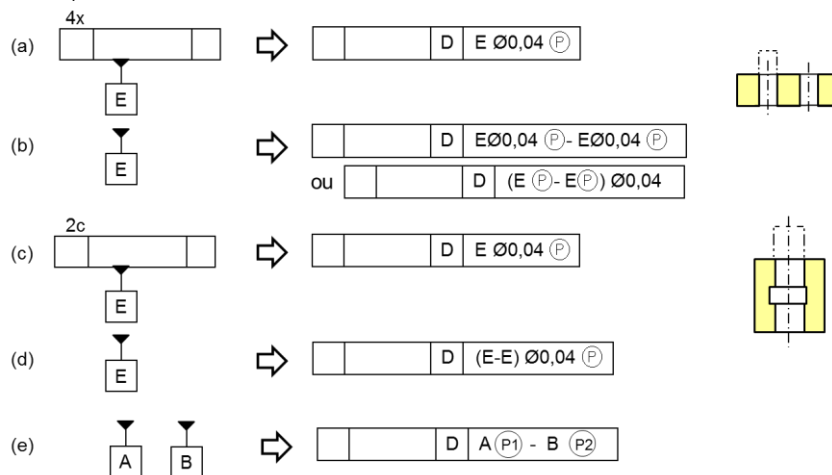


Figure 27 - Eléments de référence à projeter

#### 3.2.2 Référence avec tolérance sur la plage de projection (jeu favorable)

La Figure 28 comporte une mise en position avec un plan primaire A et deux pions serrés dans la référence B. L'alésage central est destiné à laisser passer une vis de fixation serrée dans la pièce d'appui. Le jeu entre les pions et les alésages appartenant à la pièce d'appui sont supposés favorable pour la montabilité de la vis.

La référence B comporte une zone de tolérance en plage projetée sous la forme  $B \text{\textcircled{P}} \text{\textcircled{P}}$  (spécification 2 Figure 28). Elle se comporte avec un flottement  $\text{\textcircled{P}}$ . L'axe de l'alésage doit se trouver dans une zone de



tolérance  $\varnothing 0,04$ , exactement comme une référence au maximum de matière pour laquelle le cylindre réel doit se trouver dans une zone de tolérance au maxi matière. La différence est que le diamètre du pion est inconnu.

Pour la chaîne de cotes, il faut considérer le diamètre maxi du pion, ce qui revient à considérer la localisation (3).

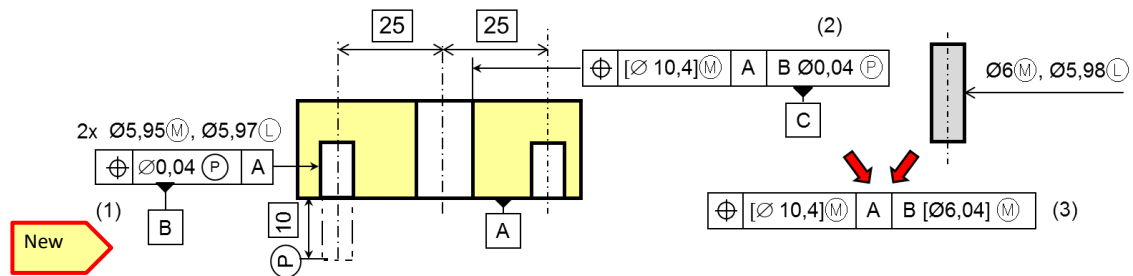


Figure 28 - Référence sur une plage projetée avec jeu favorable

La localisation (1) (Figure 28) impose que les axes des alésages soient simultanément dans 2 cylindres de diamètre  $t = 0,04$ , centrés sur les axes nominaux (Figure 29a).

La localisation (2) (Figure 28) comporte une référence secondaire B  $\varnothing 0,04$  (P). Les jeux entre les pions montés dans B et la pièce d'appui sont supposés favorables à l'assemblage de la vis centrale. 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  $D_{\text{maxi}} = 6\text{mm}$ , le cylindre au maxi matière de diamètre  $D_{\text{maxi}} + 0,04 = 6,04$  doit être hors matière (Figure 29b). Cette exigence est donc équivalente à la spécification (3) (Figure 28). Si les alésages B sont bien localisés, il y aura un flottement sur la référence qui peut permettre de compenser un défaut de position de l'alésage C. Pour cette localisation (2), ceci revient à imposer que les deux axes des alésages B soient dans les deux cylindres  $\varnothing 0,04$  :

- Élément toléré : Cylindre central C (tous les points de la surface réelle)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : 2 cylindres nominaux centrés dans des cylindres  $\varnothing 0,04$  contenant les éléments de référence B (prolongement des axes des cylindres associés par les moindres carrés aux deux alésages réels B).
- Surfaces nominales : axe nominal de C
- Zones de tolérance : espace extérieur au cylindre  $\varnothing 10,4$  (M) centrés sur l'axe nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément toléré est contenu dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut glisser sur A et flotter autour de B pour que l'élément toléré soit si possible dans la zone de tolérance.

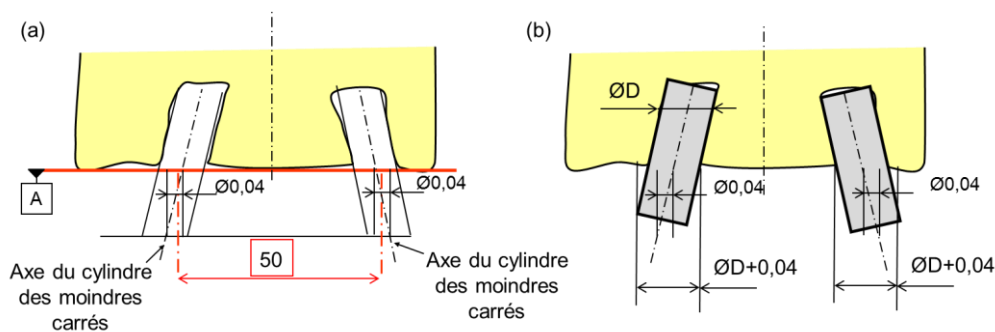


Figure 29 - Référence avec une tolérance sur la plage projetée

NOTE : avec l'écriture d'une référence A|B(P), sans tolérance sur B, la référence B est centrée sur les pions. La spécification (2) ne peut pas bénéficier du flottement disponible pour compenser des défauts de position de l'alésage C. Cette écriture est inutilement restrictive.

### 3.2.3 Référence avec tolérance sur la plage de projection et jeu défavorable

La Figure 30 comporte une mise en position par deux pions serrés dans la référence B. L'alésage central est destiné positionner une pièce placée au-dessus.

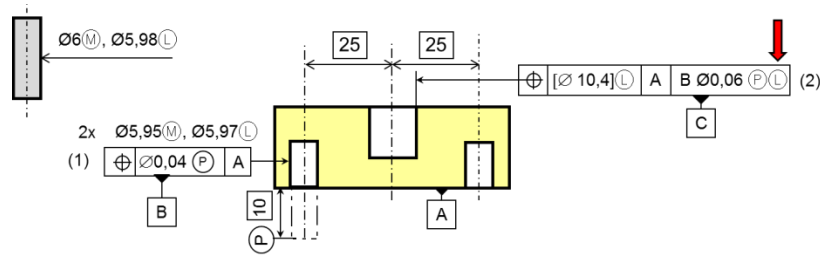


Figure 30 - Référence sur une plage projetée avec jeu défavorable

La localisation (1) (Figure 30) assure la montabilité des pions en imposant que les axes des alésages soient simultanément dans 2 cylindres de diamètre 0,04, centrés sur les axes nominaux (Figure 31a). Les pions de diamètre maxi 6 peuvent potentiellement occuper un espace  $\text{Ø}6 + 0,04 = \text{Ø}6,04$ . La pièce d'appui doit respecter une zone de tolérance  $\text{Ø}6,04$  pour garantir la montabilité.

La localisation (2) constitue un maillon entre la pièce supérieure et la pièce d'appui. Les jeux sont défavorables. Cette référence avec une zone de tolérance en plage projetée B  $\text{Ø}0,06$  (P) se comporte avec un flottage, exactement comme une référence au minimum de matière. Ce maillon est issu d'une chaîne de cotes avec un maillon débattement maxi calculé au minimum de matière, c'est-à-dire en considérant la pièce la plus défavorable Figure 31b : perpendicularité parfaite, entraxe nominal, pions de diamètre mini 5,98. Par exemple, avec des alésages  $d = \text{Ø}6,04$  sur la pièce d'appui, cette pièce a un débattement  $\delta = d - 5,98 = 0,06$ . Il est donc parfaitement admis que la limite de la zone de tolérance  $\text{Ø}10,4$  de l'alésage central spécifié se décale de  $\delta/2=0,03$  dans toutes les directions, ce qui donne une zone de tolérance étendue  $\text{Ø}10,46$ .

Le contrôle peut donc être effectué de 2 manières :

- Fixer des pions de diamètre 5,98 dans les alésages B. Placer la pièce sur un montage de contrôle avec des alésages  $\text{Ø}6,04$  (Figure 31b). L'alésage spécifié doit rester dans la zone de tolérance étendue  $\text{Ø}10,46$  quelle que soit la position de la pièce permise par le jeu.
- Quelle que soit la position de la pièce telle que les deux axes des deux alésages B soient dans la zone de tolérance  $\text{Ø}0,06$ , l'alésage spécifié doit rester dans la zone de tolérance étendue  $\text{Ø}10,46$ .

NOTE : les deux méthodes sont équivalentes. Il suffit de supposer un pion épaulé de diamètre nul en dehors de la pièce, représentant l'axe de l'alésage.

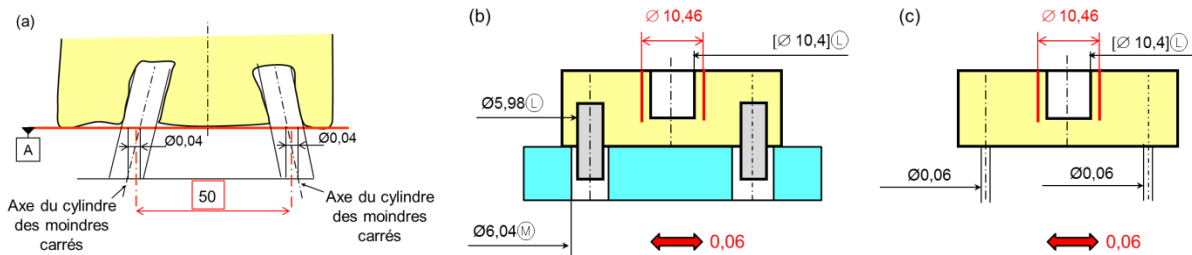


Figure 31 Référence avec une tolérance sur la plage projetée

Pour cette localisation (2), la signification est :

- Élément tolérancé : Surface réelle cylindrique C
- Référence primaire A : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire B : 2 cylindres nominaux distants de 50.
- Surface nominale : axe nominal de l'alésage C, au milieu des axes de B.
- Zones de tolérance : espace intérieur au cylindre  $\text{Ø}10,4$  (L) centré sur l'axe nominal.
- Critère de conformité : La zone de tolérance étendue est  $\text{Ø}10,4 + 0,04 = \text{Ø}10,44$ . La surface réelle tolérancée doit rester dans la zone de tolérance étendue, quelle que soit la position permise par le jeu entre les 2 axes associés aux deux alésages B et les zones de tolérances  $\text{Ø}0,04$  centrées sur B.

## 4. Référence définie avec un élément de situation

### 4.1 Principe de l'élément de situation

#### 4.1.1 Besoin fonctionnel

Dans un système de référence classique, chaque référence supprime des degrés de liberté en fonction de la nature de sa surface. Sept classes de surfaces ont été recensées : plan, cylindre, révolution, prismatique, sphère, complexe et hélice.

En pratique, certaines surfaces ne bloquent pas correctement tous les degrés de liberté correspondant à sa classe.

- Surface de très faible étendue dans une direction.
- Pièce peu rigide dans une direction.
- Référence en appui sur une surface peu rigide
- Référence reliée à un dispositif qui laisse des mobilités supplémentaires.
- Surface complexe mais en réalité très peu différente d'une surface simple. (Surface presque plane, presque cylindrique, ...).

L'élément de situation permet de définir une référence équivalente au comportement réel de la référence en ne bloquant que certains degrés de libertés du système de références, par exemple pour représenter une cinématique présente sur la pièce voisine.

#### 4.1.2 Définition et principe

**Définition :** Un élément de situation est un élément géométrique idéal plan, droite ou point, défini dans le modèle nominal positionné par une référence ou un système de références.

Les éléments de situation sont notés entre crochets [...] pour des éléments construits dans un système de références ou entre les signes <.> pour les éléments de situation construits sur une surface isolée.

Exemple : [PL] plan, [SL] droite et [PT] point.

L'élément de situation « droite » peut caractériser différents types de liaison :

- [SL] (straight line) une droite au sens d'une liaison cylindrique qui bloque 4 degrés de liberté
- [SL] (straight line) droite appartenant à un plan dont la position est incertaine dans le plan. Cette droite est orientée par la normale au plan et ne limite que deux degrés de liberté.
- [RV] (Révolution) droite représentant une liaison révolution qui ne laisse qu'un seul degré de liberté en rotation (il n'est pas nécessaire d'imposer un point).
- [GL] (Glissière) droite représentant une liaison glissière qui ne laisse qu'un seul degré de liberté en translation (il n'est pas nécessaire d'imposer une orientation).

L'élément géométrique point noté [PT] peut être :

- un point au sens du centre d'une liaison sphérique,
- un point appartenant à une droite avec une position incertaine sur la droite
- un point appartenant à un plan avec une position incertaine dans le plan.

Règles : Les éléments de situation sont utilisés dans 3 cas, avec des règles de construction différentes.

(a) L'élément de situation est défini dans le modèle nominal associé au système de références constitué des références prioritaires et de la référence portant l'élément de situation. Le système de références est ensuite défini avec l'élément de situation au lieu de la surface de référence complète. Dans la Figure 32a, le modèle nominal est associé au système de références A|B. Ce modèle comporte l'élément de situation plan B[PL]. Ce plan se substitue à la référence secondaire B. Le modèle nominal est associé au plan A et au plan B[PL] ce qui laisse une mobilité résiduelle en translation. Le modèle est ensuite associé à la référence C. La référence secondaire est le plan de situation, pas la surface complexe B.

(b) L'élément de situation est défini dans le modèle nominal associé au système de références sans flottement (sans modificateur  $\text{M}$  ou  $\text{C}$  ni  $\text{P}$  avec tolérance). Cet élément est désigné par un cadre de référence. Cette référence peut être utilisée seule dans un système de références ou combinée à d'autres références. Dans la Figure 32b, la droite D est définie dans le modèle nominal associé au système de références A|B|C. Cette droite D est parfaitement définie et peut être utilisée comme référence primaire dans une spécification, ou en référence secondaire ou tertiaire sous certaines conditions, par exemple que le système soit isostatique.

(c) L'élément de situation indépendant est défini dans le modèle nominal associé à la surface, indépendamment des autres surfaces du système de références. Dans la Figure 32c, l'élément de situation B<SL> est une droite du plan minimax associé à la surface réelle B (sans aucune contrainte par rapport à A). La position de cette droite est floue dans le plan B. Pour la spécification, le modèle nominal est associé à A, la droite B<SL> doit être contenue dans le plan de référence B du modèle nominal.

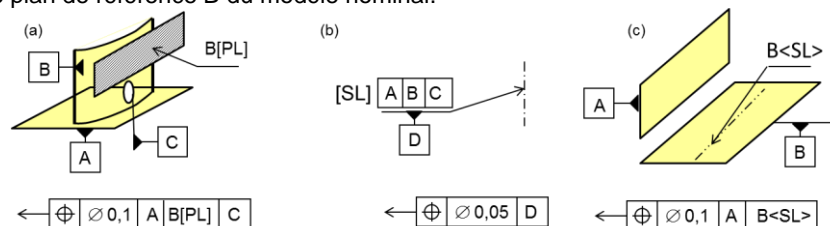


Figure 32 - Trois type d'éléments de situation

NOTE 1 : le nota désignant l'élément de situation peut être omis sur un plan papier s'il peut être considéré comme implicite, mais il est nécessaire dans un environnement numérique pour assurer le lien entre l'élément de situation et la référence correspondante.

NOTE 2 : les éléments de situation droite ou plan ont une étendue indéterminée (ou infinie). Ils peuvent éventuellement être utilisés comme élément spécifié, en définissant une plage avec le modificateur  $\textcircled{P}$ .

NOTE 3 : un élément de situation noté  $\langle \rangle$  est un élément géométrique extrait de la surface associée à l'ensemble de la surface alors qu'une référence partielle n'est associée qu'à la zone partielle.

### 4.1.3 Identification de l'élément de situation sur une surface isolée

L'élément n'est associé qu'à une seule surface pour un élément indépendant (noté  $\langle \rangle$ ) ou en référence primaire.

L'élément de situation est parfaitement défini dans le modèle nominal. Le modèle nominal est associé à la surface réelle. Si la référence laisse des degrés de liberté, le modèle nominal doit être balancé à l'aide du contour de la face ou éventuellement d'autres surfaces de la pièce. Ce second balancement est approximatif mais suffisant pour définir un élément de situation. La cotation doit être suffisamment robuste pour que le système de références obtenu soit très peu sensible à la position de l'élément de situation.

Dans la Figure 33a, la référence A est une surface prismatique qui est suffisante pour définir l'élément de situation A[SL] ou  $\langle \rangle$  de type droite qui est parallèle à la direction de la prismatique.

Dans la Figure 33b, le plan A est associé à la surface réelle par un critère minimax. L'association du plan seul ne permet pas de positionner la droite A[SL], car le modèle nominal peut glisser sur la référence A. Le modèle nominal est orienté sur ce plan approximativement à l'aide du contour de la face plane ou de toute autre surface discriminante. La droite a donc une position floue dans le plan.

Dans la Figure 33c, le cylindre A est associé à la surface réelle par un critère moindre carré. L'association du cylindre seul ne permet pas de positionner la droite A[SL], car le modèle nominal peut tourner autour de la référence A. Le modèle nominal est orienté approximativement à l'aide du contour de la face cylindrique ou de toute autre surface. La droite est donc parallèle à l'axe du cylindre associé mais a une position floue sur ce cylindre.

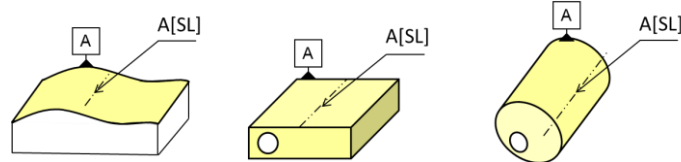


Figure 33 - Position d'un élément de situation sur une référence primaire

## 4.2 Eléments de situation construit dans un système de références

### 4.2.1 Définition

Définition : L'élément de situation est défini dans le modèle nominal par rapport à un système de références sans flottement. Le système de références de la spécification est indiqué sous la forme suivante <sup>1</sup>:

- A[xx] lorsque l'élément de situation est défini dans le modèle nominal par la référence primaire uniquement. La spécification est alors définie en considérant uniquement cet élément de situation comme référence.
- A | B[xx] lorsque l'élément de situation est défini dans le modèle nominal par le système de références A|B. La spécification est alors définie en considérant la référence primaire A et l'élément de situation B[xx] comme référence secondaire.

NOTE 1 : Un premier balancement du modèle nominal permet de définir l'élément de situation, par rapport à la pièce. La position de l'élément de situation doit être univoque, ce qui implique que ce premier système de références ne doit laisser aucune mobilité ni aucun flottement résiduel pour construire l'élément de situation. Un second balancement associe le modèle nominal au système de références de la spécification en ne conservant que l'élément de situation, ce qui laisse une mobilité.

NOTE 2 : On ne peut associer qu'un seul élément de situation à une référence. Un élément de situation ne peut pas bloquer plus de degrés de liberté que le système de références sur lequel il est construit.

<sup>1</sup> Aucun cas d'élément de situation en référence tertiaire n'a été trouvé.

#### 4.2.2 Transformation d'une liaison pivot en pivot glissant

L'élément de situation peut donner des degrés de liberté supplémentaires à la zone de tolérance par rapport aux degrés disponibles avec la référence complète.

Dans la Figure 34, la référence primaire A est un cône. Pour la spécification de position (1), la référence primaire est la droite A[SL] définie sur l'axe du cône A. Un cône d'angle nominal est associé à l'élément de référence réel par les moindres carrés. La référence A[SL] est l'axe de ce cône associé.

Dans la spécification(1), le modèle nominal est donc positionné uniquement sur cette droite A[SL] avec deux degrés de liberté résiduels (une rotation autour de la droite et une translation selon la droite). La zone de tolérance est centrée sur le cône nominal spécifié. La translation du nominal permet de déplacer axialement la zone de tolérance pour, si possible, placer la surface réelle spécifiée dans la zone de tolérance

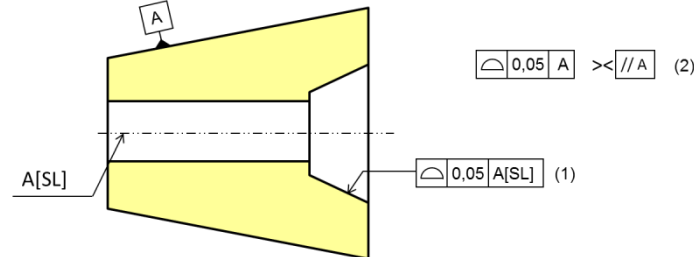


Figure 34 - Élément de situation axe de rotation

NOTE : cette application Figure 34 permet de définir une position dans la direction radiale de la droite A[SL], indépendamment de la position axiale. La spécification (1) est équivalente à la spécification (2) pour laquelle le modèle nominal est positionné sur le cône A, puis translaté librement suivant l'axe de A pour placer si possible la surface spécifiée dans la zone de tolérance.

#### 4.2.3 Transformation d'une liaison prismatique en pivot glissant

Dans la Figure 35, la référence A est formée par 2 plans inclinés de faible largeur. La liaison est équivalente à une liaison pivot située sur l'axe d'un cylindre tangent aux deux plans. Cet axe est représenté par la droite A[SL] définie dans le modèle nominal.

Pour la spécification de localisation, les deux plans nominaux A sont associés en une seule opération à l'élément de référence réel par les moindres carrés. La référence A[SL] est la droite définie dans le nominal.

Dans un second temps, le modèle nominal est uniquement centré sur la droite A[SL]. Les mobilités résiduelles sont la rotation autour de A[SL] et la translation selon cet axe.

La référence secondaire B est formée par les 2 plans du modèle nominal associés aux faces latérales réelles par les moindres carrés avec offset. La zone de tolérance de l'alésage central est alors centrée sur le modèle nominal.

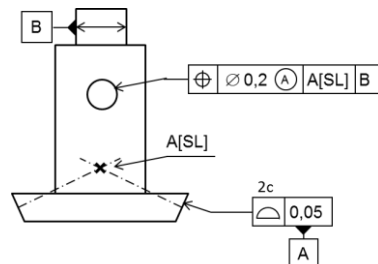


Figure 35 - Élément de situation axe d'une liaison pivot

#### 4.2.4 Assimilation d'une surface complexe à un plan

La Figure 36 présente une pièce de forme complexe en appui sur une surface complémentaire de même type. Cette surface de type complexe bloque en théorie tous les degrés de liberté. En pratique, elle est très plate et glisse sur sa surface d'appui. Ce sont les vis passant dans les alésages qui positionnent la pièce.

Le modèle nominal serait totalement positionné si la référence était A seule dans la localisation (1). Le glissement de cette pièce pour positionner les trous ne serait pas représenté.

Avec la cotation Figure 36, la référence A du modèle nominal est associée à l'élément de référence par le critère minimax. Le plan A[PL] est un plan décrit dans le modèle nominal qui est ainsi défini aussi sur la pièce.

L'utilisation de A[PL] comme référence primaire dans (1) laisse trois degrés de liberté pour vérifier la spécification.

Dans la localisation (1), ces trois degrés de libertés permettent de faire glisser le plan A[PL] du modèle nominal sur ce plan A[PL] associé à la surface réelle, pour placer, si possible, l'état virtuel au maxi matière hors de la matière des 8 alésages.

Dans la localisation (2), ces trois degrés de libertés permettent de déplacer le nominal pour placer, si possible, l'état virtuel au mini matière dans la matière des 8 alésages, ce qui laisse un flottement résiduel pour placer, si possible, la surface spécifiée dans la zone de tolérance.

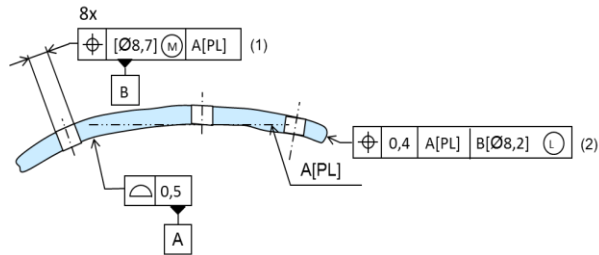


Figure 36 - Surface pseudo-plane

NOTE : l'association de la référence primaire doit également être réalisée en n'utilisant que les degrés de liberté du plan (translation suivant la normale et rotations dans le plan), pour éviter un grand déplacement de la surface nominale tangente à la surface réelle.

Un principe identique permet d'associer une référence idéale pour des surfaces « presque » cylindriques, prismatiques, sphériques, de révolution, etc...

### 4.3 Construction d'une référence avec un élément de situation

#### 4.3.1 Définition d'une référence avec un élément de situation

Définition : La référence est construite à l'aide d'un élément de situation défini dans le modèle nominal par rapport à un système de références sans flottement. Le système de références auquel est attaché à la référence construite doit être indiqué à proximité de l'indicateur de référence après l'indication [PL] (plan), [SL] (droite) ou [PT] (point).

Les différents cas de la Figure 37 suppose que l'élément de situation est construit dans un système de référence A|B ou A|B|C (non représenté)

Dans la Figure 37a, le modèle nominal est associé au système de références A|B. Le plan P est défini dans ce nominal par rapport à ce système de références. Le cylindre peut être spécifié uniquement par rapport à P avec les mobilités permises par la référence sur ce plan P.

Dans la Figure 37b, le modèle nominal est associé au système de références A|B|C. La droite D est définie dans le nominal par rapport à ce système de références.

Dans la Figure 37c, le modèle nominal est associé au système de références A|B|C qui peut être un système compliqué. Cette méthode permet de construire 3 plans X, Y, Z définis dans le nominal. Le système de références X|Y|Z est rigoureusement équivalent à A|B|C, mais il peut être plus simple de donner des coordonnées ou des orientations dans un repère orthonormé que dans un repère A|B|C compliqué. Chaque plan peut être utilisé seul pour définir une localisation particulière par exemple.

En 2D, pour pouvoir indiquer la position de l'élément géométrique, un plan est représenté de préférence en vue de côté (Figure 37d), une droite dans une vue en bout (Figure 37e). Ces éléments géométriques doivent être positionnés par rapport au système de références.

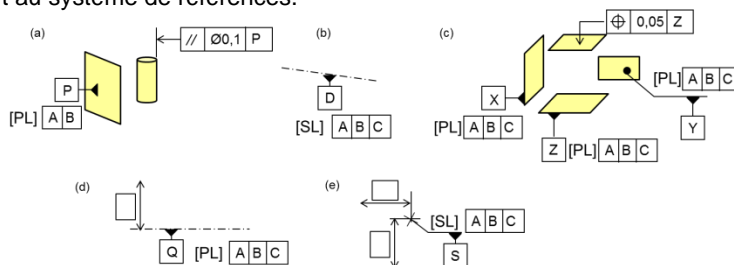


Figure 37 - Référence construite

### 4.4 Élément de situation indépendant

#### 4.4.1 Définition

Définition : L'élément de situation est défini dans le modèle nominal associé à la surface, indépendamment des autres surfaces du système de références.

Un élément de situation est défini sur une surface comme si celle-ci était primaire.

Les éléments de situation sont indiqués sous la forme suivante :

- L'élément de situation A<xx> est défini dans le modèle nominal associé à l'élément de référence A. La référence du système de références est construite avec cet élément de situation.
- Avec A<xx>-B<xx>, l'élément de situation A<xx> est défini dans le modèle nominal associé à l'élément de référence A. L'élément de situation B<xx> est défini dans le modèle nominal associé à l'élément de référence B. La référence du système de références est construite avec ces deux éléments de situation.
- L'élément de situation (A-B) <xx> est défini dans le modèle nominal associé à l'élément de référence A-B en une seule opération.

NOTE : Plusieurs éléments de situation peuvent être associés à la même surface A. Ces éléments sont numérotés sous la forme A<PT1>, A<PT2>.

#### 4.4.2 Plan défini par une droite et un point

La Figure 38a présente une référence commune définie sur deux éléments de situation :

A est un plan associé à l'élément de référence de gauche par le critère minimax. La droite A<SL> est définie dans ce plan associé.

B est un autre plan associé à l'élément de référence de droite. Le point B<PT> est défini dans ce plan associé.

Pour la localisation, le modèle nominal est positionné avec le plan primaire passant par la droite A<SL> et par le point B<PT>.

NOTE 1 : Les plans A et B ne sont donc pas rigoureusement coplanaires. La droite A<SL> et le point B<PT> sont définis indépendamment l'un de l'autre, dans des positions approximatives, mais cette incertitude a une influence négligeable sur la définition de la référence.

NOTE 2 : Les deux surfaces complètes sont prises en compte pour définir l'élément de situation. Cette construction est donc différente d'une définition de la référence A par deux zones partielles linéiques et ponctuelles.

NOTE 3 : L'association d'éléments de situation dans une référence doit impérativement constituer un ensemble isostatique avec les autres références au sein d'un système de références. Pour lever certains hyperstatismes, l'emploi des modificateurs du type [DV] ou  $\triangleright$  est possible, mais avec de nombreuses restrictions.

La Figure 38b présente une construction impossible, car les éléments de situation sont construits de manière indépendante. Les droites A<SL> et B<SL> ne sont pas coplanaires. Il n'est pas possible de positionner le modèle nominal sur ces éléments de situation.

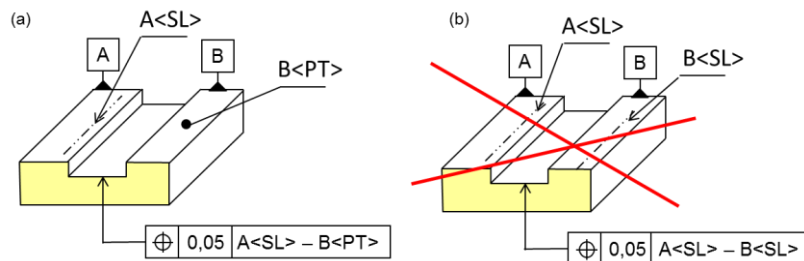


Figure 38 – Références communes

L'emploi des éléments de situation dans ce contexte a pour but d'ajouter ou de limiter des mobilités aux références. Ils permettent ainsi des constructions complémentaires à celles permises par des zones partielles pour représenter le plus fidèlement possible le comportement des liaisons, en particulier pour les pièces peu rigides définies à caractériser à l'état libre.

#### 4.4.3 Élément de situation de type droite

Lorsqu'un élément de type <SL> ou <PT> appartient à un plan, il conserve une notion de normale issue du plan. La droite et le point sont orientés. Cet élément de situation ne peut pas servir pour positionner une autre surface dans la direction tangente au plan.

Dans la Figure 39, la droite A<SL> est définie dans le plan associé par le critère minimax à la zone partielle A1. La droite est définie dans ce plan associé par rapport à un élément n'appartenant pas au système de références. La position de cette droite dans le plan est donc incertaine.

Le parallélisme (1) permet de maîtriser l'orientation du plan inférieur par rapport à la droite A<SL>. Cette spécification ne limite pas le défaut d'orientation autour de A<SL>. Les incertitudes de position et d'orientation de A<SL> dans le plan n'ont aucune influence sur le résultat.

NOTE : cette application permet de définir l'orientation d'un plan dans une seule direction.

La spécification (2) est incorrecte, car la position de A<SL> dans cette direction est incertaine et ne permet pas de positionner la zone de tolérance.

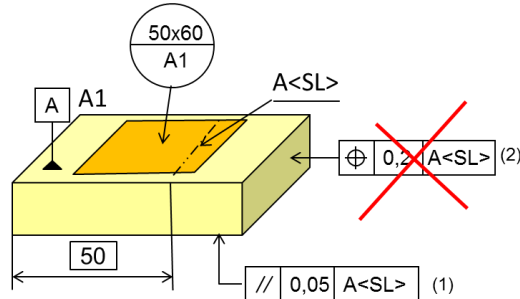


Figure 39 - Orientation autour d'une direction

## 4.5 Association du modèle nominal avec un élément de situation

### 4.5.1 Règle d'association

Les éléments de situation posent 3 difficultés :

- Leur étendue est infinie
- Leur position est souvent floue dans l'élément de référence
- Leur position ne respecte aucune contrainte par rapport aux autres systèmes de références ;

De ce fait, de nombreuses constructions sont impossibles.

A titre d'exemple, un élément de situation de type droite ne peut généralement pas être associé à une génératrice d'un cylindre, car la droite n'est pas rigoureusement parallèle à l'axe de ce cylindre nominal.

Règle :

Si l'élément de situation de type point ou ligne est défini dans une surface nominale, l'association est réalisée en plaçant l'élément de situation déterminé à l'aide de la surface réelle dans la surface nominale.

sinon (l'élément de situation est un élément construit par rapport à d'autres surfaces), pour orienter le modèle nominal autour d'une liaison pivot d'axe D :

Figure 40a : le modèle nominal est orienté par un point M. La droite perpendiculaire à l'axe D passant par le point M nominal et la droite perpendiculaire à l'axe D passant à l'élément de situation doivent être parallèles.

Figure 40b : le modèle nominal est orienté par une droite G. La normale commune à l'axe D et à l'axe de G doit être parallèle à la normale commune à l'axe D et à l'élément de situation associé à la surface réelle G.

Figure 40c : le modèle nominal est orienté par un plan F. La normale au plan nominal F, la normale à l'élément de situation associé à la surface réelle F et le vecteur de l'axe D doivent être coplanaires.

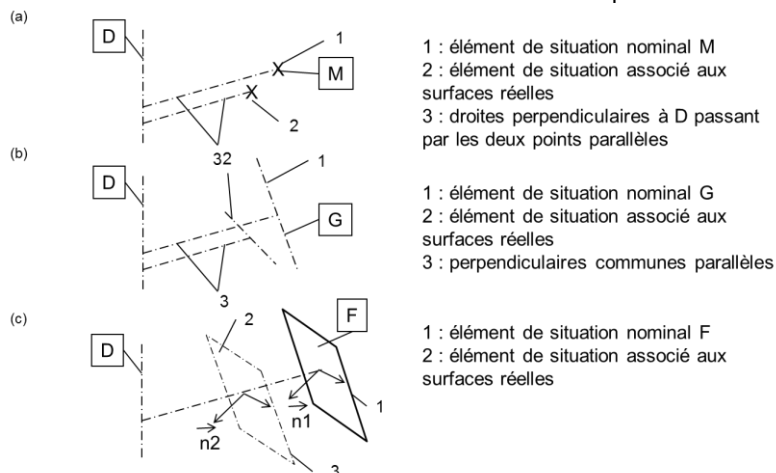


Figure 40 - Orientation du modèle nominal avec un élément de situation de type droite ou plan



NOTE : d'autres constructions similaires peuvent être envisagées, avec un nota pour expliquer la règle.

#### 4.5.2 Elément de situation indépendant en référence secondaire

La Figure 41a comporte un plan A et une référence secondaire B<SL>. Le modèle nominal est associé une première fois par le critère minimax à l'élément de référence B indépendamment de la référence A (Ce plan n'est donc pas perpendiculaire à A). La droite B<SL> est identifiée dans ce plan. (Figure 41b).

Le modèle nominal est ensuite posé sur A, puis déplacé pour que la droite B[SL] appartienne à la surface nominale B. La zone de tolérance de l'axe de l'alésage est définie dans ce nominal.

NOTE : La Figure 41c illustre l'emploi des éléments de situation pour prendre en compte les déformations internes à la pièce. Le plan latéral B est entièrement en contact avec la pièce voisine et supposé indéformable. L'association peut se faire par le critère minimax. Par contre, la pièce comporte une partie interne assez fine et déformable qui va laisser des mobilités à la face B, pour s'adapter à la pièce complémentaire. La ligne neutre au cours de cette déformation est supposée être la droite B<SL> qui peut être utilisée comme référence pour placer le modèle nominal.

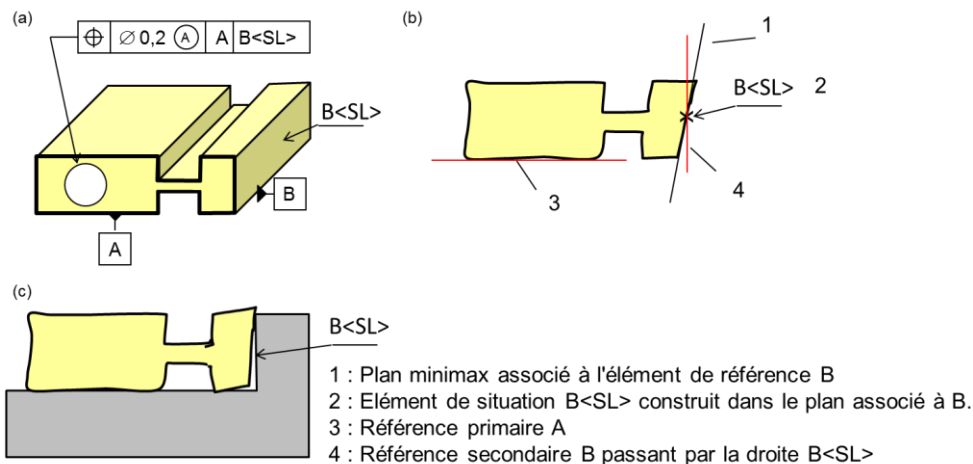


Figure 41 - Ligne neutre sur une face secondaire

La Figure 42 est similaire, mais c'est la pièce voisine qui se déforme pour assurer le contact avec le plan secondaire. La ligne neutre au cours de cette déformation est supposée être la droite B<SL>.

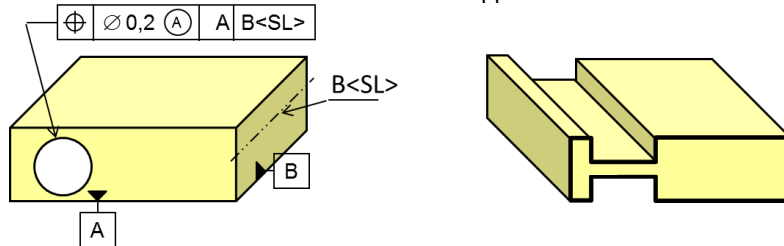


Figure 42 - Ligne neutre de la surface en appui

#### 4.5.3 Eléments de situation avec décalage

La Figure 43, présente un système de références A <PT> | B<PT> ▷

Le cône nominal est associé par les moindres carrés à l'élément de référence primaire A. Le point A<PT> est défini dans ce nominal et correspond à un plan de jauge de diamètre d.

Le modèle nominal est associé par les moindres carrés à l'élément de référence secondaire B indépendamment de la référence primaire (les 2 cônes ne sont pas coaxiaux, le cône secondaire n'est pas contraint à passer par le point A<PT>). Le point B<PT> est défini par rapport à ce second cône nominal et correspond à un plan de jauge de diamètre d. Les points A<PT> et B<PT> sont définis de manière univoque pour chaque référence, mais leur distance ne respecte pas la distance entre les éléments de situation du modèle nominal.

Le modèle nominal est centré sur le point primaire A<PT>. Le point de référence secondaire B<PT> est associée par les moindres carrés au point B<PT> nominal en admettant un décalage  $\delta$  dans la direction des deux points en raison du modificateur ▷. En pratique, le modèle nominal est centré sur A<PT> et orienté dans la direction des deux points.

La localisation (2) est bien définie par rapport à A<PT> dans la direction imposée par les deux éléments de situation.

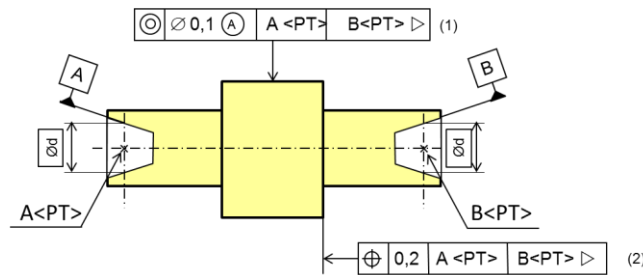


Figure 43 - Système de références point | point

NOTE : Il y a une ambiguïté si ce modificateur  $\triangleright$  n'est pas indiqué, car B<PT> ne peut pas être sur le point nominal en position exacte par rapport à A<PT>.

La Figure 44 est similaire à la Figure 43, mais avec le modificateur [DV]. Les constructions des points sont identiques. La référence commune admet une distance variable entre les points A<PT> et B<PT>. Le modèle nominal est donc centré sur la droite A<PT>-B<PT> et positionnée centrée entre les 2 points A<PT> et B<PT>.

La coaxialité (1) est définie par rapport à la droite passant par les deux points.  
La localisation (2) est définie par rapport au nominal centré entre A<PT> et B<PT>.

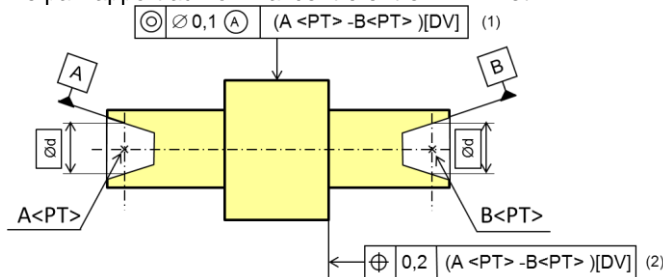


Figure 44 - Système de références commun point-point à distance variable

#### 4.5.4 Système de références et spécification sur une référence construite

La Figure 45 présente une localisation (1) avec un système de références défini par le plan A primaire, le cylindre B secondaire. L'orientation tertiaire est définie par la droite C qui est un élément de situation défini dans un autre système de références F|G.

L'élément de situation C est construit en associant une première fois le modèle nominal à l'élément de référence F par le critère minimax. Les plans secondaires sont associés par les moindres carrés avec offsets aux deux faces réelles G. Dans ce modèle, la droite C est parfaitement définie.

La droite C ainsi construite par rapport à F|G n'est pas rigoureusement parallèle au plan A. Elle ne peut pas passer par la droite nominale C définie après association du modèle nominal par le plan A et l'alésage B.

Le système de référence A|B|C est défini de la manière suivante :

Le système A|B est une révolution. L'élément de situation nominal C est une droite tertiaire en position nominale par rapport à A|B. L'élément de situation défini dans F|G est une autre droite.

Conformément à la règle donnée en 4.5.1, le modèle nominal est orienté de sorte que la normale commune à l'axe B et à l'axe de C doit être parallèle à la normale commune à l'axe B et à l'élément de situation C dans F|G.

Le modèle nominal étant orienté, l'axe nominal du trou central spécifié par (1) est parfaitement identifié.

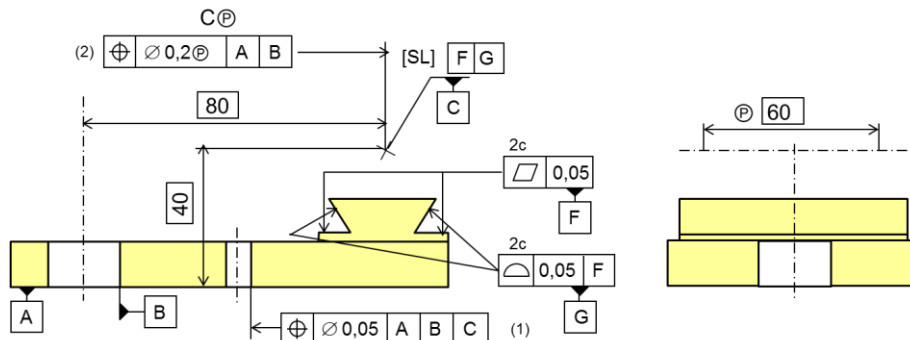


Figure 45 - Système de références avec un élément construit

NOTE 1 : cet exemple montre qu'avec cette cotation, l'inclinaison de l'élément de situation C dans F|G par rapport à A n'a pas d'effet sur l'orientation du modèle nominal.

La localisation (2) impose que l'élément de situation C défini dans F|G soit dans la zone de tolérance, mais uniquement sur l'étendue identifiée par la plage  $\textcircled{P}$  sur la droite C.

## 5. Références sur élément de contact

### 5.1 Principe et définition

#### 5.1.1 Principe d'association

Généralement, dans un assemblage, les surfaces en contact dans une liaison sont de même nature (plan sur plan ou cylindre dans cylindre par exemple). Inversement, si les surfaces d'une liaison ne sont pas de même nature, la référence peut être définie à l'aide d'un des moyens suivants :

- Référence sur une zone partielle qui correspond à la portion de surface théoriquement en contact
- Référence définie avec un élément de situation lorsque la liaison apporte des degrés de libertés supplémentaires par rapport à la référence appartenant à la pièce.
- Référence sur un élément de contact qui représente la surface de la pièce voisine en appui avec ses mobilités.

Un élément de contact représente le plus fidèlement possible la surface appartenant à la pièce voisine en contact et ses mobilités. L'élément de contact est représenté dans le modèle nominal par une ou plusieurs surfaces (deux plans perpendiculaires formant un V par exemple).

Par défaut, si une mobilité du système de références prioritaire le permet, l'élément de contact doit être en contact avec la pièce. En cas de jeu ou de serrage entre l'élément de contact et la pièce réelle, le critère d'association doit permettre d'associer la surface réelle à une surface offset de l'élément de contact.

Les éléments de contact ne peuvent pas imposer de déformations à la pièce. Si besoins, ces déformations doivent être précisées en définissant des conditions de mesure.

Définition : Un élément de contact est un élément idéal, de tout type (plan, cylindre, surface complexe, etc..) associé à l'élément de référence au voisinage de la zone potentielle de contact (Figure 46).

- L'élément de contact est fixe, lorsqu'il est en position nominale fixe par rapport au modèle nominal de la pièce.
- L'élément de contact est mobile si une cinématique peut déplacer l'élément de contact par rapport au modèle nominal pour le mettre en contact avec la pièce réelle.
- L'élément de contact est libre lorsqu'il peut être placé librement sur l'élément de référence.

L'élément de contact est désigné par A[CF] ou A<CF> (contacting Feature), A étant le nom de la référence sur laquelle s'appuie l'élément de contact.

- A[CF] désigne un élément de contact fixe ou mobile.
- A<CF> désigne un élément de contact libre.

Lorsqu'il y a plusieurs éléments de contact associés à une seule référence, ces éléments sont numérotés : ex : A[CF1], A[CF2],...

Lorsqu'un élément de contact est associé à des zones partielles A1, A2 de la surface A, ces éléments de contact sont notés A1[CF], A2[CF].

Le degré d'invariance d'une référence avec un élément de contact est donné par la mobilité permise par la liaison formée par l'élément de contact et la référence. Ce degré d'invariance est donc plus grand que le degré d'invariance de la référence seule.

Le modificateur [CF] sur une référence est généralement incompatible avec les autres modificateurs (M), (L), (P), (D), [DV],  $\llcorner$  [D] F,  $\llcorner$  [D] et les zones partielles mobiles  $\text{B1}$ . En effet, il est nécessaire de définir avec davantage de précision les mobilités de l'élément de contact.

Dans la Figure 46a, l'élément de contact cylindrique  $\varnothing 8$  est fixe dans le modèle nominal. La pièce réelle est positionnée par rapport au modèle nominal en mettant en contact les éléments de la référence A avec l'élément de contact A[CF]. La référence est équivalente à une liaison cylindrique ayant pour axe l'axe du cylindre élément de contact.

Dans la Figure 46b, la surface A est cylindrique. L'élément de contact est composé de deux plans fixes dans le modèle nominal. La pièce réelle est positionnée par rapport au modèle nominal en mettant en contact le cylindre réel A avec les éléments de contact A[CF1] et A[CF2]. La référence est équivalente à une liaison cylindrique ayant pour axe, l'axe du cylindre de référence.

Dans la Figure 46c, B désigne deux plans parallèles formant une rainure. L'élément de contact B[CF] de la référence secondaire est défini dans le modèle nominal comme un cylindre  $\varnothing 10$  à 50 mm de A. Pour le système de référence A | B[CF], le modèle nominal est centré sur le cylindre réel A. La mobilité résiduelle permet d'orienter le modèle nominal autour de A. L'orientation est obtenue lorsque l'élément de contact est associé aux deux faces latérales de la rainure B. Le contact sera assuré sur les deux plans avec une surface offset de l'élément de contact nominal. Le système de référence A | B[CF] est équivalent à une liaison prismatique.

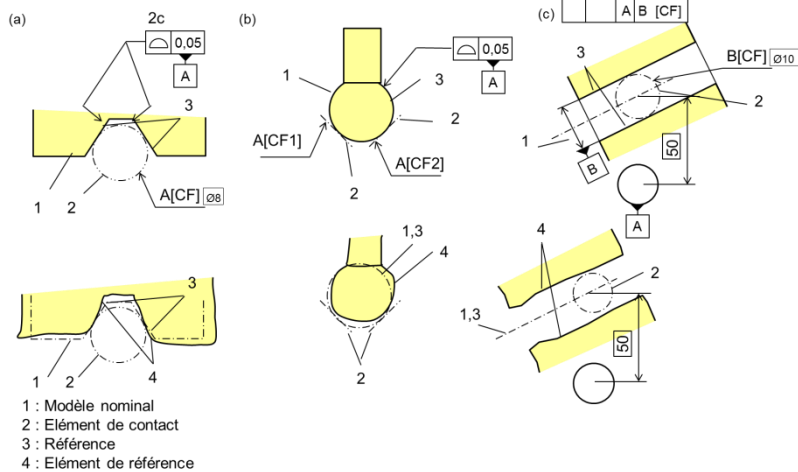


Figure 46 - Principe d'un élément de contact fixe

Dans la Figure 47a, la cotation comporte une référence primaire A et une référence secondaire B avec un élément de contact cylindrique  $\varnothing 8$  B[CF] muni d'une glissière. L'élément de contact B[CF] est défini dans le modèle nominal en position nominale. Le modèle nominal est positionné sur la référence primaire A. La surface associée à l'élément de contact B[CF] peut se translater dans la direction de la glissière pour assurer le contact avec les éléments de la référence B (Le cylindre associé doit rester parfaitement parallèle à A). Le système de référence primaire + secondaire est équivalent à une liaison prismatique.

Dans la Figure 47b, la cotation comporte une référence primaire A. B désigne les deux plans formant la gorge. Un élément de contact sphérique  $\varnothing 8$  B<CF> est placé librement dans la gorge. Cet élément de contact pourra être utilisé par exemple pour spécifier la profondeur de la gorge. B<CF> ne peut pas être utilisé pour définir un système de référence car on ne connaît pas sa position nominale.

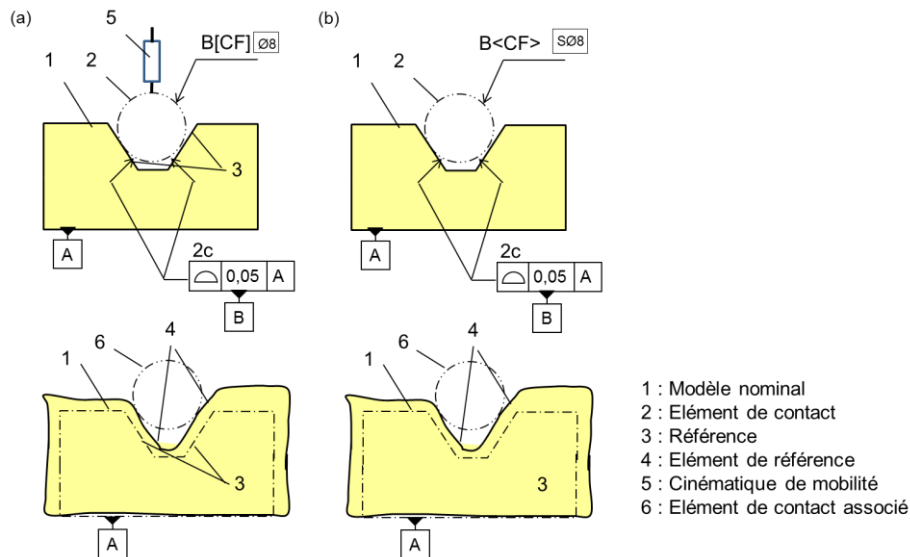


Figure 47 - Elément de contact mobile

NOTE 3 : L'élément de contact fixe identifié sur la pièce doit être parfaitement superposé à l'élément de contact du modèle nominal. Pour un élément de contact mobile, c'est l'élément associé qui se déplace. L'élément de contact reste en position nominale. A[CF] désigne donc l'élément nominal tel que l'élément associé soit au contact avec la pièce.

NOTE 3 : La surface associée à l'élément de contact peut éventuellement être utilisée pour spécifier indirectement l'élément de référence

### 5.1.2 Définition d'un système de références avec élément de contact

Chaque élément de contact est représenté sur le modèle nominal par un solide décrit en traits mixtes fins à deux points et un tiret long en contact avec la ou les références définies dans le modèle nominal. L'élément de contact est identifié par un nota de type A[CF] ou A<CF> pour relier l'élément de référence A et l'élément de contact afin d'assurer la continuité numérique.

Chaque élément de contact est de forme parfaite, de dimensions intrinsèques nominales et d'étendue indéterminée.

Des zones partielles fixes ou glissantes peuvent être définies sur la pièce pour limiter l'étendue de la surface réelle en contact avec l'élément de contact.

Dans la spécification, le modificateur [CF] doit être ajouté dans le cadre de tolérance après l'identifiant de la référence (Figure 48) :

- (a) L'élément de contact est associé à la surface réelle A.
- (b) L'élément de contact est associé simultanément aux surfaces réelles A et B (considérées comme une seule surface).
- (c) Les éléments de contact A[CF] et B[CF] sont construits indépendamment l'un de l'autre pour définir une référence.

Le modèle nominal est associé séquentiellement en superposant exactement l'élément de contact fixe ou mobile du modèle nominal avec l'élément de contact identifié sur la pièce réelle.

- (a) Le modèle nominal est associé uniquement à l'élément de contact A[CF]
- (d) Le modèle nominal est associé à A puis à B[CF].
- (e) Le modèle nominal est associé à A puis à B[CF] et enfin à C.
- (f) Le modèle nominal est associé à A en laissant un flottement puis à B[CF].

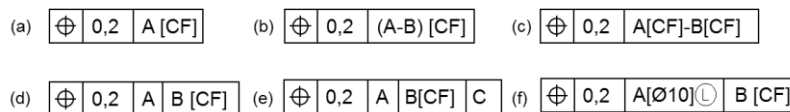


Figure 48 - Désignation des éléments de contact

NOTE : Pour associer l'élément de contact à la surface réelle, l'élément de contact ne peut bénéficier que des mobilités résiduelles laissées par les références prioritaire et des mobilités éventuelles de de la liaison portant

l'élément de contact. Certaines constructions ne sont donc pas robustes, en particulier si le système de références n'est pas isostatique. En effet, si l'étendue de l'élément de contact est indéterminée. Il n'est pas possible de définir un critère d'association.

## 5.2 Critères d'association

### 5.2.1 Simulation de l'élément de contact par un calibre

Un élément de contact fixe (Figure 49a) peut être simulé par un calibre physique qui sera identifié au contact de la pièce (Figure 49b). Si l'élément de référence est bombé, la position de l'élément de contact est incertaine. Il faut minimiser la distance maxi de l'élément de contact à la surface réelle, par exemple en plaçant deux cales de même épaisseur (Figure 49c). Pour assurer le contact avec les deux côtés d'une rainure par exemple, le calibre doit être expansible ou souple avec une déformation symétrique (Figure 49d). Cette déformation donne une surface offset de la surface de l'élément de contact nominal. Le modèle nominal est alors centré sur le calibre. Les surfaces réelles sont tangentes à une surface offset du calibre nominal).

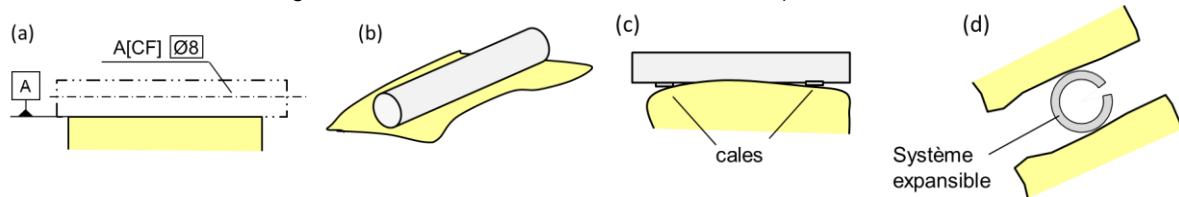


Figure 49 - Elément de contact linéique

NOTE : Un élément de contact mobile A[CF] respecte des contraintes de position ou d'orientation avec les autres références en exploitant les mobilités accordées pour être mis en contact avec la pièce réelle.

La simulation d'un calibre mobile impose un montage de contrôle simulant l'ensemble du système de références avec une cinématique précise pour guider le calibre. Le modèle nominal est positionné par rapport à ce montage.

Inversement, un élément de contact indépendant noté A<CF> est obtenu en posant directement le calibre sur la surface, sans respecter de contraintes de position ou d'orientation avec les autres références prioritaires.

### 5.2.2 Association de l'élément de contact par la mesure

L'élément de contact est décrit dans le modèle nominal. L'élément de contact est associé à l'élément de référence en déplaçant le modèle nominal. L'association est réalisée en considérant la zone potentielle de contact.

La ligne de contact nominale est la ligne de commune entre l'élément de contact et la surface de référence nominale.

La ligne de contact réelle est définie par l'ensemble des points de la surface réelle situés à la distance minimale de l'élément de contact, par exemple distance du point à l'axe du cylindre élément de contact. L'élément de contact est associé par le critère minimax à l'ensemble des points de la ligne potentielle de contact. (Figure 50a et b)

Dans certains cas, le contact théorique entre l'élément de contact et la surface de référence est réduite à un point. La surface de contact est le point de la surface réelle le plus proche de l'élément de contact (exemple : distance du centre de l'élément de contact sphérique à la surface réelle).

**REGLE :** Le critère d'association est le critère minimax entre l'élément de contact et la zone partielle de la surface réelle limitée à la zone de contact. Pour les contacts bilatéraux, si les mobilités ne permettent pas le contact entre l'élément de contact et la surface réelle, l'association est assuré avec une surface offset de l'élément de contact (Figure 50c).

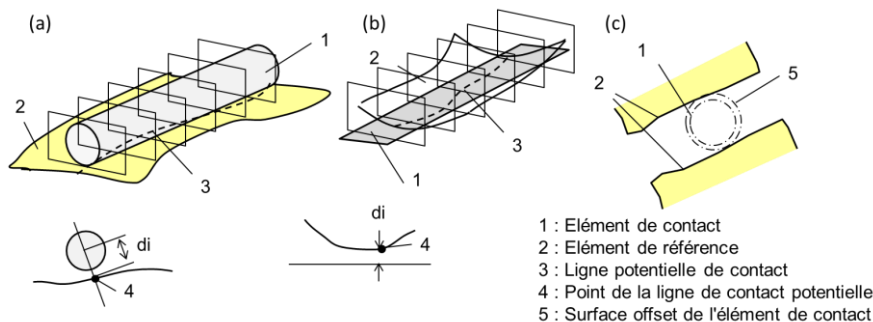


Figure 50 - Association d'une surface tangente à la surface réelle

NOTE : cette construction permet par exemple d'associer un élément de contact cylindrique à une surface nominalement cylindrique avec des axes non rigoureusement parallèles, ou avec un défaut de conicité.

### 5.2.3 Élément de contact dans la matière

L'élément de contact représente la surface de la pièce voisine en contact avec la pièce. Par définition, l'élément de contact ne doit donc pas être dans la matière. En effet, une telle construction pourrait être litigieuse, car il ne suffit pas de ne conserver que le nuage de points sans tenir compte du sens matière, en particulier pour respecter le critère tangent extérieur matière.

La Figure 51a pourrait représenter un élément de contact cylindrique tangent aux deux plans inclinés. Fonctionnellement, la liaison est assez instable et la pièce pivote autour du centre instantané de rotation (Figure 51b). Dans le cas d'un élément de contact intérieur matière, le principe consiste à associer une surface nominale tangente extérieure matière à la surface réelle au voisinage de chaque ligne de contact, puis déterminer l'élément de contact nominal tangent aux surfaces associées. Dans certains cas, la contrainte de tangente impose des contraintes entre les surfaces associées aux lignes de contact. Dans la Figure 51c, deux plans minimax sont associés aux deux faces latérales. L'élément de contact est le cylindre bi-tangent de diamètre nominal.

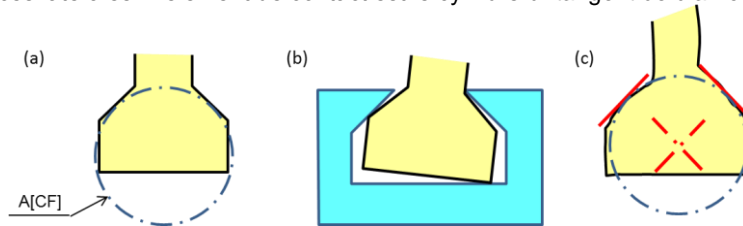


Figure 51 - Élément de contact dans la matière

NOTE : Lorsque cela est possible, il est préférable d'éviter cette cotation. Un élément de situation peut être une solution.

## 5.3 Élément de contact fixe

### 5.3.1 Élément de contact plan sur surface complexe

Le clip représenté Figure 52a sera en contact avec un plan et centré sur un pion. Dans la Figure 52b, le cadre de tolérance mentionne A[CF], qui indique que la référence A est associée à un élément de contact.

La référence A est une surface nominalement prismatique identifiée par une zone partielle A1 de largeur 60mm. La surface A est au contact avec un élément de contact plan identifié dans le modèle nominal et représenté par un trait mixte à double points et désigné par le nota A[CF]. La largeur en contact entre l'élément de contact et la surface A est limitée à la zone partielle de largeur 60mm.

La localisation de la surface composée des deux plans supérieurs du clip est définie par une surface nominale définie dans le modèle nominal.

Dans ce cas simple, la pièce peut être placée sur un calibre plan de largeur 60mm qui simule l'élément de contact. En cas de positions multiples, la position de référence est celle qui minimise la distance maximale entre le calibre est la surface réelle au voisinage des zones de contact. Cette condition peut être obtenue en plaçant 2 cales de même hauteur entre la pièce et le calibre pour équilibrer les écarts.

La référence A sera associée au plan du calibre. La localisation des plans supérieurs est définie par une dimension théoriquement exacte de 40 mm par rapport à cette référence.

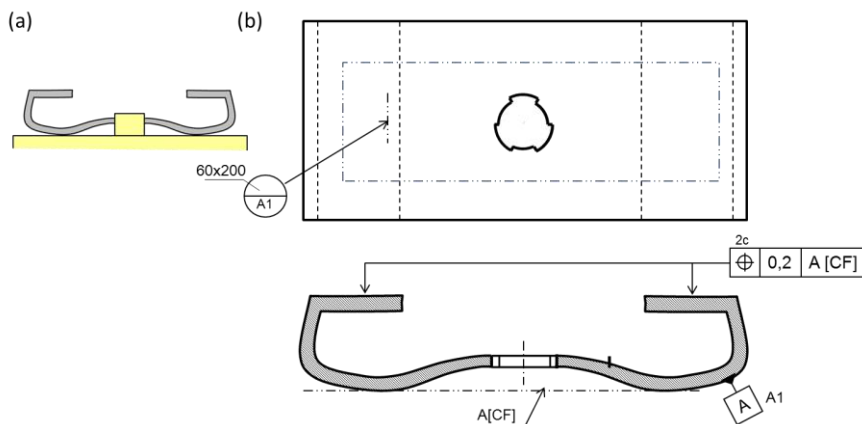


Figure 52 - Élément de contact en référence primaire

### 5.3.2 Système de références avec un élément de contact [CF]

La Figure 53 est identique à la Figure 52 avec une cotation plus complète.

- La perpendicularité (2) de B est définie par rapport à l'élément de contact plan A[CF]. La surface étant formée par 3 secteurs cylindriques, la perpendicularité est définie par une spécification de position par rapport à A[CF]. Le modèle nominal peut glisser sur le plan A[CF] défini sur la pièce.
- La symétrie (3) est définie dans le système de références A[CF] | B dans lequel A[CF] est un plan, B, un cylindre perpendiculaire au plan A[CF], associé par les moindres carrés aux trois secteurs cylindriques avec offset. Le modèle nominal peut glisser sur le plan A[CF] et tourner autour de l'axe de B pour que les deux plans latéraux soient dans la zone de tolérance [80]Ⓜ centrée sur le nominal.

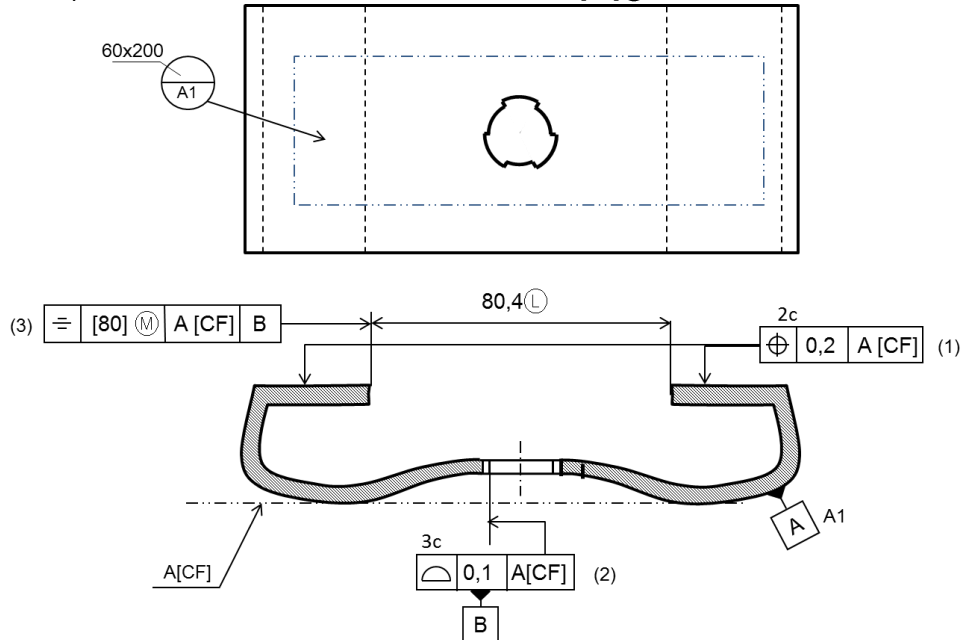


Figure 53 - Système de références avec [CF] en primaire

NOTE 1 : cet exemple montre que A[CF] est considéré comme un plan dans la construction du système de références A[CF]|B et que la construction de B se fait avec les règles habituelles.

## 5.4 Eléments de contact mobile

### 5.4.1 Mobilité d'un élément de contact

**DEFINITION :** Un élément de contact peut être mobile par rapport au modèle nominal pour s'adapter aux dimensions ou aux défauts géométriques de la pièce. Cette mobilité de l'élément de contact représente la mobilité ou la déformation de la pièce complémentaire dans le mécanisme.

Cette mobilité est décrite par une liaison cinématique dont la direction et le point représentatif sont parfaitement définis dans le modèle nominal (la représentation n'est pas une simple illustration graphique).

La Figure 54 représente les cas les plus courants :

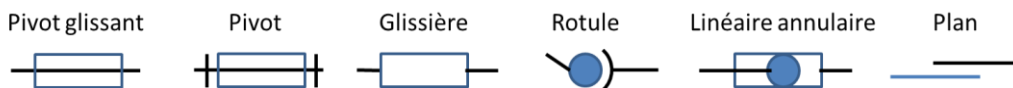


Figure 54 - représentation des mobilités des éléments de contact

NOTE 1 : si plusieurs solutions sont possible, choisir le modèle qui évite les redondances de degrés de liberté. Si nécessaire, la mobilité peut être décrite par un commentaire.

NOTE 2 : L'élément de contact A[CF] reste en position nominale, c'est l'élément associé qui se déplace en contact avec la pièce avec la liaison définie dans le modèle nominal.

NOTE 3 : les éléments de contact mobiles sont incompatibles avec les modificateurs de référence présentés en section 1 ([DV], ▷, référence partielles mobiles...), car il y a redondance des mobilités et incompatibilité des critères d'association.

### 5.4.2 Élément de contact secondaire mobile



La Figure 55 montre un poussoir guidé par une liaison cylindrique primaire et positionné axialement par un élément de contact dans une encoche.

- (a) L'élément de contact est une sphère couissant selon une liaison pivot.
- (b) L'élément de contact est un cylindre couissant selon une liaison pivot.
- (c) L'élément de contact est un cylindre couissant selon une liaison glissière.

Dans les cas (b) et (c), le poussoir est orienté autour de son axe primaire par le cylindre de contact.

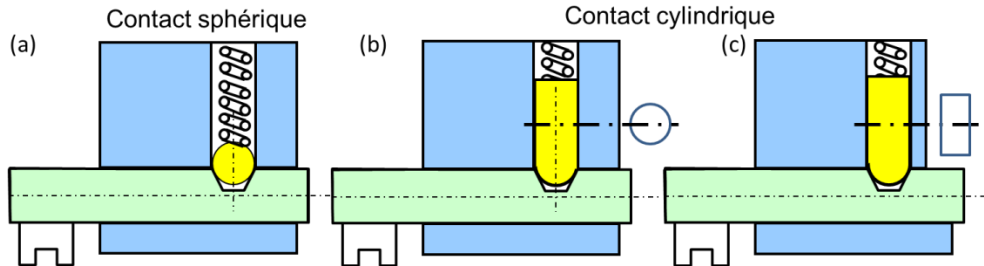


Figure 55 - Mise en position par une bille

La Figure 56 correspond à la cotation du mécanisme Figure 55a. Pour la localisation (1) :

- L'élément de référence tertiaire C est formé par les deux faces de l'encoche.
- L'élément de contact C[CF] est une sphère  $\varnothing 10$  placée dans l'encoche.

La sphère est positionnée dans son encoche à l'aide de la liaison glissière représentée par une droite passant par le centre de la bille.

Pour la localisation (1) de la fourche :

- Référence primaire : cylindre nominal centré sur le cylindre  $\varnothing 11,94$  flottant dans la matière de l'élément de référence A.
- Référence secondaire : deux plans nominaux centrés sur deux plans distants de  $4,9$  flottant dans la matière de élément de référence B.
- Référence tertiaire C[CF] : Sphère  $\varnothing 10$  en position nominale telle que la sphère associée soit en contact avec l'élément de référence C, par une translation dans la direction nominale.
- La rainure spécifiée doit être dans une zone de tolérance extérieure aux deux plans distants de  $10,1$  centrée sur les plans nominaux.

Le montage de contrôle est réalisé avec un alésage recevant A, une encoche recevant B et une bille  $\varnothing 10$  mobile selon la direction de la prismatique. Deux comparateurs sont placés sur chaque face de la rainure spécifiée. Ces comparateurs sont mis à « 0 » à l'aide d'une pièce calibrée avec A et B au minimum de matière et une rainure au maximum de matière.

La localisation (2) permet de spécifier la profondeur de l'encoche en localisant le centre de la sphère associée à C[CF] par rapport à A lorsqu'elle est en contact avec la pièce.

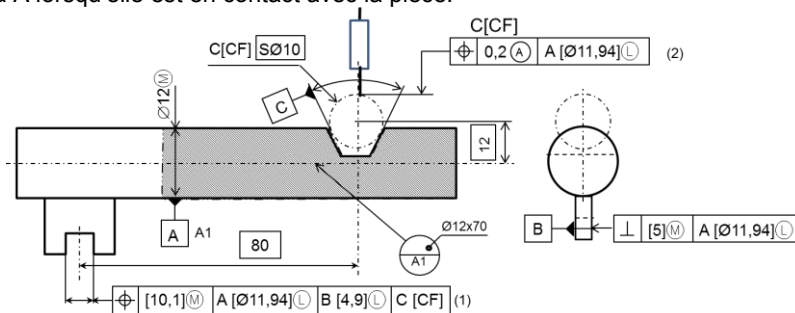


Figure 56 - Elément de contact secondaire

NOTE : l'évaluation de la localisation (1) par la mesure est délicate, car les références A et B sont au minimum de matière. Il y a flottement, ce qui rend difficile l'identification du point potentiel de contact.

Une solution consiste à associer deux plans avec le critère minimax aux deux faces de l'encoche. Le centre de la bille peut se trouver sur la droite intersection de deux plans décalés de 5mm par rapport aux plans associés. Le centre de la bille est formé par l'intersection de cette droite avec le plan médian de B.

### 5.4.3 Elément de contact formant une référence commune

La Figure 57 représente une plaque avec une référence primaire définie dans le modèle nominal par un point A1 sur la surface A et par un élément de contact cylindrique  $\varnothing 8$  dont l'axe est décalé de 4 mm par rapport au plan

nominal A. Cet élément est en contact avec les deux plans B et C. La référence secondaire est définie par deux zones partielles D1 et D2 sur le côté de la pièce.

Pour lever l'hyperstatisme et assurer l'orientation de la pièce par D1, D2, l'élément de contact (B-C)[CF] est articulé sur une liaison pivot dont l'axe est défini dans le modèle nominal perpendiculairement à l'axe de l'élément de contact.

La spécification de forme (1) est appliquée à la surface A complète ainsi qu'aux deux faces du vé B et C pour maîtriser la profondeur du vé par rapport au plan A et l'angle du vé.

La localisation (2) comporte une référence primaire constituée en zone commune de la zone partielle A1 et du cylindre (B-C)[CF] monté sur une pivot et une référence secondaire classique.

Le système de références peut être simulé avec un montage de contrôle muni d'un cylindre pivotant et d'un appui ponctuel pour A1.

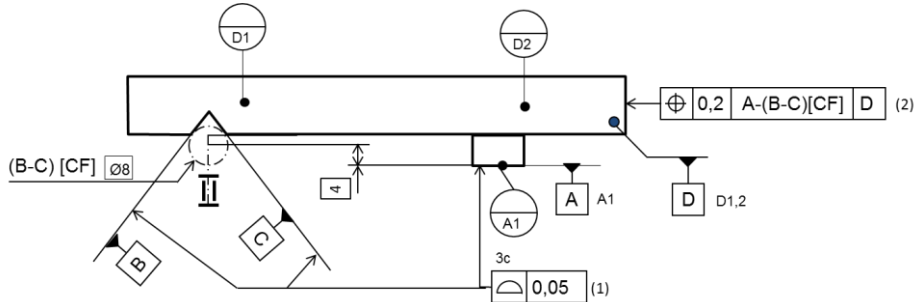


Figure 57 – Élément de contact mobile

La gamme de mesure illustrée Figure 58a consiste à identifier le point A1 et des points sur les deux plans B et C du vé. La droite  $\Delta$  est l'intersection des deux plans offset des plans minimax associés aux surfaces B et C avec un décalage de 4mm.

Le modèle nominal doit être positionné tel que :

- Le plan nominal de A passe par le point A1,
- Le plan nominal parallèle au plan A à 4mm de A (qui contient l'axe nominal de l'élément de contact) passe par la droite  $\Delta$ ,
- Le plan D passe par les points D1 et D2.
- L'axe nominal de la liaison pivot coupe la droite  $\Delta$

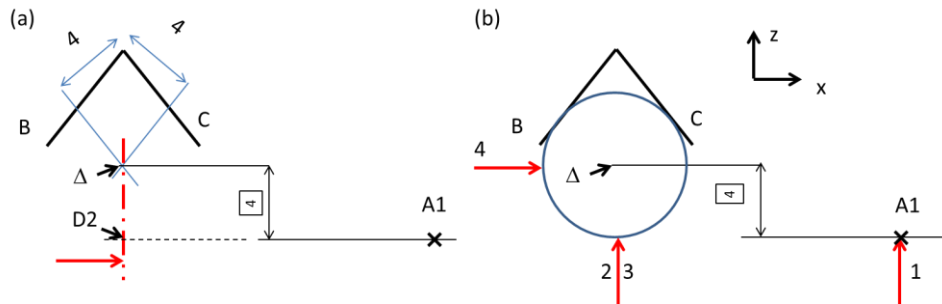


Figure 58 - Gamme de mesure avec CF cylindrique

Une autre gamme de mesure plus simple est illustrée Figure 58b. Elle consiste à placer un cylindre Ø8 dans le vé et à identifier le plan A-(B-C)[CF] par le point A1 et deux points notés 2 et 3 sur la génératrice inférieure du cylindre. L'orientation de la pièce est définie par un plan perpendiculaire à A-(B-C)[CF] passant par les points D1 et D2. La position suivant x du nominal est définie par un point de la génératrice du cylindre en face de la liaison pivot.

NOTE : Cet exemple montre qu'il est important qu'une référence utilisant un [CF] soit décrite par un système isostatique. En effet, si la zone partielle A1 avait été une petite zone, il aurait fallu utiliser un critère minimax sur ce plan en imposant au plan parallèle distant de 4mm à passer par l'axe de l'élément de contact (ou par  $\Delta$ ).

#### 5.4.4 Éléments de contact mobiles synchrones

**REGLE :** les éléments de contact mobiles synchrones sont identifiés par l'indication [CFi]. Les éléments de contact avec le même chiffre i sont synchrones.

Les éléments de contact sont positionnés sur la surface nominale. La surface associée est de même nature que l'élément de contact, avec un paramétrage en translation et en orientation identique pour chaque élément de contact.

La Figure 59a présente une pièce centrée par appuis plans avec déplacements concentriques. Chaque plan est placé sur une liaison glissière. Les axes de glissières sont coplanaires et à  $120^\circ$ .

En position nominale, les 3 éléments de contact plans sont tangents à la surface nominale. L'association à la pièce réelle est réalisée en associant les trois éléments de contact avec un décalage  $\delta$  identique avec un critère minimax.

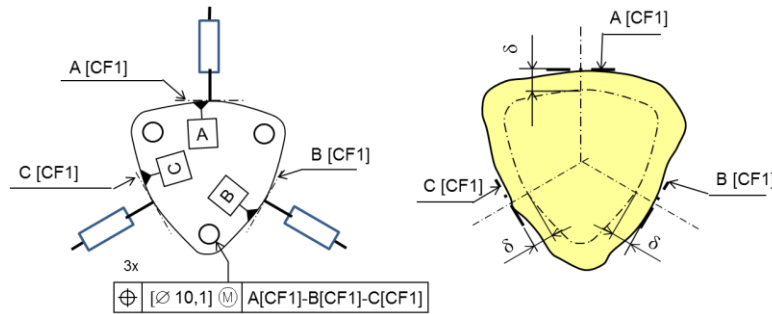


Figure 59 –Éléments de contact mobiles synchrones

## 5.5 Éléments de contact hyperstatiques

### 5.5.1 Limite des éléments de contact hyperstatiques

La Figure 60a présente un cylindre en contact linéique avec 3 éléments de contact plans montés sur des glissières de directions perpendiculaires à l'axe du cylindre. Inévitablement, en raison des défauts de conicité ou de forme, les plans ne pourront pas être simultanément et totalement en contact avec le cylindre réel. L'orientation par rapport aux 3 plans est donnée par le critère minimax.

La Figure 60b présente une pièce avec deux éléments de contact cylindriques indépendants. De tels cylindres ne sont ni parallèles, ni coplanaires et de longueur indéterminées. Il est difficile d'établir une règle générale pour construire une référence avec ces deux cylindres

L'emploi des éléments de contact est souvent délicat si le système obtenu n'est pas isostatique. Il faut rendre la conception plus robuste, modéliser les liaisons par un montage isostatique ou définir des conditions de mesure.

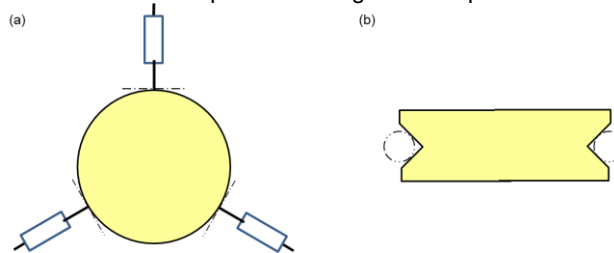
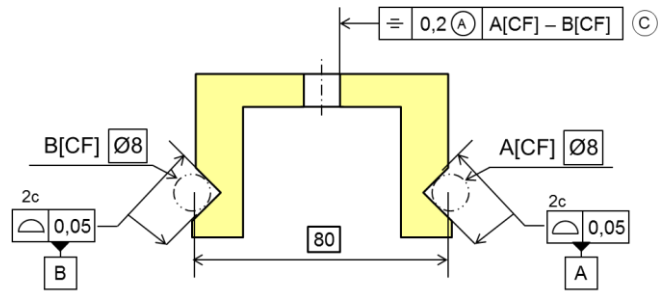


Figure 60 - Contacts hyperstatiques à éviter

### 5.5.2 Redressement de la pièce par les éléments de contact

La pièce Figure 61 est déformable. Les conditions de mesure imposent de plaquer la pièce sur les éléments de contact. Pour la symétrie, la référence est donc définie sur les éléments de contact en position parfaite.



Conditions de mesure : la pièce est plaquée sur 2 cylindres Ø8 parallèles et distants de 80.

Figure 61 - Élément de contact utilisé comme condition de mesure

## 5.6 Éléments de contact libres

### 5.6.1 Définition

Les éléments de contact libres sont principalement utilisés pour définir un élément spécifié particulier représentant la pièce voisine en contact.

L'utilisation d'un élément de contact libre pour définir une référence est possible, mais uniquement s'il y a unicité de la définition de la référence.

REGLE : un élément de contact libre est identifié par l'indication A<CF>. La spécification doit être respectée pour toutes les positions possibles de l'élément de contact sur la surface spécifiée A.

Si plusieurs éléments de contact sont associés à la même surface A, les éléments de contact sont notés A<CF1>, A<CF2>.....

### 5.6.2 Spécification sur un élément de contact libre

La Figure 62 présente une spécification sur un pignon. La dent complémentaire est représentée par une bille qui modélise le contact au niveau du diamètre primitif. Le battement sur bille vérifie le centrage de la denture par rapport à une référence.

Le défaut de forme (1) s'applique pour chacune des paires de flancs (sans référence). B est donc l'ensemble des 26 flancs de denture.

Le battement (2) impose de placer une bille Ø8 entre les dents de B. Les points au sommet de la bille doivent être compris entre deux cylindres centrés sur A dont la différence de rayon est 0,08. Ceci implique de placer la bille en tous les points entre deux dents pour tous les creux de dents.

NOTE 1 : Il aurait été délicat de définir un élément de contact cylindrique, car le contact cylindre/creux de dents ne peut pas être parfait. L'association aurait généré une importante incertitude de mesure.

La spécification de position (3) des deux flancs de denture par rapport à A est répétée 13 fois. Il y a 13 surfaces C (une pour chaque paire de flancs entre deux dents consécutives).

NOTE : Il aurait été ambigu de définir l'élément de contact sur C, car chaque élément est indépendant. Le battement aurait pu se comprendre comme 13 battements mesurés séparément le long du creux entre 2 dents.

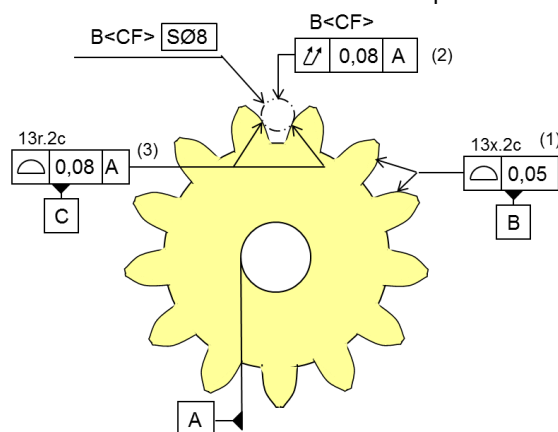


Figure 62 – Battement d'un pignon

La Figure 63 illustre la mesure traditionnelle du déport de denture à l'aide d'une « cote sur piges ». La surface B est l'ensemble des 26 flancs de denture. B<CF1>, B<CF2>, B<CF3> représentent 3 piges Ø8 placées dans les creux de denture. La cote conventionnelle (2) est répétée 13 fois. Elle est définie entre les 3 piges. Dans chaque section perpendiculaire à la denture, la distance entre une pige et les deux piges en face doit être dans l'intervalle de tolérance.

NOTE : Les 2 piges B<CF1> et B<CF2>, ne sont pas parallèles.

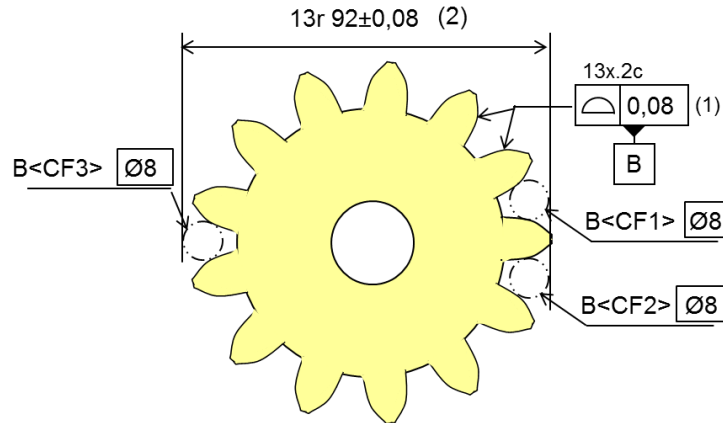


Figure 63 - cote sur piges

### 5.6.3 Référence sur un élément de contact libre

La Figure 64 présente une cotation évoluée correspondant à la Figure 63, mais réalisée avec des billes. La surface B décrite par (1) est l'ensemble des 26 flancs de dents, mais limitée à une section définie une zone partielle linéique B1 se déplaçant entre les lignes P et Q. B<CF1>, B<CF2>, B<CF3> représentent 3 billes Ø8 placées dans les creux de denture dans chaque section.

La localisation (2) est répétée pour chacun des 13 motifs constitués par les 13 creux de dents. Pour chaque motif, la localisation est définie sur l'élément de contact B<CF3> construit dans la même section en P et Q.

La référence (B<CF1>-B<CF2>)[DV] est définie à partir des deux centres des billes, à distance variable. La référence est donc centrée entre les billes.

NOTE : Il aurait été possible d'utiliser des éléments de contact cylindriques qui auraient été tangents à la ligne intersection B1 dans chaque creux de dents. La difficulté aurait été de simuler ces éléments de contact avec des cylindres réels.

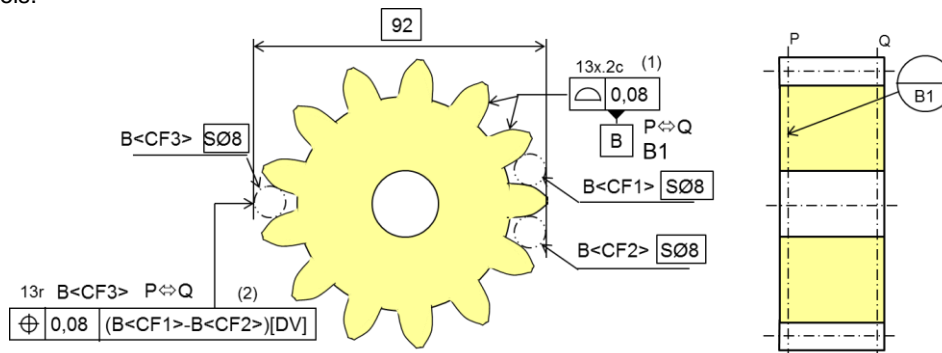


Figure 64 - Référence sur billes dans une section glissante

### 5.6.4 Limitation

Les éléments de contact libres sont en position quelconque par rapport aux références prioritaires. Il est donc souvent difficile de définir un système de références.

La Figure 65 comporte un plan primaire A et un élément de contact libre dans la surface B composée de deux plans. L'élément de contact est un cylindre qui ne sera pas parallèle à A. Il est impossible de construire une référence secondaire avec ce cylindre car la longueur est indéterminée. (L'association par les moindres carrés est impossible à réaliser).

Dans ce cas, il est préférable de définir un élément de contact avec une mobilité dans un plan perpendiculaire à A.

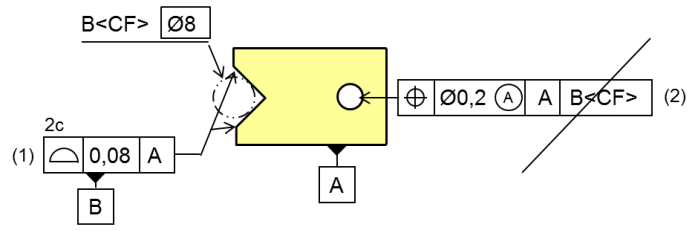


Figure 65 - Référence mal définie

# ANNEXE C :

## Applications références complémentaires

---

### SOMMAIRE

1.	Références partielles .....	2
1.1	Position des zones partielles.....	2
1.2	Références partielles sur un cylindre .....	2
1.3	Références partielles isostatiques 6 points .....	3
2.	Système de références .....	5
2.1	Liaison symétrique avec deux cylindres secondaires.....	5
2.2	Liaison avec lumière ou locating tertiaire .....	9
2.3	Liaison de pièces avec cylindre tertiaire.....	13
2.4	Liaison de pièces avec prismatique tertiaire .....	17
2.5	Références sur un appui sphérique .....	19
2.6	Système de références pour les tolérances générales .....	20
2.7	Translation de repère .....	21
3.	Références partielles mobiles .....	23
3.1	Mobilité équivalente à une variation de distance.....	23
3.2	Référence partielle mobile orientante.....	25
3.3	Référence glissante .....	25
4.	Références communes hybrides.....	26
4.1	Association par les moindres carrés .....	26
4.2	Association avec flottement .....	27
4.3	Association avec des éléments de situation.....	28
5.	Spécifications avec élément de situation .....	28
5.1	Construction d'une référence dans un système .....	28
5.2	Élément de situation défini dans le système de références .....	29
5.3	Élément de situation indépendant.....	32
6.	Référence avec élément de contact.....	34
6.1	Élément de contact à l'état libre .....	34
6.2	Élément de contact mobile .....	37
6.3	Élément de contact à l'état libre et à l'état contraint .....	39
7.	Références en zones projetées .....	40
7.1	Projection dans un groupe de cylindres coaxiaux.....	40
7.2	Composition avec des zones projetées.....	41
7.3	Référence sur des centres de rotulage .....	45

# 1. Références partielles

## 1.1 Position des zones partielles

Les zones partielles sont définies dans le modèle nominal. Les zones partielles utilisées comme référence sont positionnées en associant le modèle nominal au plus long système de références utilisant cette référence partielle. Ce système de références doit bloquer tous les degrés de liberté pour positionner les zones partielles. Les degrés de liberté résiduels éventuels doivent laisser les zones partielles invariantes.

Dans le cas contraire, la cotation de la pièce est sans doute incohérente ou incomplète. A titre d'exemple, la fixation d'une pièce parfaitement de révolution dans un mandrin 3 mors est indiscutablement réalisée à l'aide de 3 zones partielles à 120°. Cependant, lorsque la pièce est démontée de la machine, il est impossible d'identifier la position de ces zones partielles pour effectuer le contrôle. Il est impossible de repositionner la pièce de la même façon sur la machine. Le contrôle par les zones partielles n'a aucun sens car rien ne garantit que dans les phases suivantes ou qu'en fonctionnement, la pièce sera repositionnée selon la position qui a permis de valider la conformité de la pièce. Dans un tel cas, la référence doit être définie sur toute la surface cylindrique. Le choix par le fabricant d'utiliser un mandrin 3 mors constitue un risque pour respecter le contrat de phase.

Par contre, un simple trait tracé sur la pièce ou une orientation par une surface non de révolution est suffisante pour positionner ces zones partielles.

Lorsque le système de références le plus long laisse des degrés de liberté, le modèle nominal doit être orienté approximativement avec en priorité le contour de la face portant la zone partielle et ensuite avec toute surface pertinente de la pièce.

## 1.2 Références partielles sur un cylindre

### 1.2.1 Références partielles sur un secteur cylindrique

La Figure 1 illustre une référence sur un cylindre identifiée par quatre zones partielles ponctuelles.

Cette référence A est utilisée dans le système de références A|B|C de la spécification (1).

Le modèle nominal est associé au système de références A|B|C, pour permettre de positionner les points de ces zones partielles.

NOTE : Le modèle nominal est associé de manière approximative pour localiser les 4 points A1 à A4 et construire le système de références. Une itération est éventuellement possible pour affiner la position des points mais celle-ci aura une influence négligeable sur l'évaluation des autres spécifications.

Les points réels sont prélevés au voisinage des quatre points nominaux.

NOTE : les droites passant par les points réellement mesurés ne sont pas forcément rigoureusement parallèles et ne peuvent pas être des génératrices du cylindre.

L'angle du secteur angulaire englobant les 4 points étant 90°, la référence sera le cylindre nominal associé par le critère des moindres carrés, sans offset (Le rayon nominal doit être mesuré sur la CAO ou indiqué sur le dessin).

L'association est réalisée avec les relations suivantes :

- Minimiser  $S = \sum_{i=1}^n (ei)^2$  (n est le nombre de points)
- $ei$  est l'écart du point à la surface nominale associée :  $ei = \overline{NiMi} \cdot \vec{n}$

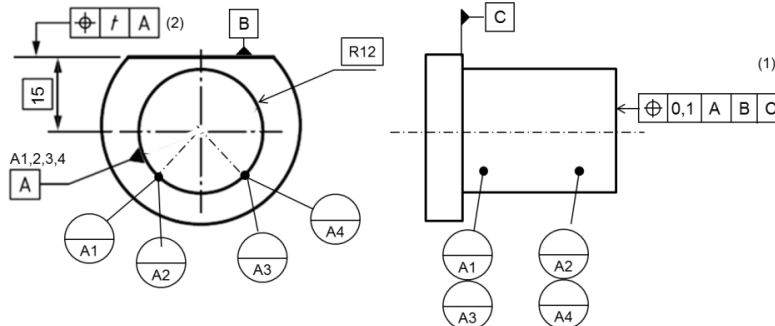


Figure 1 - Références partielles sur un secteur cylindrique

NOTE 1: La méthode permet de palper plusieurs points au voisinage de chaque zone partielle ponctuelle, à condition de prendre le même nombre de points par zone partielle pour avoir une répartition uniforme. La définition serait la même si les zones partielles étaient des petits secteurs cylindriques au voisinage des lignes A1 et A2.



NOTE 2 : Pour la spécification (2), le modèle nominal est centré sur l'axe de A. La zone de tolérance est le plan nominal situé à 15 mm de A. La mobilité résiduelle autour de A permet d'orienter le modèle pour placer si la surface réelle tolérancée dans la zone de tolérance.

### 1.2.2 Références partielles sur un cylindre

La Figure 2 illustre une référence primaire A sur une surface cylindrique et un plan secondaire B. On suppose que le dessin comporte un système de références A|B (comme pour la Figure 1).

Dans la Figure 2a, la référence est le cylindre A complet.

Dans la Figure 2b, la référence est établie avec 6 zones partielles ponctuelles qui sont des points palpés sur la surface réelle. La position des points est indexée par rapport à la référence B.

Dans les deux cas, la référence sera le cylindre nominal associé par le critère des moindres carrés, avec offset (l'axe obtenu est indépendant du rayon nominal du cylindre).

La Figure 2c est définie avec des zones partielles mobiles ayant la même lettre. La définition est rigoureusement la même, car l'offset sera bien identique pour tous les points.

NOTE : Les deux écritures (b) et (c) sont donc rigoureusement équivalentes. L'écriture (c) met en évidence qu'il est nécessaire d'avoir un réglage des appuis pour assurer le contact sur les 6 points dans un montage.

L'association est réalisée avec les relations suivantes :

- Minimiser  $S = \sum_{i=1}^n (ei)^2$  (n est le nombre de points)
- $ei$  est l'écart du point à la surface nominale associée :  $ei = \overrightarrow{NiMi} \cdot \vec{n}_i - \delta$

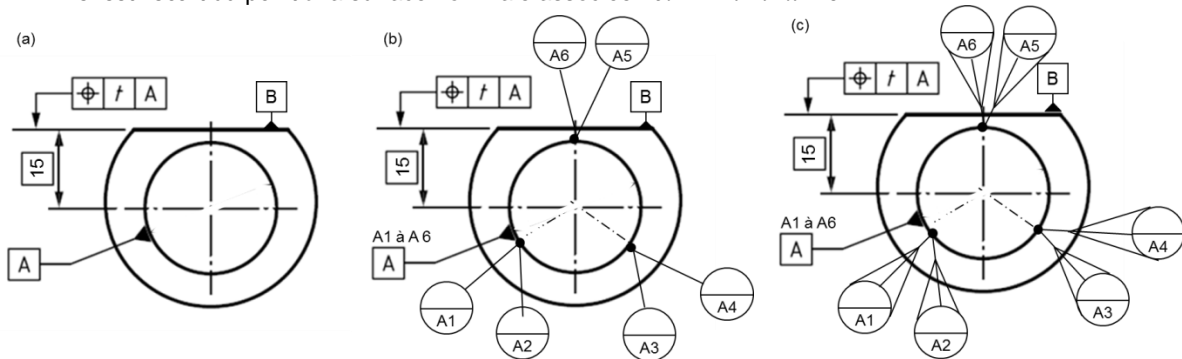


Figure 2 - Références sur un cylindre complet

### 1.3 Références partielles isostatiques 6 points

#### 1.3.1 Référence simple

La Figure 3 illustre une surface nominale complexe établie à partir de 6 zones partielles appartenant à des surfaces différentes. La référence A est suffisante pour définir une liaison complexe qui bloque tous les degrés de liberté.

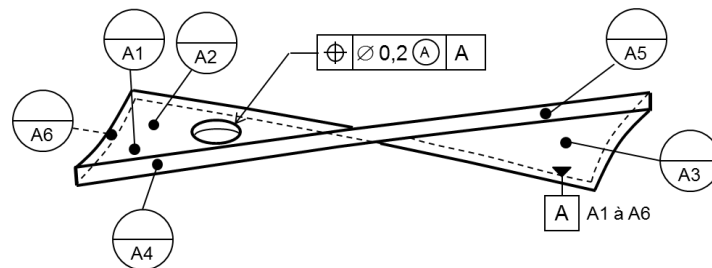


Figure 3 - Références spécifiées simples établies sur 6 zones partielles

Chaque zone partielle A1 à A6 sera identifiée sur la pièce réelle par un point ou plusieurs points au voisinage du point nominal. La surface étant fermée, la surface nominale sera associée par le critère des moindres carrés. Le modèle nominal complet de la pièce étant positionné par ces zones partielles, l'axe nominal de l'alésage spécifié est parfaitement identifié. La zone de tolérance de la localisation est centrée sur cet axe nominal.

L'association est réalisée avec les relations suivantes :

- Minimiser  $S = \sum_{i=1}^n (ei)^2$  (n est le nombre de points)
- $ei$  est l'écart du point à la surface nominale associée :  $ei = \overrightarrow{NiMi} \cdot \vec{n}_i$

Avec la mesure de 6 points, l'association est isostatique et revient à annuler les distances des 6 points au modèle nominal  $ei = \overline{NiMi} \cdot \vec{n} = 0$ .

S'il y a plus plusieurs points par zones partielles, pour avoir une répartition uniforme, il est nécessaire de mesurer un nombre identique de points dans chaque zone partielle. Il peut y avoir plus de 6 zones partielles.

La méthode sera la même, quelles que soient les étendues des zones partielles.

### 1.3.2 Référence commune

La Figure 4 est rigoureusement équivalente à la Figure 3 car la référence commune est définie simultanément par les point A1, 2, 3 ; B1,2 ; C1, c'est-à-dire les 6 zones partielles identiques à celles de la Figure 3.

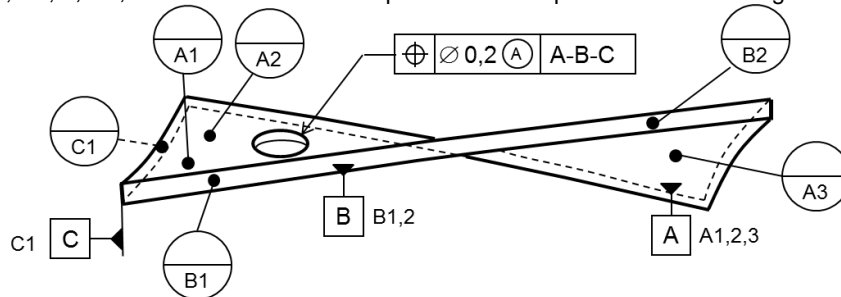


Figure 4 - Références spécifiées simples établies sur 6 zones partielles

Remarque : Il serait impossible de définir un système de références qui imposerait une définition séquentielle des références A B et C (Figure 5). En effet, les 3 points A1, 2, 3 ne sont pas suffisants pour définir de manière univoque la surface gauche qui n'est pas invariante lorsque la surface glisse sur ces 3 points.

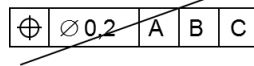


Figure 5 - Système de références incompatible

La Figure 6 représente un mécanisme mis en position sur 3 petits plans A1, A2 et A3, se comportant comme des appuis ponctuels. Un centrage court sur la zone partielle A4 et un appui bilatéral sur les deux linéiques A5 et A6 complètent la mise en position. Les références partielles A5 et A6 sont mobiles pour lever l'hyperstatisme.

Pour la localisation (2), la référence A est une surface nominale complexe associée par les moindres carrés à l'ensemble des points des 6 zones partielles. L'association est réalisée avec un offset variable sur A4 et un autre offset identique pour A5 et A6 considérés comme des appuis surfacique.

NOTE : Cette association est donc indépendante du choix des dimensions nominales des cylindres.

La spécification de forme (1) garantit la position relative des surfaces, en incluant des conditions au maximum et au minimum de matière des deux cylindres car la zone de tolérance est bilimite. Il est également possible d'imposer une spécification de position (2) d'une zone partielle par rapport au système de références pour garantir la qualité du contact et limiter la déformation de cette face lors de l'assemblage.

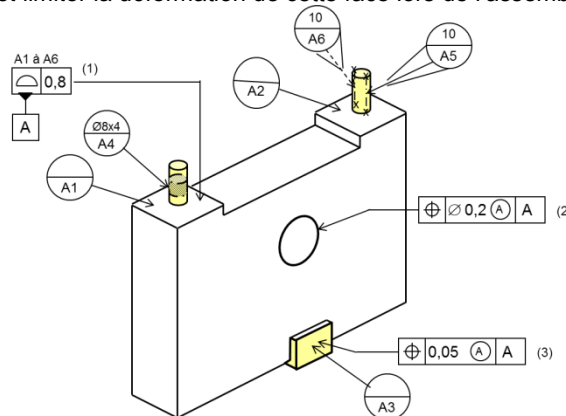


Figure 6 - Référence commune hétérogène

NOTE 1 : les étendues de chaque zone partielle étant petites au regard des dimensions de la pièce, le montage est quasi isostatique. La méthode des moindres carrés va tendre à minimiser les distances entre le modèle nominal et chaque zone partielle réelle, mais le modèle nominal ne sera pas tangent extérieur matière aux plans. Les jeux avec les cylindres ne seront pas exploités. Une solution pratique consiste souvent à limiter l'identification de chaque face à un seul point.

NOTE 2 : pour la spécification (2), le système de références idéal pourrait être une référence commune avec des modificateurs au minimum de matière sur les cylindres et des contraintes « tangent extérieur matière » sur les petites faces planes, mais sans critère de minimisation de l'écart maxi ou par les moindres carrés. Le système de référence serait flottant et beaucoup plus difficile à établir avec les moyens de métrologie. Un gabarit de contrôle serait nécessaire.

## 2. Système de références

### 2.1 Liaison symétrique avec deux cylindres secondaires

#### 2.1.1 Cas particulier

Attention, dans un souci de simplification, les exemples traités dans cette section comportent des alésages spécifiés placés au milieu des deux centreurs. De ce fait, le flottement permis par le jeu est identique dans toutes les directions. La zone de tolérance étendue est un cylindre. Dans le cas général, l'élément spécifié est une surface quelconque et le flottement  $f_P$  doit être déterminé en chaque point de la surface spécifiée selon une direction normale à la surface ou, si l'élément tolérancé est un axe, dans toutes les directions normales à cet axe.

#### 2.1.2 Liaison symétrique entre pièces rigides avec jeu

La Figure 7a représente un assemblage composé de deux pièces rigides. La pièce supérieure est en appui plan sur A, centrée dans les deux alésages B. Les centreurs sont réalisés dans la base.

Le jeu entre B et E doit compenser les éventuels écarts d'entraxes entre les deux pièces.

L'exigence est la position relative des deux alésages G et T au centre des deux pièces.

Les localisations (1) et (2) au maximum de matière assurent la montabilité des deux pièces avec un jeu mini de 0,02 (Figure 7b).

La localisation (3) assure la position de l'alésage central G par rapport à A|B :

- Élément tolérancé : alésage G (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : deux cylindres nominaux centrés sur deux cylindres  $\varnothing 10,08$  flottants dans la matière des éléments de référence B (Figure 7d).
- Surface nominale : axe du cylindre nominal G.
- Zone de tolérance : zone extérieure au cylindre  $\varnothing 12$  centré sur l'axe nominal.
- Le gabarit de contrôle comporte un plan et deux pions  $\varnothing 10,04$ . Le calibre de contrôle comporte un plan et deux alésages  $\varnothing 10,08$ . L'alésage G étant entre les deux centrages B, le flottement de G est égal à la au jeu maxi soit 0,04. La zone de tolérance étendue pour G a un diamètre  $\varnothing 12 - 0,04 = 11,96$ . La surface réelle G doit être dans la zone de tolérance  $\varnothing 11,96$  quelle que soit la position de la pièce sur le gabarit de contrôle.

La localisation (4) assure de même la position de l'alésage central T par rapport à D|E (Figure 7c).

Le flottement total maximal permis par les zones de tolérance sur les références B et E est de  $10,08 - 9,98 = 0,1$ .

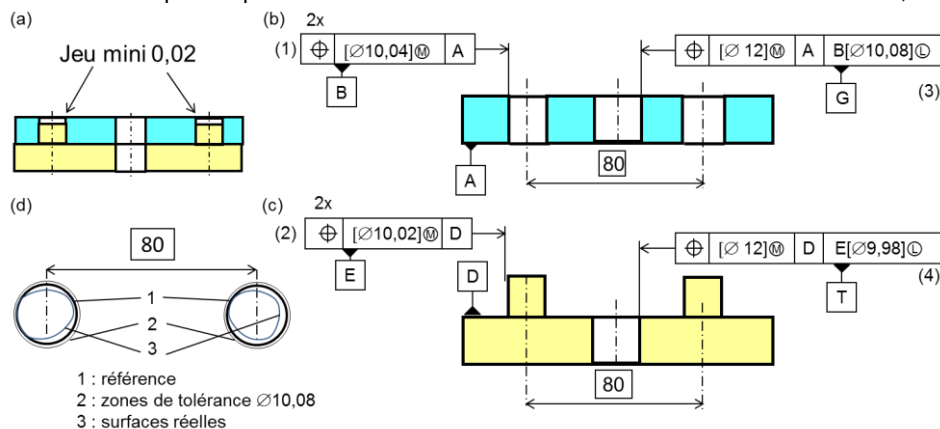


Figure 7 - Liaison symétrique avec jeu

#### 2.1.3 Liaison avec jeu entre pièces rigides avec pions serrés dans la base

La Figure 8 représente un assemblage composé de deux pièces rigides. La pièce supérieure est en appui plan sur A, centrée dans les deux alésages B. Les pions sont serrés dans la base.

Le jeu entre B et E doit compenser les éventuels écarts d'entraxe entre les deux pièces et l'inclinaison des pions, même avec des pions de diamètre maximal.

L'exigence est la position relative des deux alésages G et T au centre des deux pièces.

Les pions sont livrés en respectant des dimensions au maximum et au minimum de matière (1).

Les diamètres des alésages (2) garantissent un serrage maximum  $10 - 9,95 = 0,05$ , et un serrage minimum  $9,98 - 9,97 = 0,01$ .

La localisation (4) permet aux pions de diamètre maximum d'occuper un espace  $\varnothing 10 + 10,02 = 10,02$ .

La localisation (3) au maximum de matière assurent la montabilité des deux pièces en laissant libre un espace  $\varnothing 10,04$ .

La localisation (5) assure la position de l'alésage central G par rapport à A|B :

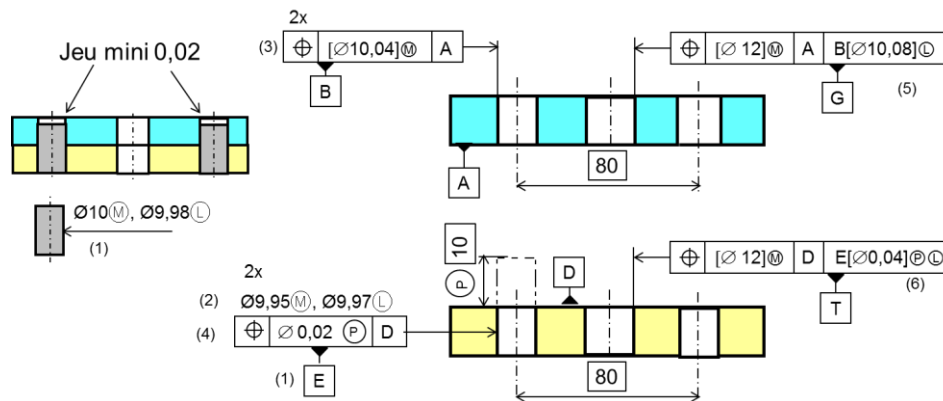
- Élément toléré : alésage G (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : deux cylindres nominaux centrés sur deux cylindres  $\varnothing 10,08$  flottants dans la matière des éléments de référence B.
- Surface nominale : axe du cylindre nominal G.
- Zone de tolérance : zone extérieure au cylindre  $\varnothing 12$  centré sur l'axe nominal.
- Le gabarit de contrôle comporte un plan et deux pions  $\varnothing 10,04$ . Le calibre de contrôle comporte un plan et deux alésages  $\varnothing 10,08$ . L'alésage G étant entre les deux centrages B, le flottement de G est égal à la au jeu maxi soit  $0,04$ . La zone de tolérance étendue pour G à un diamètre  $\varnothing 12 - 0,04 = 11,96$ . La surface réelle G doit être dans la zone de tolérance  $\varnothing 11,96$  quelle que soit la position de la pièce sur le gabarit de contrôle.

La localisation (6) assure de même la position de l'alésage central T par rapport à D|E.

Le contrôle peut donc être effectué de 2 manières :

- Fixer des pions de diamètre  $9,98$  dans les alésages B. Placer la pièce sur un gabarit de contrôle avec des alésages  $\varnothing 10 + 0,02 = 10,02$ . Le flottement est donc  $10,02 - 9,98 = 0,04$ , ce qui est conforme à la tolérance sur la référence de la localisation (6). (Figure 8). L'alésage spécifié doit rester dans la zone de tolérance étendue  $\varnothing 12 - 0,04 = 11,96$  quelle que soit la position de la pièce permise par le jeu.
- Le principe est identique, en diminuant le diamètre des pions virtuellement de  $9,98$  à  $0$ . Le gabarit doit posséder des alésages de  $10,02 - 9,98 = 0,04$ . Cette valeur correspond à la tolérance  $0,02$  dans la plage de projection de (4) à laquelle s'ajoute le jeu maxi admis entre le pion le plus gros ( $\varnothing 10$ ) et le plus petit ( $\varnothing 9,98$ ). Quelle que soit la position de la pièce telle que les deux axes des deux alésages B soient dans la zone de tolérance  $\varnothing 0,04$ , l'alésage spécifié doit rester dans la zone de tolérance étendue  $11,96$ .

Le flottement total maximal permis par les zones de tolérance sur les références B ( $\varnothing 10,08$ ) et E ( $\varnothing 9,98$ ) est de  $0,1$ .



## 2.1.4 Liaison symétrique entre pièces rigides avec serrage

La Figure 9a représente un mécanisme composé de deux pièces rigides. La pièce supérieure est en appui plan sur A, centrée dans les deux alésages B. Les centreurs rigides sont réalisés dans la base.

Ce type de montage est difficile à réaliser, car il n'y a pas de jeu. La pression est répartie tout autour des centreurs (Figure 9d). La déformation élastique des alésages doit compenser les éventuels écarts d'entraxes entre les deux pièces.

L'exigence est la position relative des deux alésages G et T au centre des deux pièces.

Les localisations (1) et (2) au maximum de matière assurent la montabilité des deux pièces avec un serrage maxi de  $10,06 - 10 = 0,06$  (Figure 9b).

Les dimensions au minimum de matière (3) et (4) impose un serrage mini  $10 - 9,98 = 0,02$  de chaque centreur dans son alésage.

La localisation (5) assure la position de l'alésage central G par rapport à A|B. La pression entre les centreurs E et les alésages C donnent une position d'équilibre statique qui correspond au critère des moindres carrés.

- Élément tolérancé : alésage G (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : deux cylindres nominaux distants de 80 associés par les moindres carrés aux éléments de références réels B (Figure 9d).
- Surface nominale : axe du cylindre nominal G.
- Zone de tolérance : zone extérieure au cylindre  $\varnothing 12$  centré sur l'axe nominal.
- L'alésage central réel G doit être contenu dans sa zone de tolérance.

NOTE : il est inutile de faire varier les diamètres des cylindres associés si la surface en contact entoure bien des alésages de manière symétrique.

La localisation (6) assure de même la position de l'alésage central T par rapport à D|E. Il n'y a pas de flottement.

Les cylindres nominaux distants de 80 sur chaque pièce sont simplement superposés lors de l'assemblage.

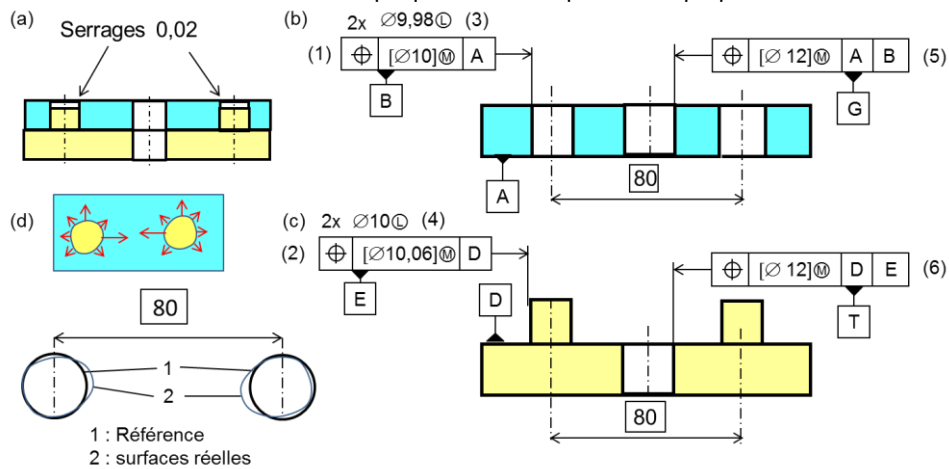


Figure 9 - Liaison symétrique rigide

### 2.1.5 Liaison symétrique entre pièces rigides avec douilles élastiques

La Figure 10 représente un assemblage composé de deux pièces rigides. La pièce supérieure est en appui plan sur A, centrée dans les deux alésages B. Les douilles élastiques sont serrées dans la base. L'écart d'entraxe est compensé par une déformation des douilles élastiques.

L'exigence est la position relative des deux alésages G et T au centre des deux pièces.

A l'état libre, les douilles ont un diamètre de l'ordre de 10,1, sans influence sur l'assemblage.

Les dimensions (1) imposent un serrage mini et maxi des douilles. Lorsque la douille est installée, le diamètre de la douille est sensiblement égal au diamètre du trou soit un diamètre mini de  $\varnothing 9,9$ .

La dimension (2)  $\varnothing 9,9 \textcircled{2}$  assure un serrage mini nul entre la douille et le trou. Il n'y a donc jamais de jeu.

La localisation (3) permet à la douille d'occuper un cylindre de diamètre  $10 + 0,1 = 10,1$ .

La localisation (4) laisse un espace libre pour un cylindre 9,8, ce qui donne un serrage maximal de la douille de 0,3mm.

La localisation (5) assure la position de l'alésage central G par rapport à A|B. La pression entre les douilles et les alésages E est caractérisée par le critère des moindres carrés.

La localisation (6) assure la position de l'alésage central T par rapport à D|E. Le critère des moindres carrés est établi sur le prolongement des axes associés aux cylindres réels sur la plage  $\textcircled{4}$  à l'aide de 4 points.

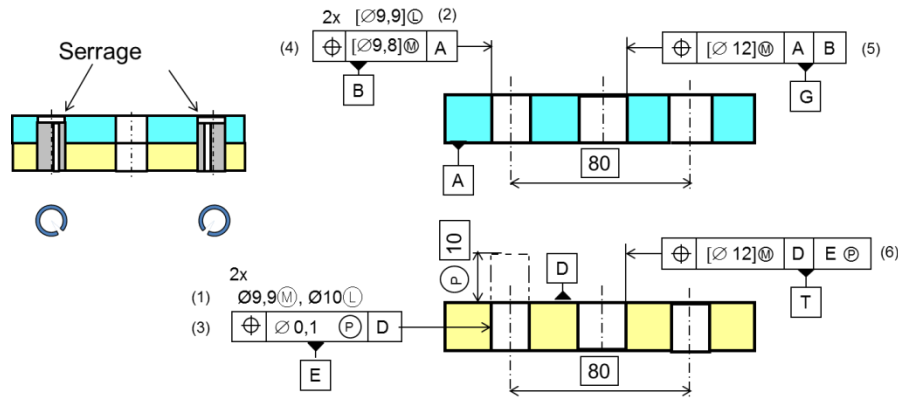


Figure 10 - Liaison symétrique avec douille élastique

NOTE : Dans cet exemple Figure 10, l'entraxe n'est pas déformable. Les écarts d'entraxes sont absorbés par les douilles. Il ne faut pas de [DV] sur les références.

### 2.1.6 Liaison symétrique avec jeu et déformation symétrique

La Figure 11a représente un mécanisme composé d'une base rigide et d'une pièce supérieure déformable. La pièce supérieure est en appui plan sur A, centrée dans les deux alésages B qui jouent le même rôle. Les pions sont serrés dans la base et montés avec du jeu dans B.

La déformation de la pièce supérieure compense les éventuels écarts d'entraxe entre les deux pièces. L'exigence est la position relative des deux alésages au centre des deux pièces.

Les pions sont livrés en respectant des dimensions au maximum et au minimum de matière (1).

Les diamètres des alésages (2) garantissent un serrage maximum  $10 - 9,95 = 0,05$ , et un serrage minimum  $9,98 - 9,97 = 0,01$  (Figure 11b).

La perpendicularité (3) assure la montabilité de chacun des alésages sur son pion (les deux zones de tolérance  $\varnothing 10,2 \text{ M}$ ) sont parallèles aux axes nominaux).

La perpendicularité (4) limite le défaut d'orientation du pion. L'espace maxi occupé par le pion de dimension maxi 10 est 10,02. La montabilité est assurée avec un jeu mini nul pour chacun des pions pris séparément.

La localisation (5) autorise un décalage relatif des trous par rapport à l'entraxe nominal. Ce décalage sera ultérieurement compensé par la déformation de la pièce supérieure. L'espace laissé libre est un cylindre  $\varnothing 9,5$ .

La localisation (6) autorise un décalage relatif des axes dans la zone projetée par rapport à l'entraxe nominal. L'espace potentiellement occupé par le pion de diamètre maxi 10 est un cylindre  $\varnothing 10,08$ . La déformation de la pièce supérieure est donc de  $10,08 - 9,5 = 0,58$ . Cette déformation est supposée symétrique.

NOTE : La position relative des alésages G et T sera la plus défavorable lorsque les entraxes entre les pièces sont identiques avec un jeu maxi entre les pions et les alésages. Il faudrait donc imposer des localisations 7 et 8 avec des références au minimum de matière. Cette solution n'a pas été retenue, car le principe du contrôle au gabarit avec flottage ne permet pas de reproduire la variation d'entraxes par déformation symétrique de l'une des pièces et l'auto-centrage de l'assemblage. Le principe retenu consiste à dire que la variation d'entraxe est facilement compensée par la déformation de la pièce supérieure. La pression est alors répartie uniformément sur les deux alésages, ce qui est bien représenté par les moindres carrés à distance variable.

La localisation (7) assure la position de l'alésage central G, en supposant que la pièce sera déformée de manière symétrique et centrée sur les deux alésages. Il n'y aura pas de flottage entre les pièces. Le modificateur [DV] (distance variable) représente la possibilité de variation de distance entre les trous, tout en assurant un positionnement symétrique.

- Élément tolérancé : alésage G (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : deux cylindres nominaux distants de 80 associé par les moindres carrés aux éléments de références réels B avec un décalage  $\delta$  symétrique (Figure 11c).
- Surface nominale : axe du cylindre nominal G.
- Zone de tolérance : zone extérieure au cylindre  $\varnothing 12$  centré sur l'axe nominal.
- L'alésage central réel G doit être contenu dans sa zone de tolérance.

La localisation (8) assure la position de l'alésage central T, en supposant que la pièce voisine sera déformée de manière symétrique et centrée sur les deux alésages. Il n'y aura pas de flottage entre les pièces. Le modificateur [DV] (distance variable) représente la possibilité de variation de distance entre les trous, tout en assurant un positionnement symétrique.

- Élément tolérancé : alésage T (tous les points de la surface)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D

- Référence secondaire : deux cylindres nominaux distants de 80 associé par les moindres carrés aux prolongements des axes des alésages E avec un décalage  $\delta$  symétrique (Figure 11d). (les écarts sont les distances des axes des cylindres associés aux alésages aux extrémités des plages de projection.
- Surface nominale : axe du cylindre nominal T.
- Zone de tolérance : zone extérieure au cylindre  $\varnothing 12$  centré sur l'axe nominal.
- L'alésage central réel T doit être contenu dans sa zone de tolérance.

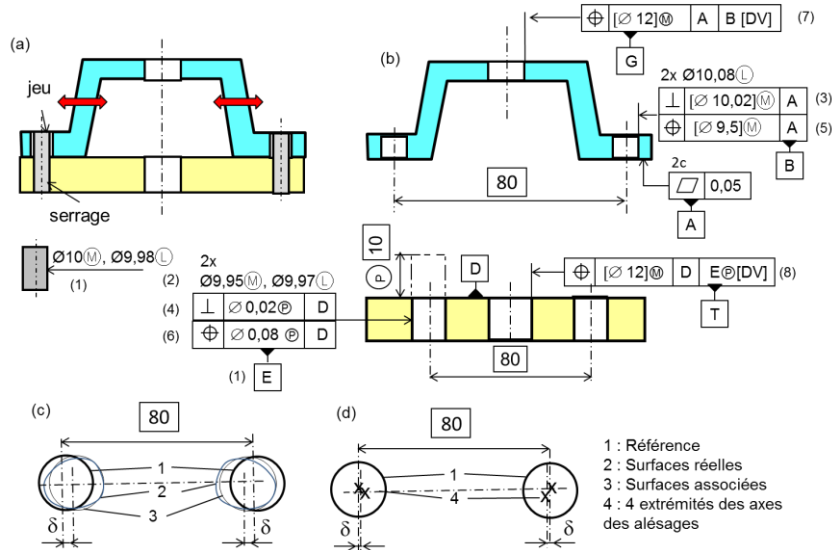


Figure 11 - Liaison avec jeu et déformation symétrique

NOTE 1 : la cotation serait identique pour une base déformable et une pièce supérieure rigide.

NOTE 2 : il ne faut pas utiliser la cotation des pièces déformables dans ce cas pour 3 raisons :

- Cette méthode n'est pas applicable à la base, car c'est la pièce voisine qui compense.
- Le redressage qui serait imposé au carter ne correspond pas forcément mieux à la base que l'état naturel.
- Il faut de toute façon spécifier la montabilité de chaque trou et l'entraxe à l'état libre.

Il aurait été possible de considérer que l'exigence au pire des cas s'obtient lorsque les entraxes sont identiques, avec le jeu maximal. Dans ce cas, les localisations (7) et (8) seraient les suivantes (Figure 12) :

- (7bis) : le jeu est maximal avec des alésages  $\varnothing 10,08$ , indépendamment de la distance.
- (8bis) : le jeu est défini entre l'espace occupé par un pion de diamètre maxi 10 avec un défaut d'orientation de 0,02 soit 10,02 et un pion de diamètre mini 9,98. L'écart est de 0,04.

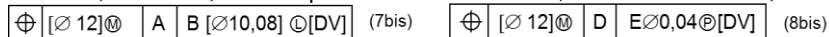


Figure 12 - Cotation avec minimum de matière

NOTE 3 : cette cotation Figure 12 est assez complexe à traiter pour un gain relativement faible.

## 2.2 Système de références avec lumière ou locating tertiaire

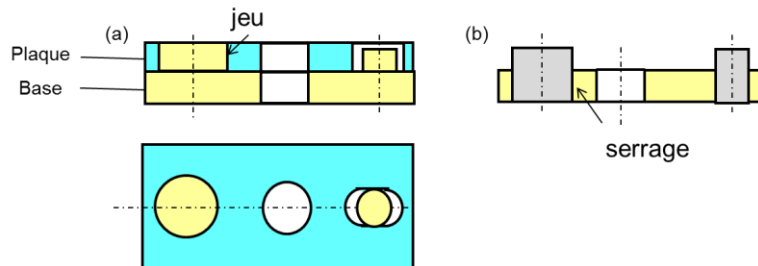
### 2.2.1 Liaison entre deux pièces monobloc avec rainure

La Figure 13a représente un mécanisme composé de deux pièces rigides. La plaque supérieure est en appui plan sur la base, centrée sur un alésage et orientés par une rainure.

La Figure 13b représente une variante avec des pions serrés dans la pièce inférieure.

Dans les deux cas, le centreur secondaire impose la position relative des deux pièces. La rainure évite d'avoir des contraintes sévères sur les entraxes.

L'exigence est la position relative des deux alésages au centre des deux pièces.



**Figure 13 - Liaison avec rainure tertiaire**

La cotation de cet assemblage Figure 14 repose sur les principes suivants :

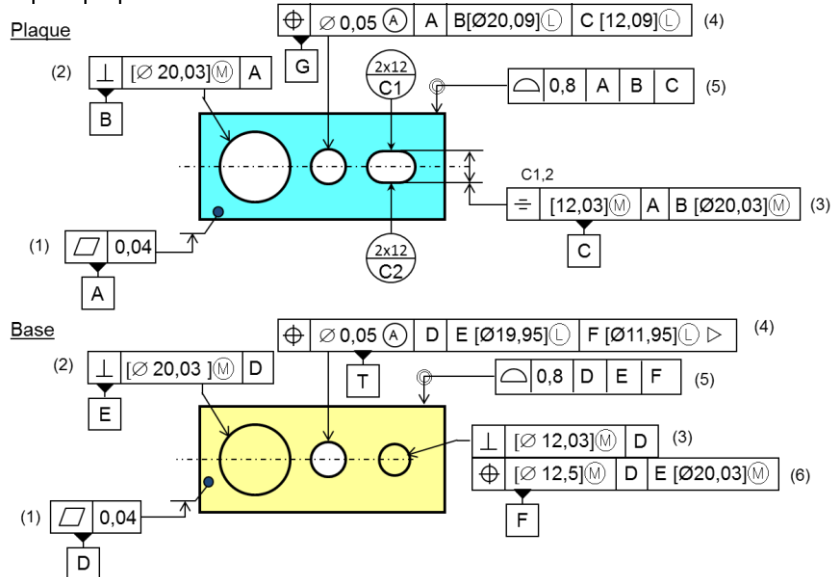
- (1) Les planéités garantissent la qualité du contact plan sur plan
- (2) Les perpendicularités avec des diamètres  $[\varnothing 20,03]_{\text{M}}$  identiques sur le centreur et dans l'alésage assurent la montabilité du centreur secondaire avec un jeu mini nul.
- (3) La perpendicularité avec un diamètre  $[\varnothing 12,03]_{\text{M}}$  identique à la largeur de la rainure  $[12,03]_{\text{M}}$  imposé par la symétrie assurent la montabilité du pion tertiaire avec un jeu mini nul.
- (4) Les axes des trous centraux sont positionnés par rapport aux systèmes de références avec une zone de tolérance au minimum de matière. Le jeu maxi est  $J_{\text{maxi}} = 0,14\text{mm}$  dans le centreur et entre le pion et la lumière.
- (5) Tolérancement général de toutes les surfaces par rapport au système de références.
- (6) Cette localisation positionne le pion tertiaire si le tolérancement général est trop large. (facultatif)

La coaxialité résultante entre les deux alésages est obtenue directement en cumulant la tolérance  $t_1=0,05$  de l'alésage du trou central de la plaque, la tolérance  $t_2=0,05$  de l'alésage du trou central de la base et le jeu maxi entre les liaisons  $J_{\text{maxi}} = 0,14$ .

$$\text{Coaxialité résultante} = t_1 + t_2 + J_{\text{maxi}} = 0,05 + 0,05 + 0,14 = 0,24$$

Le contour de la lumière est spécifié uniquement par le tolérancement général (5).

NOTE : il aurait été possible de définir un plan d'orientation pour imposer la perpendicularité (3) de la base uniquement dans le plan perpendiculaire à la rainure.

**Figure 14 - Cotation avec une lumière**

Pour la spécification de symétrie (3) de la plaque Figure 14, les éléments spécifiés sont les deux zones partielles C1 et C2 de la rainure. L'association du modèle nominal aux éléments de références est réalisée séquentiellement

- Élément tolérancé : deux zones partielles planes réelles C1 et C2 de la rainure
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : cylindre nominal B centré dans un cylindre  $\varnothing 20,03$  M flottant hors matière de l'élément de référence B.
- Surfaces nominales : 2 plans nominaux de la rainure C
- Zone de tolérance : espace extérieur aux deux plans distants de 12,03, centré sur les plans nominaux.
- La spécification est vérifiée si les éléments tolérancés sont contenus dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut glisser sur A et tourner autour de B pour que les éléments tolérancés soient si possible dans la zone de tolérance.

NOTE : La référence C désigne les deux zones partielles C1 et C2.

Pour la spécification de localisation (4) de la plaque, l'association du modèle nominal aux éléments de références est réalisée séquentiellement

- Élément tolérancé : axe réel de l'alésage central tolérancé (lieu des centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle B
- Référence secondaire : cylindre nominal E centré dans un cylindre  $\varnothing 19,95$  L flottant dans la matière de l'élément de référence E.



- Référence tertiaire : cylindre nominal F décalé dans la direction EF par rapport au cylindre  $\varnothing 11,95$   $\textcircled{L}$  flottant dans la matière de l'élément de référence F.
- Élément nominal : Axe nominal du cylindre spécifié
- Zone de tolérance : zone cylindrique  $\varnothing 0,05$ , centrée sur l'axe nominal.
- La conformité de la spécification peut être vérifiée avec un gabarit muni d'un plan, d'un alésage  $\varnothing 20,03$  et d'une rainure de largeur 12,03 (cette rainure est l'enveloppe d'un cylindre  $\varnothing 12,03$  couissant dans la direction EF). Le calibre de contrôle possède un plan, un centreur  $\varnothing 19,95$  et un pion de diamètre 11,95. Ce calibre comporte un alésage de diamètre quelconque pour représenter l'alésage T. Le flottement  $f_{Pi}$  de l'alésage spécifié est identifié à l'aide du calibre monté sur le gabarit dans toutes les directions  $i$ . La pièce réelle est placée sur le gabarit. Le déplacement maximal de l'axe de T dans la direction  $i$  doit être inférieur ou égal à  $0,025 + f_{Pi}$ . (Ce contrôle peut également être effectué avec un gabarit numérique).

Pour la spécification de localisation (4) de la base, l'association du modèle nominal aux éléments de références est réalisée séquentiellement

- Élément tolérancé : Axe réel de l'alésage central tolérancé (lieu centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : cylindre nominal B centré dans un cylindre  $\varnothing 20,09$   $\textcircled{L}$  flottant dans la matière de l'élément de référence B.
- Référence tertiaire : 2 plans nominaux C centrés sur deux plans distant de 12,09  $\textcircled{L}$  flottants dans la matière de l'élément de référence C formée par les deux zones partielles C et C2.
- Élément nominal : Axe nominal du cylindre spécifié
- Zone de tolérance : zone cylindrique  $\varnothing 0,05$  centrée sur l'axe nominal.
- La conformité de la spécification peut être vérifiée avec un gabarit muni d'un plan, d'un centreur  $\varnothing 20,03$  et d'un pion  $\varnothing 12,03$ . Le calibre de contrôle possède un plan, un alésage  $\varnothing 20,09$  et une rainure de largeur 12,09. Ce calibre comporte un alésage de diamètre quelconque pour représenter l'alésage G. Le flottement  $f_{Pi}$  de l'alésage spécifié est identifié à l'aide du calibre monté sur le gabarit dans toutes les directions  $i$ . La pièce réelle est placée sur le gabarit. Le déplacement maximal de l'axe de G dans la direction  $i$  doit être inférieur ou égal à  $0,025 + f_{Pi}$ . (ce contrôle peut également être effectué avec un gabarit numérique).

## 2.2.2 Limitation de la tertiaire à une zone restreinte

La cotation de la base peut être affinée Figure 15 en indiquant que le contact entre le pion tertiaire et la rainure est limité aux deux zones partielles F1 et F2 qui sont des secteurs cylindriques.

La perpendicularité (3) est limitée à ces deux secteurs cylindriques pour garantir la montabilité.

Dans la localisation (4), la référence F est également limitée à cette zone restreinte, ce qui rend inutile d'admettre un décalage de cette référence par rapport à la secondaire E.

La position du pion tertiaire est alors définie par la localisation (6) avec un intervalle de tolérance très large.

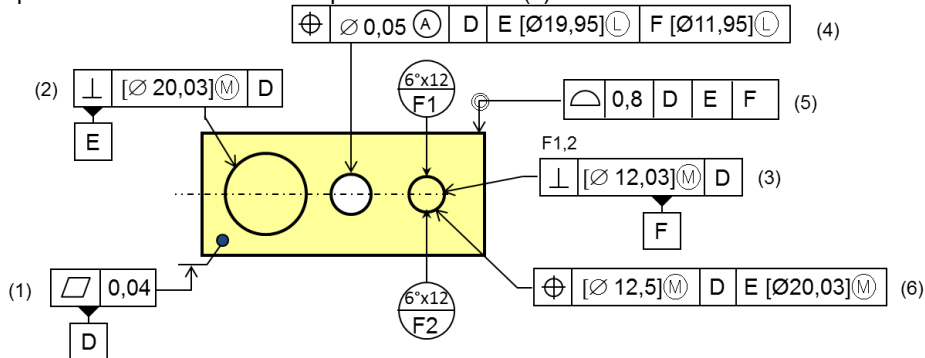


Figure 15 - Pion tertiaire de la base en zone partielle

## 2.2.3 Spécification en plage projetée pour pions rapportés

L'assemblage Figure 13 est réalisé avec une base munie de pions rapportés. La cotation de la plaque est identique à celle de la figure Figure 14.

La cotation de la base Figure 16 est équivalente à la cotation de la base monobloc Figure 14.

- (1) : dimension des pions
- (2) et (3) : serrage mini 0,01, serrage maxi 0,05 des pions dans les deux alésages.
- (4) Le diamètre maxi du pion monté dans l'alésage E est  $\varnothing 20$ . Avec la perpendicularité  $\varnothing 0,03$   $\textcircled{P}$ , le pion respectera bien la zone de tolérance  $\varnothing 20,03$   $\textcircled{M}$  de la perpendicularité (2) Figure 14.
- Le diamètre mini du pion monté dans l'alésage E est  $\varnothing 19,98$ . Avec la perpendicularité  $\varnothing 0,03$   $\textcircled{P}$  rappelée dans la référence secondaire de la spécification (4), le pion respectera bien la zone de tolérance  $\varnothing 19,95$   $\textcircled{L}$  requise pour la référence secondaire de la localisation (4) Figure 14.



directions  $i$ . La pièce réelle est placée sur le gabarit. Le déplacement maximal de l'axe de G dans la direction  $i$  doit être inférieur ou égal à  $0,025 + fPi$ . (ce contrôle peut également être effectué avec un gabarit numérique).

La localisation (8) est similaire à celle de la Figure 16.

NOTE : l'emploi du locating permet de réduire le jeu sur C en améliorant la précision. La zone de tolérance étant limitée aux deux zones partielles sur C, le système de références n'impose plus de contraintes sur l'entraxe entre les centreurs.

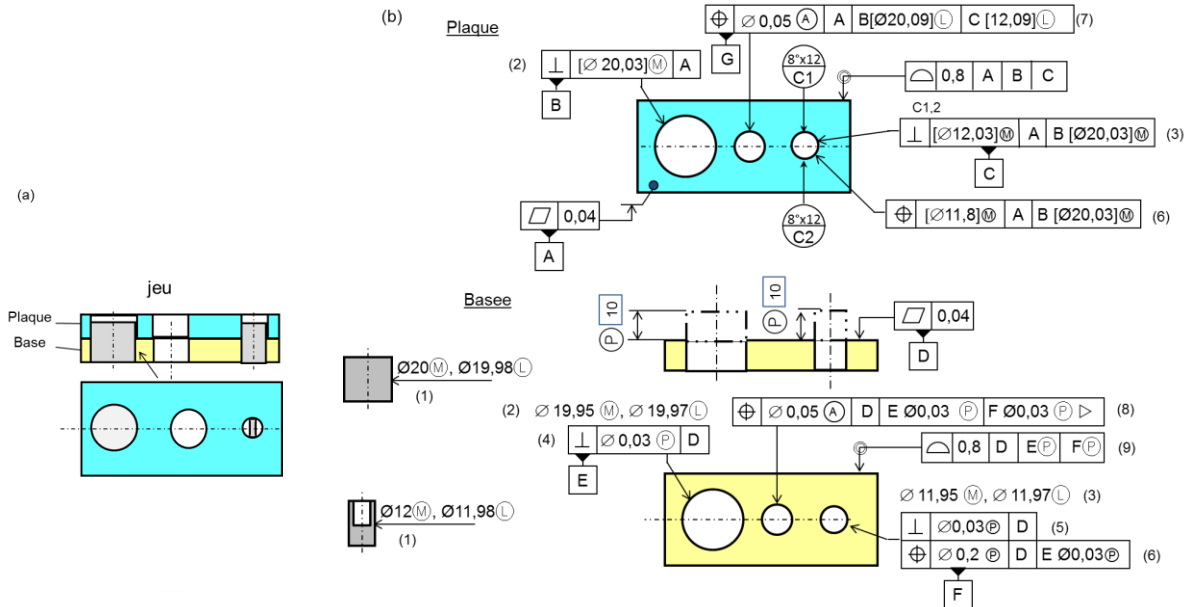


Figure 17 - Liaison avec locating tertiaire

NOTE : Un modificateur  $\triangleright$  sur la référence tertiaire C de la localisation (7) est possible, mais l'apport n'est pas significatif car les zones restreintes C1 et C2 sont déjà tangentes à la zone de tolérance sur la référence C.

## 2.3 Système de références avec cylindre tertiaire

### 2.3.1 Liaison tertiaire avec jeu

La Figure 18a représente un assemblage composé de deux pièces. Le carter supérieure est en appui plan sur A, centrée dans les deux alésages B et C. Les centreurs sont réalisés dans la base et montés avec du jeu dans B. Les jeux dans B et C doivent compenser les éventuels écarts d'entraxe entre les deux pièces sans imposer de déformation.

B a été choisi comme centreur secondaire avec un faible jeu maxi, tandis que le jeu maxi pour C est plus important.

L'exigence est la position relative des deux alésages au centre des deux pièces.

Les perpendicularités (1) assurent la montabilité de l'alésage B sur son centreur E avec un jeu mini nul (Figure 18b).

Les localisations (2) au maximum de matière assurent la montabilité du centreur tertiaire C sur F sans déformer la pièce.

La localisation (3) du carter assure la position de l'alésage central G :

- Élément tolérancé : axe réel de l'alésage G (lieu des centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : cylindre nominal centré sur le cylindre  $\varnothing 20,05$  flottant dans la matière de élément de référence B.
- Référence tertiaire : cylindre nominal centré sur le cylindre  $\varnothing 12,05$  flottant dans la matière de élément de référence C.
- Surface nominale : axe du cylindre nominal G.
- Zone de tolérance : cylindre  $\varnothing 0,05$  centré sur l'axe nominal.
- La conformité de la spécification peut être vérifiée avec un gabarit muni d'un plan, d'un centreur  $\varnothing 20$  et d'un pion  $\varnothing 12$ . Le calibre de contrôle possède un plan, un alésage  $\varnothing 20,05$  et un alésage  $12,05$ . Ce calibre comporte un alésage de diamètre quelconque pour représenter l'alésage G. Le flottement  $fPi$  de l'alésage spécifié est identifié à l'aide du calibre monté sur le gabarit dans toutes les directions  $i$ . La

pièce réelle est placée sur le gabarit. Le déplacement maximal de l'axe de G dans la direction i doit être inférieur ou égal à  $0,025 + fPi$ . (Figure 18c).

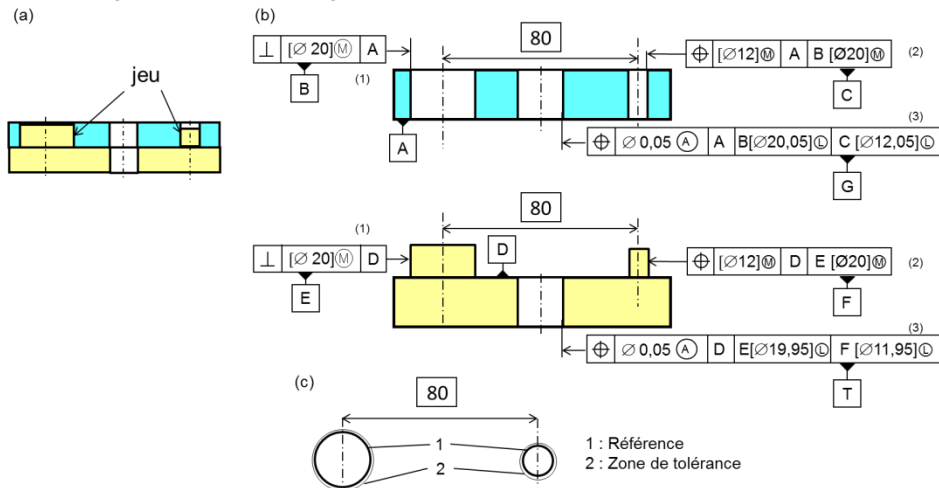


Figure 18 - Liaison dissymétrique avec jeu

### 2.3.2 Liaison tertiaire avec serrage

La Figure 19a représente un assemblage composé de deux pièces rigides. La pièce supérieure est en appui plan sur A, centrée sur B et orienté par C. Les deux liaisons B et C sont avec serrage. B est considéré comme secondaire en raison de son grand diamètre. En cas d'écart d'entraxe entre B et C, la pression de contact autour de l'alésage C sera très dissymétrique (Figure 19c).

La méthode des moindres carrés avec offset traduit directement l'équilibre statique dans la liaison en minimisant la somme des carrés des écarts par rapport à une surface associée qui est la surface nominale avec offset.

Le principe de cotation est le suivant :

- (1) : perpendicularité au maximum de matière pour limiter le serrage maxi de E dans B à  $20,07-20 = 0,07$
- (2) : diamètre au minimum de matière pour assurer un serrage mini de E dans B  $20,04-20,03 = 0,01$ .
- (3) : position au maximum de matière pour limiter le serrage maxi de F dans C à  $12,07-12 = 0,07$
- (4) : diamètre au minimum de matière pour assurer un serrage mini de F dans C  $12,04-12,03 = 0,01$ .

Le système de références de la localisation (5) ne comporte aucun modificateur.

- Élément tolérancé : axe réel de l'alésage G (lieu des centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : cylindre nominal B associé par les moindres carrés avec offset à l'élément de référence B.
- Référence tertiaire : cylindre nominal C associé par les moindres carrés avec offset (Figure 19c).
- Surface nominale : axe du cylindre nominal (à 40 mm de B).
- Zone de tolérance : cylindre  $\varnothing 0,05$  centré sur l'axe nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément spécifié est contenu dans la zone de tolérance.

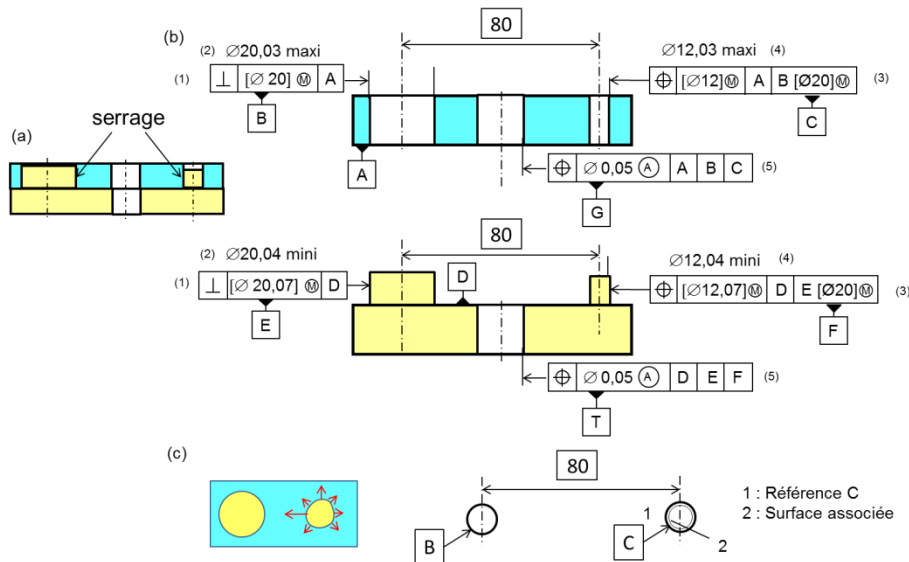


Figure 19 - Liaison rigide avec serrage

### 2.3.3 Liaison tertiaire avec jeu et déformation par défaut

Dans la Figure 20a, représente un assemblage composé d'une base rigide et d'un carter déformable. Le carter est en appui plan sur A, centré dans l'alésage B avec du jeu et orienté par l'alésage C avec jeu.

La déformation du carter compense les éventuels écarts d'entraxe entre les deux pièces. La déformation est dans la direction parallèle au plan passant par les axes B et C.

B assure le positionnement et est donc une référence secondaire.

L'exigence est la position relative des deux alésages au centre des deux pièces.

La perpendicularité (1) assure la montabilité de l'alésage B sur E (Figure 20b).

La perpendicularité (2) assure la montabilité de l'alésage C sur F (indépendamment de B)

La localisation (3) du carter autorise un décalage de l'alésage C par rapport à B avec une déformation admissible de  $\pm 0,1$ .

La localisation (3) de la base autorise un décalage du pion F par rapport à E avec une déformation admissible de  $\pm 0,1$ .

La localisation (4) du carter assure la position de l'alésage central G, en supposant que la pièce sera déformée du côté de C. La pièce est centrée sur B mais avec du jeu. La déformation de la pièce va annuler le jeu, mais il est impossible de prédire la position du point de contact. Il faut donc que l'exigence soit respectée quelle que soit la position du carter sur son centreur, ce qui impose une référence B au minimum de matière. L'orientation sera donnée par C. Cette orientation sera médiocre s'il y a du jeu entre C et F. L'exigence doit être respectée quelle que soit la position de C autour de F.

- Élément toléré : axe réel de l'alésage G (lieu des centres des sections)
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle A
- Référence secondaire : cylindre nominal centré sur le cylindre  $\text{Ø}20,05$  flottant dans la matière de élément de référence B.
- Référence tertiaire : cylindre nominal centré sur le cylindre  $\text{Ø}12,05$  flottant dans la matière de élément de référence C (Figure 17b).
- Surface nominale : axe du cylindre nominal G.
- Zone de tolérance : cylindre  $\text{Ø}0,05$  centré sur l'axe nominal.
- La conformité de la spécification peut être vérifiée avec un gabarit muni d'un plan, d'un centreur  $\text{Ø}20$  et d'un locating  $\text{Ø}12$ . Le calibre de contrôle possède un plan, un alésage  $\text{Ø}20,05$  et une rainure de largeur 12,05. Ce calibre comporte un alésage de diamètre quelconque pour représenter l'alésage G. Le flottement  $f_{Pi}$  de l'alésage spécifié est identifié à l'aide du calibre monté sur le gabarit dans toutes les directions  $i$ . La pièce réelle est placée sur le gabarit. Le déplacement maximal de l'axe de G dans la direction  $i$  doit être inférieur ou égal à  $0,025 + f_{Pi}$ . (ce contrôle peut également être effectué avec un gabarit numérique).

NOTE : Pour la réalisation du gabarit de contrôle, le locating est équivalent à un centreur cylindrique  $\text{Ø}12$ , mobile en translation dans la direction des alésages B et C. Pour un calcul numérique, l'état virtuel  $\text{Ø}12,05$  doit être mobile en translation dans la direction BC.

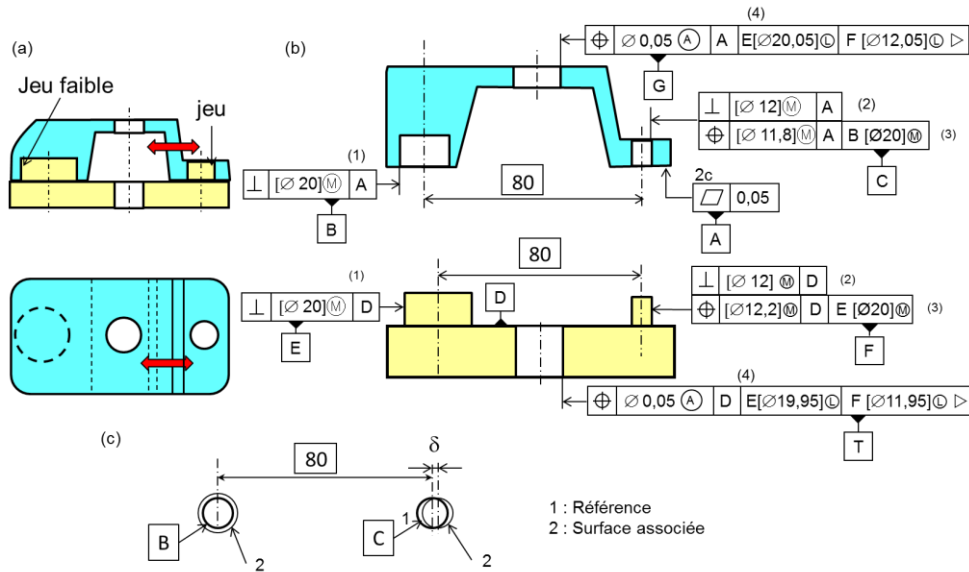


Figure 20 - Liaison tertiaire avec jeu et déformation

NOTE : il ne faut pas utiliser la cotation des pièces déformables dans ce cas pour 3 raisons :

- Cette méthode n'est pas applicable à la base, car c'est la pièce voisine qui compense.
- Le redressage qui serait imposé au carter ne correspond pas forcément mieux à la base que l'état naturel.
- Il faut de toute façon spécifier la montabilité de chaque trou et l'entraxe à l'état libre.

### 2.3.4 Liaison tertiaire avec jeu et déformation dans une direction donnée

Cet assemblage est très similaire à celui du paragraphe 2.3.3. Les centreurs sont décalés. De ce fait, la direction de la déformation n'est pas dans le plan passant par les deux centreurs, mais dans un plan Q perpendiculaire au plan P.

Quelles que soient les entraxes entre les centreurs du carter ou de la base, l'alésage C du carter va se déplacer dans ce plan Q qui est donc un plan commun invariant pour les deux pièces.

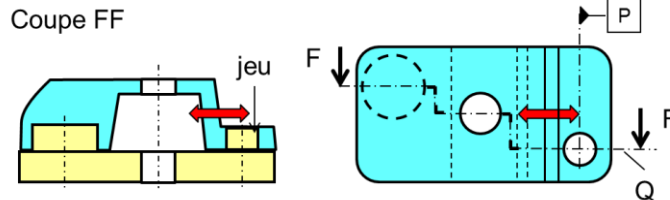


Figure 21 - Déformation dans un plan donné

La cotation est quasi identique. Un plan de décalage P a été défini dans le modèle nominal perpendiculairement à la direction de déformation de la pièce.

Les localisations (4) sont complétées par l'indication de décalage dans le plan perpendiculaire à P pour la référence tertiaire.

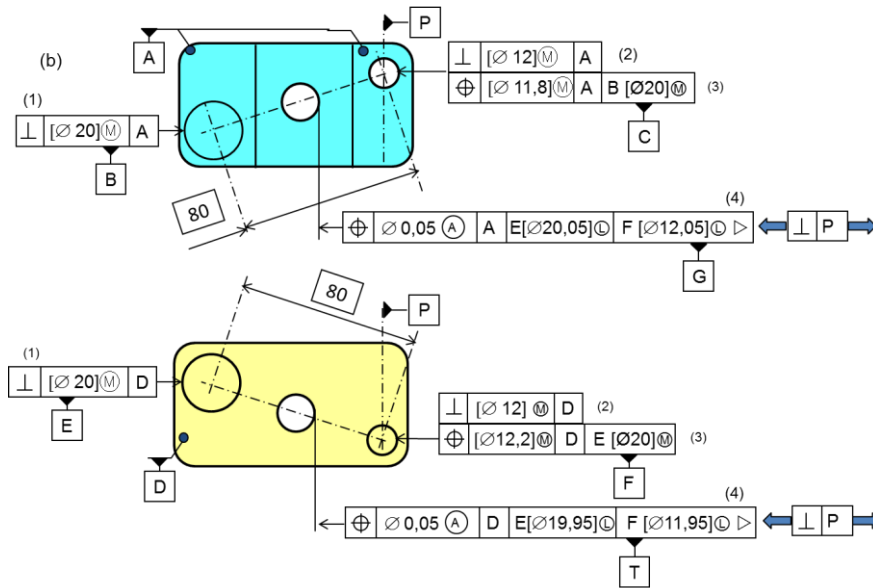


Figure 22 - Cotation avec un plan de décalage

Pour les deux pièces, le modèle nominal est associé au plan primaire et au cylindre secondaire. Le modèle nominal peut encore tourner autour de l'axe secondaire. Cette orientation est déterminée de sorte que la surface associée à l'élément de référence tertiaire soit dans le plan Q, c'est-à-dire décalé de  $\delta$  dans la direction perpendiculaire à P par rapport à la référence C.

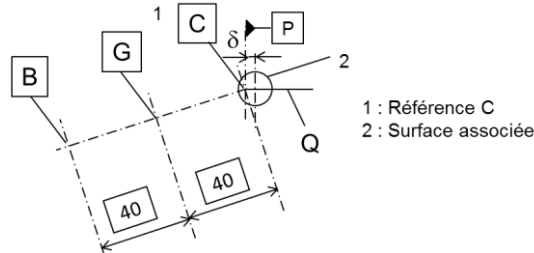


Figure 23 - Prise en compte du décalage dans une direction donnée

NOTE : l'avantage de cette cotation est que quelles que soient les entraxes entre les centres du carter ou de la base, les références B et E sont superposées, les références C et F sont superposées, donc les axes nominaux des alésages G et T sont superposés. La chaîne de cotes est donc bien minimale et sans incertitude due aux décalages des systèmes de références

## 2.4 Système de références avec prismatique tertiaire

### 2.4.1 Prismatique tertiaire en position nominale

La Figure 24 comporte une liaison tertiaire prismatique. La surface F définie dans (1) est constituée des 4 plans. Pour la localisation (2) :

- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D
- Référence secondaire : cylindre nominal associé à l'alésage réel par les moindres carrés avec offset.
- Référence tertiaire : surface nominale constituée des 4 plans en position nominale associé par les moindres carrés à la surface réelle.

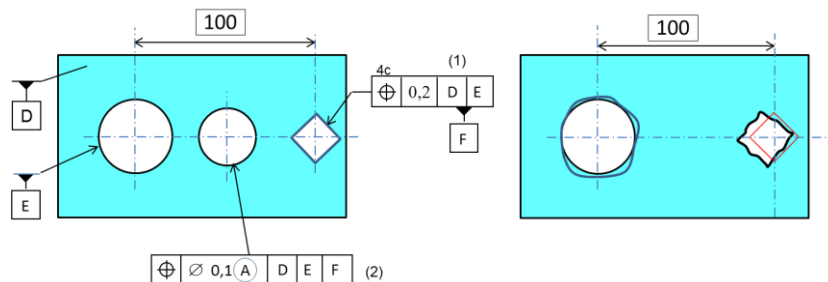


Figure 24 - Prismatique tertiaire en position nominale

### 2.4.2 Prismatic tertiaire avec un décalage

La Figure 25 comporte une liaison tertiaire prismatique. La surface F définie dans (1) est constituée des 4 plans. La pièce voisine peut se déformer dans la direction perpendiculaire à P. Pour la localisation (2) :

- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D
- Référence secondaire : cylindre nominal associé à l'alésage réel par les moindres carrés avec offset.
- Référence tertiaire : surface nominale constituée des 4 plans en position nominale. La surface associée par les moindres carrés est décalée de  $\delta$  par rapport à la surface nominale dans la direction perpendiculaire à P.

NOTE : la direction de P définie dans le modèle nominal peut être quelconque.

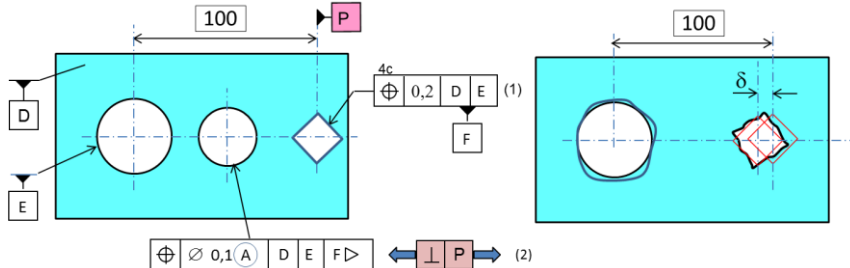


Figure 25 - Prismatic avec décalage

### 2.4.3 Prismatic tertiaire avec orientation libre

La Figure 26 comporte une liaison tertiaire prismatique. La surface F définie dans (1) est constituée des 4 plans. La pièce voisine peut se déformer dans la direction perpendiculaire à P. La liaison peut également tourner autour de la droite G définie en tant qu'élément de situation dans le système de référence D|F par l'indication (3) :

- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D
- Référence secondaire : surface nominale composée des 4 plans F associés par les moindres carrés avec offset aux 4 surfaces réelles.

Pour la localisation (3) :

- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D
- Référence secondaire : cylindre nominal associé à l'alésage réel par les moindres carrés avec offset.
- Référence tertiaire : Droite G définie dans le modèle nominal décalée par rapport à l'élément de situation G associé à la surface réelle F, dans la direction par défaut des deux droites E et G

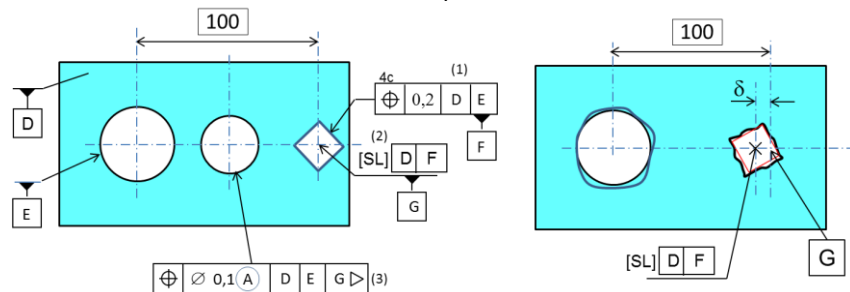


Figure 26 - Prismatic avec rotation libre

NOTE : l'hyperstatisme impose de placer le modificateur  $\triangleright$  après la référence G pour permettre le décalage entre la référence G (en position exacte) et l'élément de situation [SL] D|F. Si besoin, un plan de décalage P peut décrire une autre direction.

### 2.4.4 Décalage d'une référence pour une surface complexe

Dans la Figure 27, la liaison primaire est assurée par le cylindre A. Un doigt se déplace radialement dans l'encoche pour indexer la pièce en rotation. La mobilité du doigt peut compenser des variations de profondeur de l'encoche.

La difficulté de cet exemple est d'imposer que le plan médian de la référence B passe par A (avec contrainte de position) et que la distance entre B et A soit variable (pas de contrainte de position).

La Figure 27a n'est pas suffisante, car la direction de décalage n'est pas clairement indiquée (notamment dans un contexte numérique).

La Figure 27b décrit le plan de décalage P qui est défini dans le modèle nominal. Il représente la direction de déplacement du doigt venant se loger dans l'encoche. La translation laissée par le symbole  $\triangleright$  est perpendiculaire à P.



Le système de références doit être construit séquentiellement.

- Le cylindre de référence primaire A est associé avec le critère des moindres carrés avec offset.
- La référence secondaire est la surface nominale de l'encoche. La surface associée par le critère des moindres carrés est obtenue par une translation de la surface nominale dans la direction indiquée par le plan de décalage.

Le modèle nominal de la pièce est centré sur le cylindre A. l'association de la référence secondaire détermine l'orientation du modèle et la translation de la surface nominale de l'encoche. La position obtenue permet de vérifier la localisation de l'alésage.

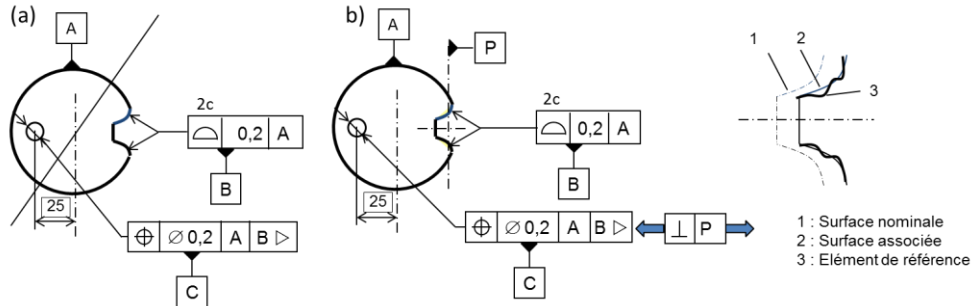


Figure 27 - Système de références cylindre | forme complexe

## 2.5 Système de références sur un appui sphérique

Ce boulon Figure 28 est comprimé dans la structure et en appui sur une rondelle sphérique concave. Cette rondelle est en appui plan sur la structure à assembler. L'exigence X mini nécessite de maîtriser la position de l'épaulement de la vis par rapport à la sphère.

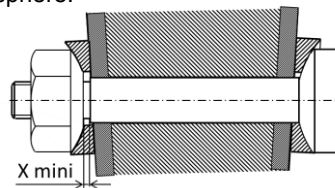


Figure 28 - Boulon monté sur une rondelle sphérique

La spécification de position du secteur sphérique (1) Figure 29a impose un écart maxi entre la surface nominale sphérique de rayon 30 centrée sur A et la surface réelle pour garantir la qualité du contact avec une sphère concave centrée sur A.

Dans la spécification (2), la référence primaire est le cylindre des moindres carrés associé à l'élément de référence A. La référence B est une sphère nominale de rayon 30 centrée sur la référence A, minimax extérieure matière à la surface réelle. (Figure 29b)

En alternative, la spécification (3) autorise un décalage de la surface associée à B. La référence B est une sphère nominale de rayon 30 centrée sur la référence A. La surface associée est une sphère de rayon 30 décalée de  $\delta$  par rapport à A, c'est-à-dire dans le plan perpendiculaire à A. La sphère est minimax extérieure matière à l'élément de référence B (Figure 29c).

Le jeu entre la rondelle concave et l'axe de la vis permettra à la rondelle de se positionner sur la surface sphérique réelle, même en cas de décalage latéral. La localisation (3) correspond donc mieux au comportement de la liaison.

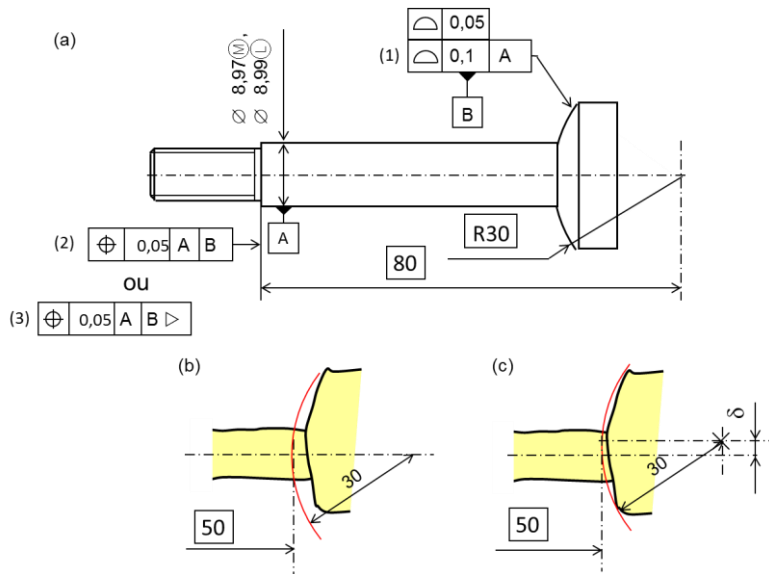


Figure 29 - Cotation d'un secteur sphérique

## 2.6 Système de références avec décalage

Le mécanisme Figure 30 comporte un pion d'indexation tertiaire mobile en translation qui compense les variations de profondeur de la forme C.

- La perpendicularité (1) assure la montabilité de la secondaire
- La spécification d'orientation (2) assure la forme du chambrage C et son orientation par rapport à A.
- La position (3) assure la profondeur du chambrage
- La localisation (4) porte sur l'axe du chambrage en imposant sa position par rapport à A|B.
- Dans la localisation (5) le système de références est défini sur A|B|C en admettant un décalage de C dans la direction perpendiculaire au plan A. (Ce décalage correspond au réglage disponible avec la mobilité du pion.

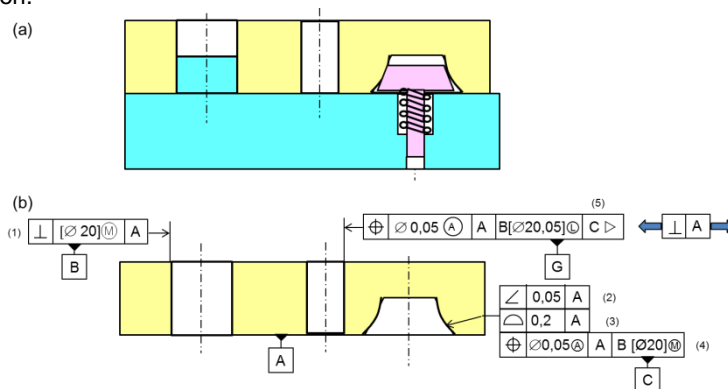


Figure 30 - Décalage de la surface tertiaire associée

NOTE : la surface associée respecte la position par rapport à B, mais pas par rapport à A.

## 2.7 Système de références pour les tolérances générales

Une spécification de position (1) de toutes les surfaces avec un système de référence au minimum de matière sur les références serait optimale pour traduire les maillons de chaînes de cotes visant à établir l'absence de collision avec les pièces voisines (Figure 31).

Par contre cette écriture ne permet pas de garantir les épaisseurs de paroi. Il faudrait ajouter une spécification de forme de toutes les surfaces. Cependant, cette spécification est quasi impossible à vérifier, car il faut impérativement mesurer toutes les surfaces et faire un balançage global pour affirmer la conformité de la pièce. De plus, la grandeur caractéristique du défaut de forme est très difficile à analyser pour tenter un réglage.

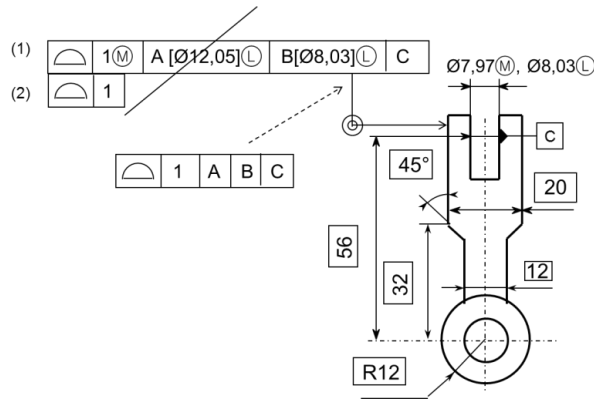


Figure 31 - Optimisation du tolérancement général

Pour le tolérancement général, il est donc recommandé de ne pas placer de modificateur  $\textcircled{L}$  ou  $\textcircled{P}$  sur le système de références pour décrire simultanément les conditions de positions des surfaces par rapport au milieu extérieur et les épaisseurs de parois. Sans flottement sur les références, il est possible de vérifier la conformité de chaque surface, indépendamment des autres.

## 2.8 Translation de repère

### 2.8.1 Exemple de translation du modèle sur un plan

La Figure 32a présente un mécanisme comportant rotor tournant. La cale placée entre l'arbre et la butée est choisie de sorte que le jeu axial respecte la valeur désirée. La mise en position axiale de l'arbre est définie par le plan A.

L'exigence X mini montre que la chaîne de cotes passe par le maillon jeu et par un maillon qui relie les surfaces C à B. Dans la cotation de l'arbre Figure 32b, ce maillon est défini par la localisation (1) qui comporte une référence primaire A et un indicateur de translation du nominal selon une direction perpendiculaire au plan A pour associer le modèle nominal à la surface réelle B.

Le modèle nominal est donc positionné par le système de références A de la localisation (1). Le modèle nominal est ensuite translaté de  $\delta$  dans la direction  $\vec{p}$  normale au plan A pour associer la référence B à la surface réelle B par le critère minimax. La surface réelle C doit se trouver dans une zone de tolérance de 0,05 centrée sur la surface nominale C.

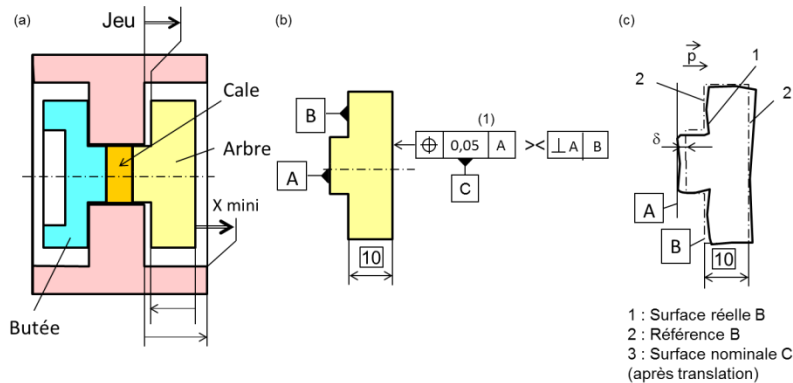


Figure 32 - Translation du repère sur un plan

NOTE : dans ce cas simple, la direction de la translation est dans le plan perpendiculaire à la référence primaire. Si la direction est quelconque, celle-ci doit être complètement définie dans le système de références de la spécification.

### 2.8.2 Translation du modèle sur deux surfaces

La Figure 33a présente une pièce en cours de fabrication sur un centre d'usinage. La mise en position dans montage d'usinage est assurée par les 6 points d'appuis A1, A2, A3, B1, B2, C1.

L'alésage F doit être réalisé centré sur le cylindre D et positionné à 20 mm du plan supérieur E. Pour cela, le processus de fabrication comporte des opérations de palpé des surfaces D et F et un changement d'origine.

La localisation (1) Figure 33b correspond à la spécification de fabrication dans cette phase. L'élément spécifié est l'axe de l'alésage. Le système de références est défini sur les 6 zones partielles correspondantes ce qui positionne le modèle nominal par rapport aux surfaces A, B et C.

Le premier Indicateur de translation (2) permet une translation du modèle nominal dans le plan parallèle à A, pour associer la surface réelle D à la référence D du modèle nominal par le critère des moindres carrés avec offset.  
Le second Indicateur de translation (3) permet une translation du modèle nominal perpendiculairement au plan A, pour associer la surface réelle E à la référence E du modèle nominal par le critère minimax.

Le modèle nominal étant ainsi positionné, l'axe nominal de F est défini, ce qui permet de vérifier que l'axe réel est dans la zone de tolérance.

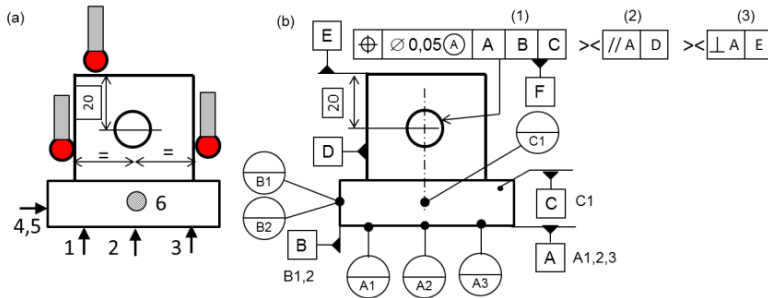


Figure 33 - Translation du repère sur deux surfaces

### 2.8.3 Translation du modèle avec une mobilité en rotation

La Figure 34 présente une pièce en cours de fabrication avec une mise en position sur le cylindre A. L'indicateur de translation indique que le modèle nominal peut être traduit dans toutes les directions perpendiculaires à A pour recentrer le cylindre B du modèle nominal sur la zone partielle circulaire B1. La rainure est réalisée par rapport à B.

Pour la symétrie de la rainure :

- Élément spécifié : surface médiane de la rainure (lieu des milieux des bipoints)
- Référence primaire : Cylindre nominal associé à la surface réelle A par les moindres carrés avec offset.
- Translation selon une direction perpendiculaire à A pour associer le cylindre nominal B à la zone partielle réelle par la méthode des moindres carrés avec offset.
- Surface nominale : plan médian de la rainure passant par l'axe de B
- Zone de tolérance : espace compris entre deux plans distants de 0,1, centré sur l'axe de B
- La spécification est vérifiée si l'élément spécifié est dans la zone de tolérance.

Lors de l'association de la référence à A, le modèle nominal peut encore tourner autour de A. La référence B ne bloque pas cette rotation qui reste libre autour de B pour définir la zone de tolérance.

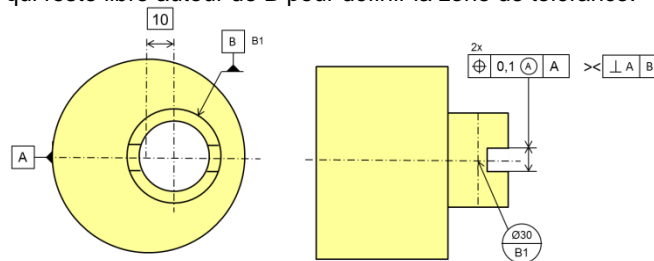


Figure 34 - Translation du repère avec mobilité résiduelle en rotation

NOTE 1 : Si la surface B était carrée, la rotation autour de A aurait été bloquée par l'association de B.

NOTE 2 : La spécification Figure 35 aurait défini un système de référence A|B> qui bloque la rotation autour de A. Dans ce cas, la zone de tolérance est centrée sur B mais orientée par le plan passant par A et B>

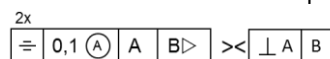


Figure 35 - Translation avec blocage de la rotation

### 2.8.4 Translation du modèle sur un centreur

La Figure 36 comporte deux systèmes de références A|B|C et D|E|F.  
Le problème est d'imposer la position de F pour que la direction EF soit parallèle à B.

La localisation de F est définie dans le système de références A|B|C avec une zone de tolérance cylindrique  $\varnothing 0,2$  perpendiculaire à A pour la projection de F. Ce modèle nominal est ensuite translaté dans le plan nominal D (selon 2 directions) pour être centré sur la projection de l'alésage E dans la zone  $\textcircled{P}$ . L'entraxe nominal entre E et F est donc bien assuré. La position de F oriente bien la direction DE par rapport au système A|B|C.

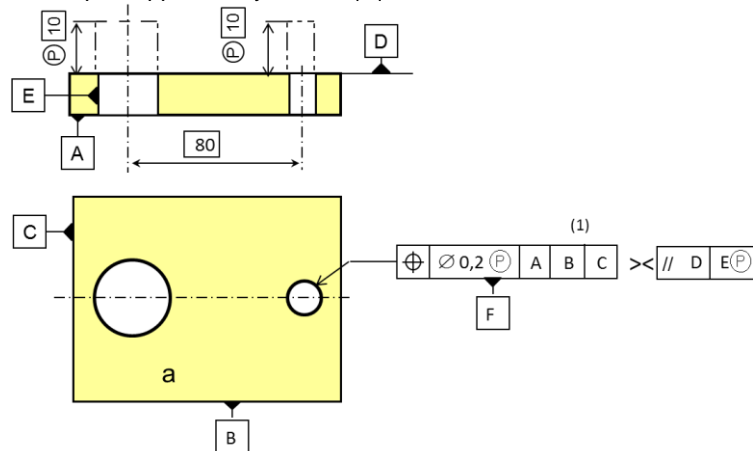


Figure 36 – Orientation relative de deux systèmes de références

### 3. Références partielles mobiles

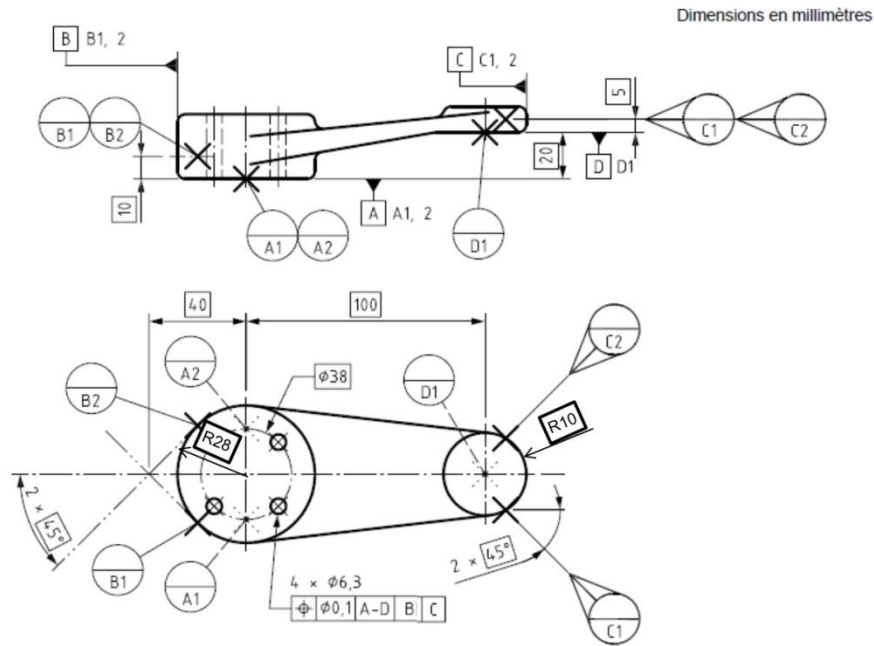
#### 3.1 Mobilité équivalente à une variation de distance

La Figure 37 présente un système de références imposant une contrainte de distance de la référence tertiaire par rapport à la référence secondaire. Pour libérer cette contrainte, les zones partielles C1 et C2 sont mobiles. Les zones partielles B ne couvrent qu'un secteur cylindrique. Le rayon du cylindre associé doit être nominal. De même pour les zones partielles C.

Le système de références doit être construit séquentiellement.

- La référence primaire A-D est définie par deux plans distants de 20mm associés avec le critère minimax aux 3 zones partielles A1, A2 et D1.
- Le cylindre de référence spécifié secondaire B est perpendiculaire à A-D. Il a pour rayon nominal 28. Il est associé avec le critère des moindres carrés aux zones partielles B1 et B2.
- Le cylindre de référence spécifié tertiaire C est perpendiculaire à A-D. Il a pour rayon nominal 10. Il est à la distance de 100mm par rapport à l'axe de B. Les références partielles C1 et C2 étant mobile, la surface associée à C est une surface offset de la surface nominale. Le critère d'association est les moindres carrés.

Le modèle nominal de la pièce est positionné par les plans A-D, centré sur B et orienté par C.



**Figure 37 - Référence tertiaire avec des zones mobiles**

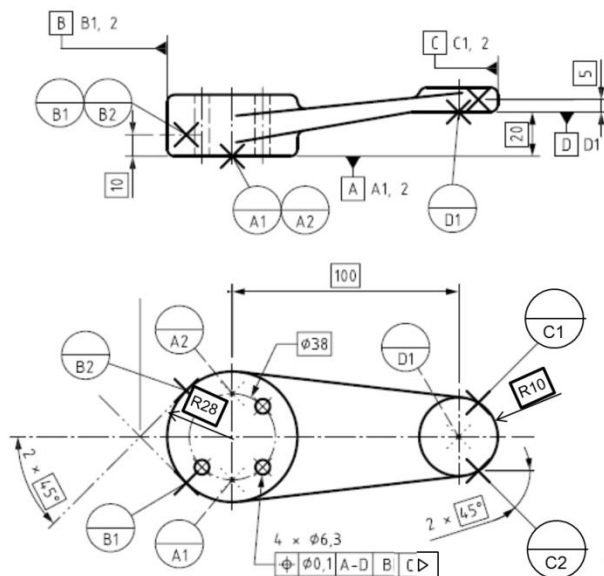
Les écarts  $\epsilon_i$  des zones partielles ponctuelles primaires et secondaire sont nuls. Les décalages des zones C1 et C2 par rapport au nominal sont identiques et de valeur  $\delta$ .

La Figure 38 est similaire à la Figure 37, mais avec uniquement des zones partielles fixes et une référence tertiaire avec le modificateur  $\triangleright$  qui permet un décalage de la surface associée

Dans la Figure 38, la jonction est assurée par des références partielles. Les surfaces B et C ne couvrent qu'un secteur cylindrique. Le modificateur  $\triangleright$  libère la contrainte de distance de C par rapport à B. La direction de décalage est implicitement définie par les deux axes nominaux.

Le système de références doit être construit séquentiellement.

- La référence primaire A-D est définie par deux plans distants de 20mm associés avec le critère minimax aux 3 zones partielles A1, A2 et D1.
- Le cylindre de référence secondaire B est perpendiculaire à A-D. Il a pour rayon nominal 28. Il est associé avec le critère des moindres carrés aux zones partielles B1 et B2 (sans offset).
- Le cylindre de référence tertiaire C de rayon 10 est associé avec le critère des moindres carrés aux zones partielles C1 et C2 avec un décalage  $\delta$  dans la direction BC. (Il n'y a pas d'offset sur le rayon).



### Figure 38 - Système de références en zones partielles

La variation de distance des cylindres a sensiblement le même effet que la mobilité des zones partielles :

- Avec les références mobiles, l'écart est calculé par rapport à une surface offset de la surface nominale. L'association est réalisée avec les moindres carrés.
- Avec le modificateur  $\triangleright$ , le décalage est dans la direction des deux axes des cylindres. L'association est réalisée avec les moindres carrés une surface nominale translatée.

La différence sur le résultat est insignifiante si l'étendue de chaque zone partielle est petite, ce qui est le cas pour des zones partielles linéiques.

Le choix sera donc guidé par la liaison de cette pièce avec la pièce voisine et par l'analyse de l'origine des mobilités : Les zones partielles mobiles représentent une déformation des appuis. Le décalage de la référence représente une mobilité cinématique.

## 3.2 Référence partielle mobile orientante

La spécification de coaxialité de la Figure 39, comporte une référence commune constituée de deux surfaces complexes nominale de révolution et coaxiales. Les éléments de références sont constitués de zones partielles :

- A1 désigne une ligne dans une section de la surface A.
- B1 est une surface limitée par la projection d'un cercle  $\varnothing 40$  sur la surface B.

La surface inférieure A est quasi-sphérique au voisinage de la section. Elle n'oriente pas la pièce. L'orientation est donnée par la surface supérieure B.

La surface nominale A est associée à la zone partielle A1 ; La surface B est associée à la zone partielle B1. B1 étant une référence mobile, un offset  $\delta$  est possible entre la surface associée et la surface nominale.

La surface est fermée. L'association est réalisée par la méthode des moindres carrés avec :

- Pour les points prélevés au voisinage de la ligne A1 :  $e = \overline{NM} \cdot \vec{n}$
- Pour les points prélevés dans la zone B1 :  $e = \overline{NM} \cdot \vec{n} - \delta$

L'association est donc réalisée par la méthode des moindres carrés en une seule opération avec 7 inconnues : les 6 degrés de libertés et l'offset  $\delta$ .

Le paramètre  $\delta$  permet de lever l'hyperstatisme axial.

NOTE : dans ce cas, la zone partielle mobile utilisée comme référence impose l'orientation bien qu'elle soit seule, car l'étendue de la surface est symétrique par rapport au centre de rotulage de la surface A1.

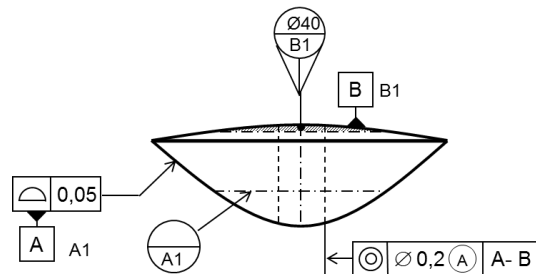


Figure 39 - Référence mobile orientante

La référence étant une surface nominale de révolution, elle permet de définir la coaxialité de l'alésage.

## 3.3 Référence glissante

### 3.3.1 Synchronisation de zones partielles glissantes

La Figure 40 comporte une zone partielle linéique A1 dans l'alésage  $\varnothing 20$  et une zone partielle A2 sur la surface de révolution extérieure (ligne courbe).

L'indicateur de référence A ne porte que sur A1 et comporte une double flèche « glissant de P à Q ». La référence glissante est donc bien définie sur une génératrice de l'alésage.

Le cadre de tolérance porte sur la zone partielle A2 et comporte une double flèche « glissant de R à S ».

Les deux zones partielles glissantes ont la même lettre. Elles sont donc synchrones.

Le point P glisse en Q en parcourant une distance curviligne  $d1$ . Le point R glisse en S en parcourant une distance curviligne  $d2$ .

Les deux zones partielles glissent sur leurs surfaces respectives selon une loi paramétrée par  $t$  variant de 0 à 1.

L'abscisse curviligne de la section glissante A1 par rapport à P est  $t.d1$

L'abscisse curviligne de la section glissante A2 par rapport à R est  $t.d2$

Si, dans le modèle nominal, les lignes P et R sont dans le même plan d'intersection passant par l'axe de A et si Q et S sont dans le même plan d'intersection passant par l'axe de A, les deux sections sont synchrones et toujours coplanaires. Les zones partielles sont donc coplanaires.

Dans un plan d'intersection, la référence A est l'axe du cylindre de rayon nominal des moindres carrés aux points identifiés au voisinage de la ligne A1. (

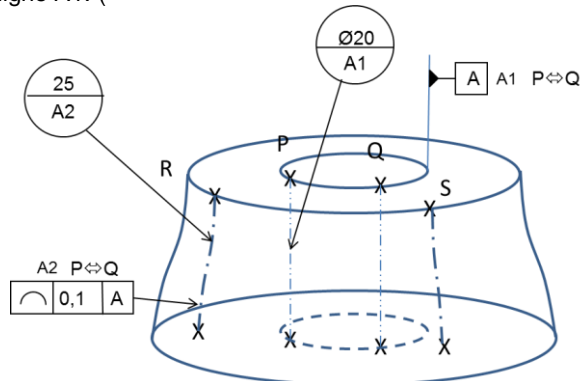


Figure 40 – Synchronisation des références glissantes

### 3.3.2 Synchronisation de zones partielles glissantes

Cette poulie Figure 41a est guidée par 2 galets avec 2 contacts linéiques.

La référence A (1) est le cylindre de rayon nominal des moindres carrés aux points prélevés au voisinage des zones partielles glissantes A1 et A2 qui sont 2 lignes solidaires positionnées à 90° l'une de l'autre. Les lignes sont définies pour toutes les positions angulaires (sur tout le tour de la pièce) entre la ligne P et elle-même.

Pour la localisation (2) Figure 41b, l'élément spécifié est la ligne A3 qui a la même lettre que les zones partielles mobiles A1 et A2. A3 est donc à une position angulaire constante par rapport à A1 et A2. La zone de tolérance est comprise entre 2 plans distants de 0,4. Cette zone est centrée sur le plan tangent à la surface nominale en A3.

Pour chaque position angulaire des zones partielles A1 et A2 dans l'alésage, les points de la ligne A3 doivent être contenu dans la zone de tolérance. Cette mesure peut par exemple être réalisée avec un comparateur mise à « 0 » avec un calibre nominal.

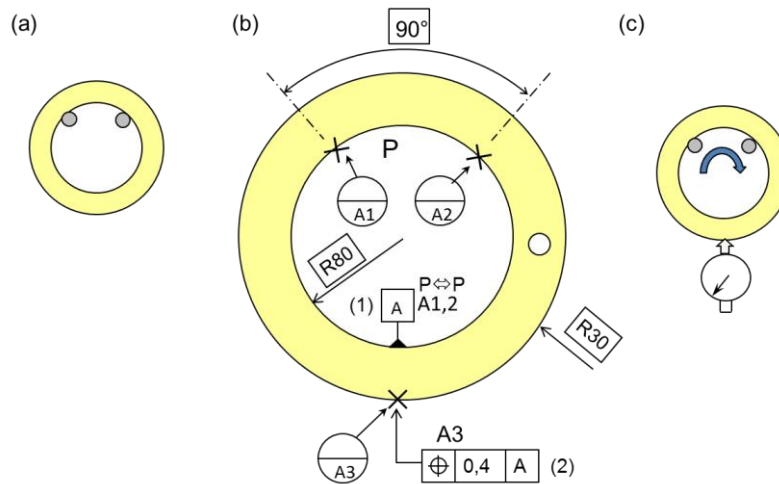


Figure 41 - Position par rapport à des références partielles glissantes

NOTE 1 : Cette exigence pourrait également être spécifiée avec des éléments de contact glissants.

NOTE 2 : Il n'est pas possible de définir un battement avec cet axe de rotation car chaque position des références doit être considérées comme indépendante. Il y a autant de battements différents que de position, avec des zones de tolérance indépendantes.

## 4. Références communes hybrides

### 4.1 Association par les moindres carrés



L'assemblage Figure 42 est réalisé avec une liaison plane en deux parties assurée par contact sur A et par serrage sur B. Chaque partie est trop étroite pour définir à elle seule une référence plane. Pour la localisation (1), le modèle nominal est associé par les moindres carrés à l'ensemble des 3 surfaces (sans offset).

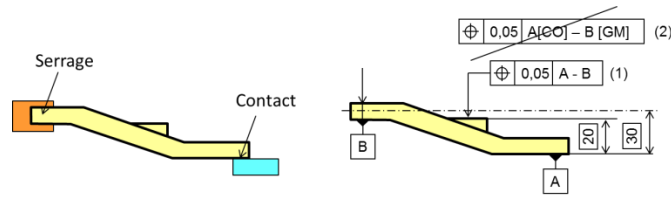


Figure 42 - Référence commune avec et sans serrage

NOTE : La localisation (2) n'est pas possible car il y a deux critères d'association différents dans la référence commune. On ne peut pas minimiser à la fois la somme des carrés des écarts et la distance maxi.

La Figure 43 est équivalente à la Figure 42. La référence A est constitué des 3 plans nominaux. Elle est associée par les moindres carrés en une seule opération, avec un offset identique sur les zones A2 et A3.

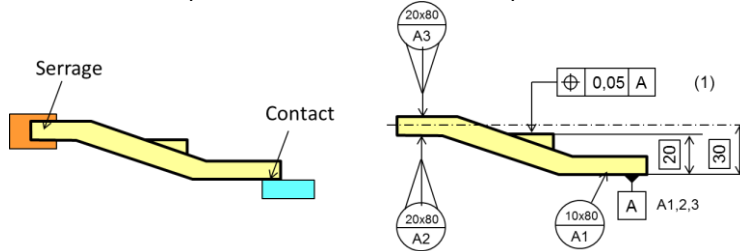


Figure 43 - Références partielles mobiles

La Figure 44 est équivalente à la Figure 42. Pour la localisation (1), le modèle nominal est associé par les moindres carrés à l'ensemble des 3 surfaces (sans offset).

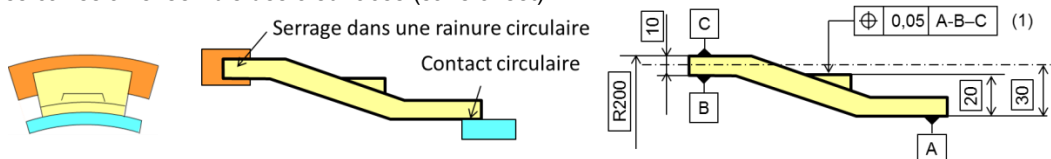


Figure 44 - Référence commune sur secteurs circulaires

## 4.2 Association avec flottage

L'assemblage Figure 45a est réalisé avec une liaison plane en deux parties assurée par contact sur A et avec du jeu sur B. Chaque partie est trop étroite pour définir à elle seule une référence plane.

Pour la localisation (1) Figure 45b, il y a une contradiction avec le critère minimax sur A et le flottage sur B.

La référence au minimum de matière impose que la spécification soit respectée quelle que soit la position permise par le flottage. La surface nominale A doit être tangente à la surface réelle A, mais il n'est pas possible de minimiser la distance maxi.

La conformité peut être réalisée à l'aide d'un gabarit et d'un calibre de contrôle Figure 45c. Le comparateur est calibré en identifiant le flottage maxi de la surface tolérancé tout en maintenant la surface A du calibre en contact avec gabarit. Avec la pièce réelle, la déviation du comparateur doit rester inférieure ou égale à ce flottage + 0,4mm, quelle que soit la position de la surface B dans le calibre, tout en maintenant le contact en au moins 1 point sur la surface A.

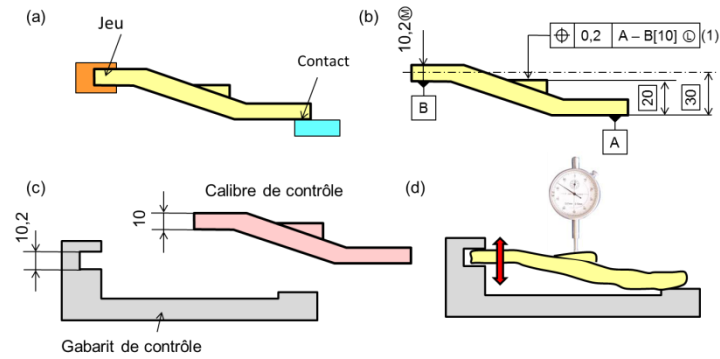


Figure 45 - Référence commune avec minimum de matière et flottement

### 4.3 Association avec des éléments de situation

La liaison plane est réalisée par deux zones de grande largeur. Le montage est très hyperstatique. Il est éventuellement possible de définir des conditions de mesure pour placer la pièce dans une forme la plus proche possible de son état de fonctionnement en reproduisant l'environnement du mécanisme.

Sinon, il faut lever l'hyperstatisme à l'aide d'éléments de situation. Pour une liaison plane, il n'y a que deux solutions :

- 3 points
- 1 droite et un point.

La Figure 46 exploite les éléments de situation indépendants.

- Le point A<PT> est défini sur le plan minimax associé à la surface réelle A.
- La droite B<SL> est définie sur le plan médian associé au deux plans B par les moindres carrés avec offset.

Le modèle nominal de la pièce est associé en imposant au plan A de passer par le point A<PT> et le plan médian de B de passer par la droite B<SL>.

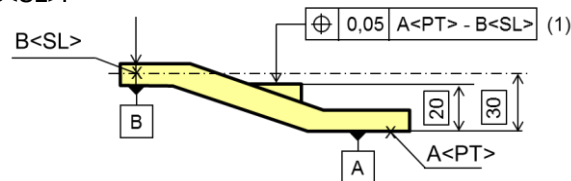


Figure 46 - Références avec éléments de situation indépendants

NOTE : cette cotation suppose par exemple que si la surface A est redressée pour devenir parallèle à B, l'axe de vrillage passe par le point A<PT>.

## 5. Spécifications avec élément de situation

### 5.1 Construction d'une référence dans un système

Dans la Figure 47, le modèle nominal est en appui sur A, centré dans B et orienté par C.

La référence D est la droite construite dans le modèle nominal associé au système de référence A|B|C. Cette droite est définie à 5 mm de B dans le plan passant par B et C.

Dans la spécification (1), D est une droite avec une mobilité résiduelle axiale. La position de la surface nominale torique est donc définie par rapport à cette droite. La mobilité axiale permet de placer si possible l'élément spécifié torique dans la zone de tolérance.

Dans la spécification (2), la zone de tolérance du tore est définie dans le système de références A|B|C. Cette zone peut ensuite être translatée dans la direction perpendiculaire à A pour placer si possible l'élément spécifié torique dans la zone de tolérance.

La spécification (1) est équivalente à la spécification (2), car la surface torique est de révolution autour de D.

La localisation (3) porte sur le groupe des 6 trous. Les 6 axes nominaux sont définis uniquement par rapport à la droite D. La position angulaire est donc indifférente autour de D. Cette spécification est donc moins sévère qu'une localisation par rapport à A|B|C.



La Figure 49b comporte une localisation avec un élément de situation qui est une droite B[SL] impossible à positionner car le système de références A|B a un degré de liberté résiduel en translation. La solution n'est pas unique. Cette spécification est incorrecte.

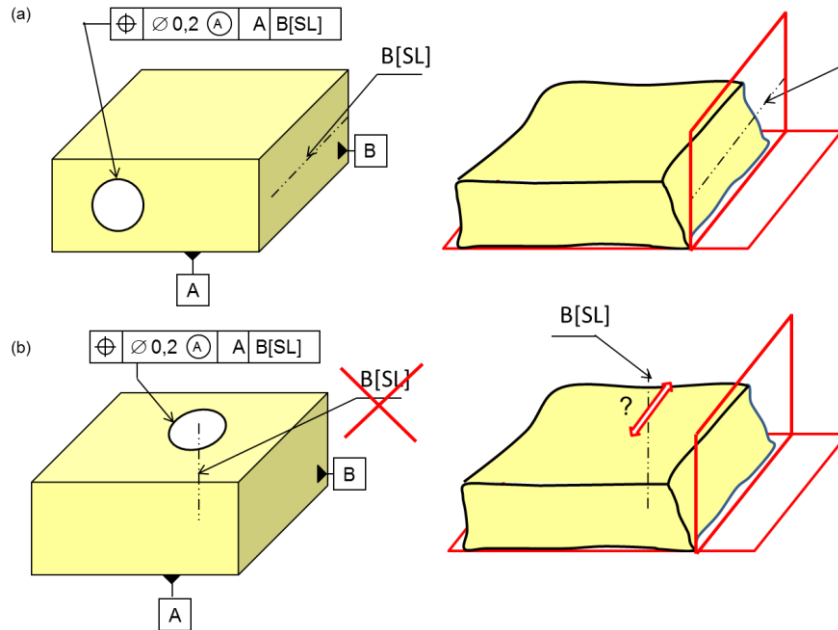


Figure 49 - Définition cohérente d'un élément de situation

### 5.2.3 Surface complexe presque cylindrique, prismatique, de révolution, sphérique

Dans la Figure 50a, la surface A est presque cylindrique. L'association de la surface nominale permet de positionner la droite A[SL] sur la pièce. Le modèle peut ensuite être déplacé sur cette droite pour placer, si possible, l'axe du cylindre spécifié dans la zone de tolérance en bénéficiant de la rotation autour de la droite et de la translation suivant l'axe de cette droite.

Dans la Figure 50b, la surface A est presque prismatique. Le modèle comporte une droite, notée A[GL]. L'association de la surface nominale permet de positionner la droite A[GL] sur la pièce. Le modèle peut ensuite être déplacé sur cette droite uniquement par une translation pour placer, si possible, les 6 alésages dans les 6 zones de tolérance.

NOTE : la différenciation A[SL] ou A[GL] est nécessaire, pour n'autoriser que la translation dans le second cas.

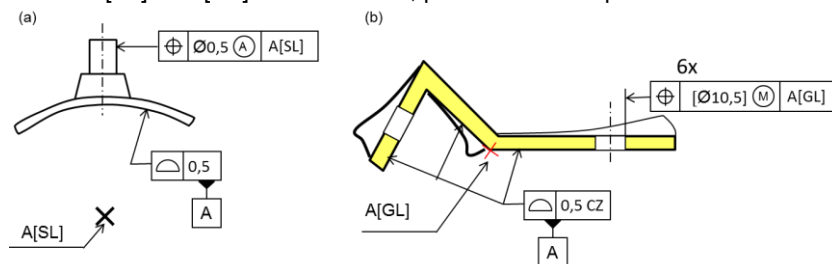


Figure 50 - surface presque cylindrique ou prismatique

Dans la Figure 51a, la surface A est presque de révolution. Le modèle comporte une droite, notée A[RV]. L'association de la surface nominale permet de positionner la droite A[RV] sur la pièce. Le modèle peut ensuite pivoter autour de cette droite pour placer, si possible, les deux alésages dans leur zone de tolérance.

Dans la Figure 51b, la surface A est presque sphérique. Le modèle comporte un point, notée A[PT]. L'association de la surface nominale permet de positionner le point A[PT] sur la pièce. Le modèle peut ensuite pivoter autour de ce point pour placer, si possible, les deux alésages dans leur zone de tolérance.

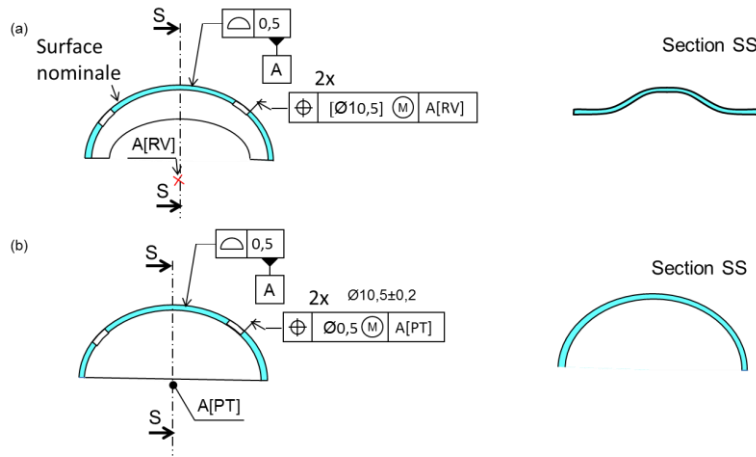


Figure 51 - surface presque de révolution ou presque sphérique

### 5.2.4 Surface secondaire assimilée à une liaison pivot

La Figure 52 présente un plan de référence primaire A et une référence secondaire B identifiée sur deux zones partielles B1 et B2 appartenant à une surface de section elliptique. Cette référence est équivalente à une droite B[SL] située sur le centre instantané de rotation.

La spécification de position (1) permet de maîtriser la forme et l'orientation de la surface B complète par rapport à A. Le modèle nominal est associé à A par le critère minimax et peut glisser sur A pour placer si possible la surface réelle B dans la zone de tolérance.

La localisation (2) impose de construire la droite B[SL]. Les zones partielles B1 et B2 sont tracées approximativement sur la pièce en utilisant la base rectangulaire ou l'ellipse pour orienter le modèle nominal. Le modèle nominal est associé à A puis à l'élément de référence secondaire B limitée aux zones partielles B1 et B2, par un critère des moindres carrés. Dans cette position, le modèle nominal définit la droite B[SL] qui est parfaitement perpendiculaire à A.

NOTE : L'incertitude sur la position des points n'a pratiquement aucun influence sur la construction de la droite B[SL] car cette droite est définie sur l'axe instantané de rotation. La droite obtenue sera très stable, en cas d'essai de répétabilité des mesures.

Pour la localisation (2), le système de références est défini par A et par la droite B[SL]. La rotation résiduelle du système de références A | B[SL] autour de la droite B[SL] permet de placer, si possible, l'axe de l'alésage C dans la zone de tolérance.

NOTE : la zone de tolérance n'est donc pas forcément dans le plan médian de l'ellipse.

Pour la localisation (3), le système de références est défini par A, par la droite B[SL] et par C. le modèle nominal glisse sur A, puis est orienté autour de B[SL] en associant la référence C par les moindres carrés avec offset. L'alésage central doit être dans la zone de tolérance.

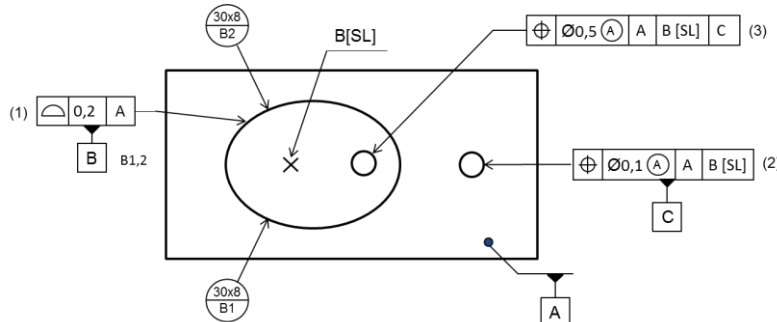


Figure 52 - Elément de situation secondaire

### 5.2.5 Orientation d'une surface complexe

La Figure 53a illustre une exigence fonctionnelle d'orientation dans un assemblage. La liaison est assurée par deux surfaces complexes F et B. La référence B est définie sur la zone partielle qui correspond à l'étendue de la surface réellement en contact avec F. Les surfaces F et B sont nominale-ment identiques.

La difficulté d'une spécification d'orientation classique d'une surface complexe est de déterminer les angles de rotation admissibles par la pièce en appui dans chaque direction et de rapporter ces angles à l'étendue de la surface fonctionnelle dans les deux directions. La solution préconisée consiste à associer à la face F un élément de situation de type « plan » nominalement parallèle à la face spécifiée de l'exigence et avec une étendue identifiée par  $\textcircled{P}$  qui correspond à la projection de la surface fonctionnelle.

Le modèle nominal comporte donc la face F et le plan de situation F[PL]. Ce modèle nominal est associé à la surface réelle F par les moindres carrés, ce qui positionne l'élément de situation F[PL] par rapport à la pièce réelle. F[PL]  $\textcircled{P}$  est donc construit selon le même principe qu'une zone projetée d'un cylindre par exemple.

La spécification de la surface F est définie indirectement en imposant le parallélisme de l'élément de situation dans la plage de projection  $\textcircled{P}$  par rapport à A (Figure 53c).

La Figure 53b indique une spécification d'orientation classique par rapport à B pour la pièce supérieure.

En négligeant les défauts de forme des surfaces, la résultante est alors simplement égale à la somme des tolérances d'orientation.

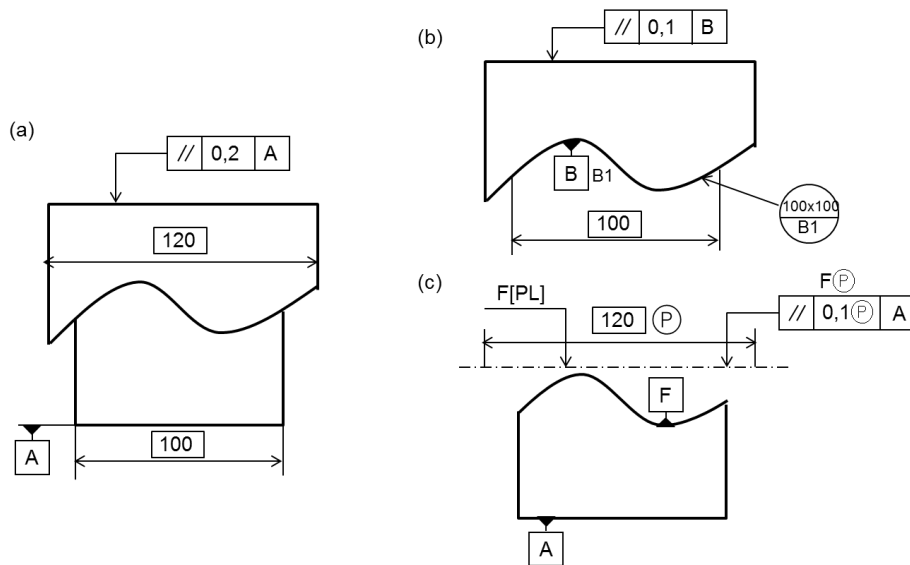


Figure 53 - Orientation d'une surface complexe

### 5.3 Élément de situation indépendant

#### 5.3.1 Association d'éléments de situation en référence commune

La Figure 54 présente une liaison formée par 3 plans A, B, C avec chacun un élément de situation.

Chaque plan est associé à son élément de référence, indépendamment des autres plans. Les trois normales ne sont pas rigoureusement perpendiculaires.

L'association du modèle nominal est assurée en incluant simultanément les 3 droites A<SL>, B<SL> et C<SL> dans les 3 faces du modèle nominal.

Le nominal est complètement placé par les trois références communes. Il positionne la zone de tolérance de l'alésage.

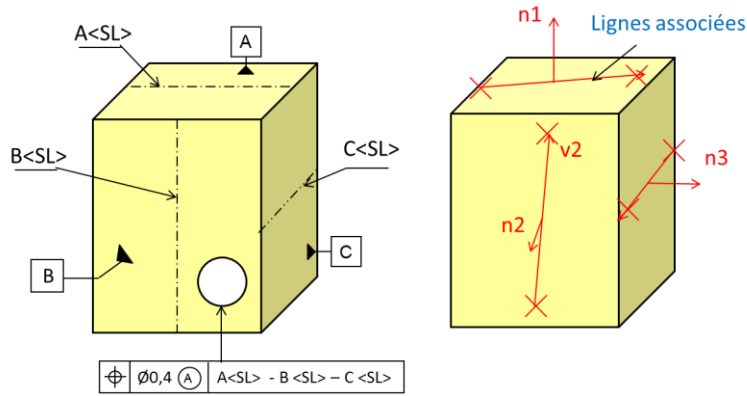


Figure 54 - Références commune sur des éléments de situation

### 5.3.2 Cohérence de l'élément de situation indépendant

La Figure 55a comporte un élément de situation désigné sur la surface B. Un plan minimax est associé à l'élément de référence B, indépendamment des autres surfaces. La droite B<SL> est définie dans ce plan. Cette droite n'est pas forcément rigoureusement parallèle à A. Pour la localisation, le modèle nominal est associé à l'élément de référence A par le critère minimax, le plan de référence B passe par la droite B<SL>. Le plan de référence B est donc potentiellement en partie dans la matière.

La cotation Figure 55b n'est pas cohérente. L'élément de situation est une droite inclinée qui ne peut pas être incluse dans la référence B.

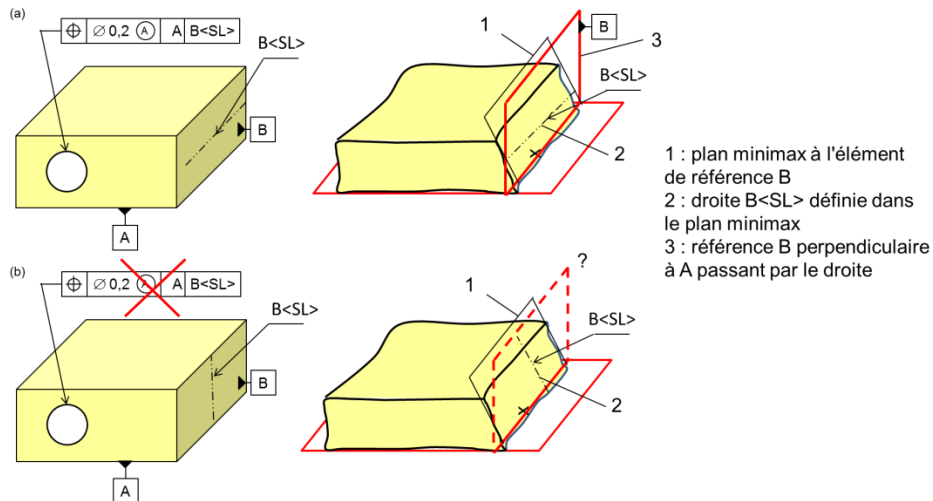


Figure 55 - Construction des éléments de situation

Il est également très difficile de définir un élément de situation <SL> sur la génératrice d'un cylindre, car il ne sera très difficile de faire passer la modèle nominal cylindrique par cette droite. Il est nécessaire de limiter l'association à 2 points.

### 5.3.3 Mobilité équivalente dans le plan tangent à la surface

La Figure 56 représente une pièce comportant une partie tubulaire déformable. Le montage est hyperstatique. La cotation présentée définit les tolérances admissibles à l'état libre.

La pièce est en appui plan sur A, centrée dans B avec du jeu et en appui sur la génératrice du cylindre contre un plan. Dans cette jonction, la génératrice est nominalement perpendiculaire au plan A. Lors du montage, l'hyperstatisme de la jonction est levé par la déformation de la partie tubulaire. La zone partielle C1 est restreinte à une bande de largeur 8 mm au voisinage du contact du cylindre avec la pièce voisine.

La planéité (1) impose la qualité du plan de contact primaire.

La perpendicularité (2) assure la montabilité de cette jonction.

Le défaut de forme (3) impose la rectitude du secteur circulaire C1 de contact avec la pièce voisine.

Lors de la mise en place de cette pièce, la partie tubulaire se déforme pour orienter le plan A et perpendiculairement à la zone partielle C1. La droite A<SL> est une droite du plan associé par le critère minimax à l'élément de référence A. Cette droite est dans un plan nominalement parallèle au plan tangent à la zone partielle C1. Elle ne subit donc pas de couple de torsion et est considérée comme invariante dans cette déformation.

De même, deux éléments de situation de type point notés C<PT1> et C<PT2> sont définies sur la génératrice du cylindre associé au secteur cylindrique CA par le critère minimax.

Le modèle nominal est associé à une référence commune A <SL> - B [Ø20,05]Ⓛ - C<PT1> - C<PT2>

Le modèle nominal est associé à ces références de sorte que :

Le plan A passe par la droite A<SL> qui bloque 2 ddl.

Le cylindre C passe par les 2 points C<PT1> et C<PT2> qui bloquent 2 ddl.

La zone de tolérance [Ø20,05]Ⓛ centrée sur le cylindre B doit contenir l'élément de référence B en bloquant 2 ddl.

Cette association est possible car le système de références est isostatique.

La localisation (4) impose que le plan réel A soit dans une zone de tolérance de 0,2 par rapport à la surface A du modèle nominal.

La localisation (5) impose que la zone partielle C1 soit dans une zone de tolérance de 0,4 par rapport à la surface C du modèle nominal.

Ces deux localisations limitent la déformation de la pièce lors de l'installation dans le mécanisme.

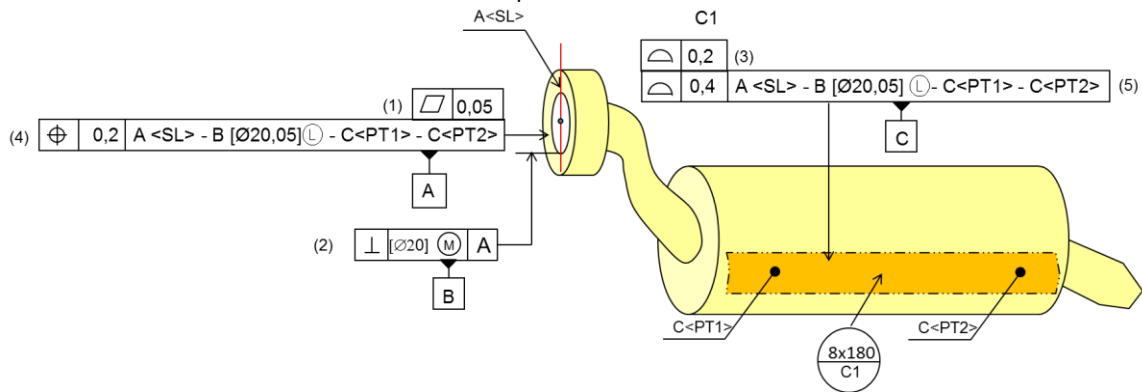


Figure 56 – Définition de lignes neutres par les éléments de situation

NOTE : Il n'aurait pas été possible de définir une droite C<SL> sur le cylindre. En effet, cette droite n'aurait pas pu appartenir exactement au cylindre nominal, car la génératrice ne serait pas rigoureusement parallèle à l'axe du cylindre.

## 6. Référence avec élément de contact

### 6.1 Élément de contact à l'état libre

#### 6.1.1 Référence primaire sur trois sphères

La pièce Figure 57 est mise en position isostatique sur 3 billes placées dans les 3 vés.

Les surfaces en contact sont de natures différentes. La liaison est modélisée par des éléments de contact.

Dans les deux spécifications, la référence A[CF] indique que la référence A est associée à un ou plusieurs éléments de contact. A est une surface composée de 6 plans formant 3 vés à 120°.

Il n'y a pas de référence partielle, donc toute la surface est potentiellement au contact des éléments de contact.

Les 3 éléments de contact sont 3 sphères de diamètre 8. Chaque sphère est positionnée dans son vé, mais chaque sphère possède encore une mobilité dans la direction du vé. La position nominale des trois sphères est définie par 3 points situés sur un cercle de rayon 20 et à 120° l'un de l'autre centré sur l'axe de symétrie de la pièce.

NOTE : cette liaison est bien isostatique. Le montage de la pièce est possible quels que soient les petits défauts de la surface A.



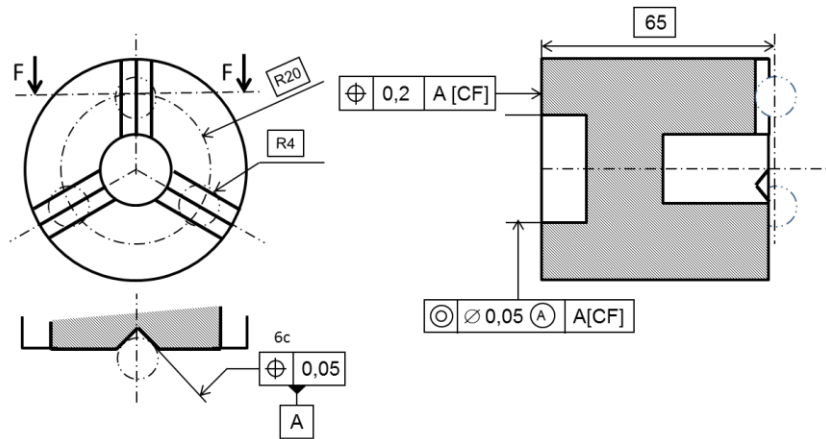


Figure 57 - Système de références avec primaire en CF

Le modèle est associé en plaçant 3 sphères étant en position nominale, c'est-à-dire sur une cercle de rayon 20mm tous les 120°. Le modèle (avec ses 3 sphères) peut être placé sur ces 3 sphères, pour définir la zone de localisation du plan ou de l'axe du cylindre.

La mesure peut être réalisée en simulant les éléments de contact. La pièce peut être placée sur un montage avec 3 billes Ø8 en position relative nominale, c'est-à-dire sur une cercle de rayon 20mm tous les 120°. Le repère mesure doit être établi sur ces 3 sphères.

Une méthode sans montage consiste à placer 3 billes dans les vés, approximativement sur un cercle de rayon 20mm. La référence est définie par le plan passant par les 3 centres et par l'intersection de 3 droites coplanaires, faisant un angle de 120° contenant les 3 centres.

La mesure directe n'est pas très simple, car chaque bille a sa propre mobilité dans son vé. La méthode nécessite 3 étapes.

Etape 1 : Pour chacun des 6 plans constituant A, association par le critère minimax d'un plan identifié aux voisinages des points supposés de contact entre la sphère et la surface réelle.

Etape 2 : Pour chaque paire de plans associés constituant un vé, définition d'une droite représentant l'axe d'un cylindre Ø8 posé dans le vé en faisant l'intersection de deux plans offset de 4mm.

Etape 3 : Recherche des 3 points appartenant aux 3 droites situées sur un rayon de 20 mm et formant des angles de 120° (la solution est unique).

Ce besoin fonctionnel peut aussi être décrit par une cotation avec 6 références partielles ponctuelles correspondant aux 6 points théoriques de contact avec les sphères (Figure 58).

L'association du modèle nominal est réalisée en identifiant un ou plusieurs points au voisinage des zones partielles ponctuelles et en associant la surface A nominale (avec ses 6 plans en positions relatives parfaites) par la méthode des moindres carrés.

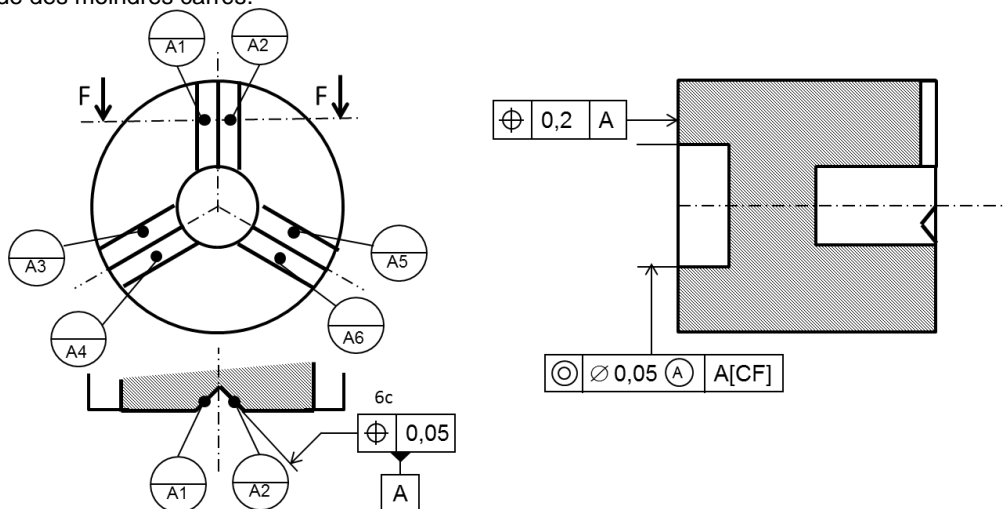


Figure 58 - Système de références avec 6 références partielles ponctuelles

NOTE : l'emploi d'éléments de situation n'apporterait rien.

### 6.1.2 Référence secondaire sur plan

Le levier est articulé en A. la surface B est en appui sur un plan, nominalement à 20 mm de A. La zone de contact est limitée à un segment de longueur 10mm La surface B est une surface prismatique quelconque.

L'élément de contact B[CF] est en position nominale dans le modèle nominal (sans mobilité).

Le modèle nominal est associé à l'élément de référence A par les moindres carrés.

Le modèle nominal est ensuite orienté autour de A pour placer le plan B[CF] tangent à la surface réelle B limitée à l'étendue de 10mm.

Ce modèle nominal permet de vérifier les localisations (2) et (3)

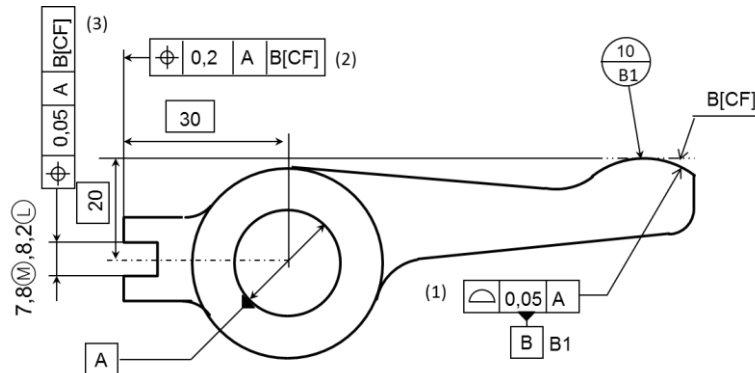


Figure 59 - Elément de contact secondaire

La vérification peut être réalisée avec un montage de contrôle en centrant l'alésage A avec un expansible, puis plaquant la surface B contre le plan B[CF] à 20 mm de A

La mesure directe est plus délicate, car il est difficile de palper des points sur le « sommet » de la surface B.

La référence A est associée par les moindres carrés aux points prélevés dans l'alésage.

Le modèle nominal est orienté approximativement sur la pièce par exemple en palpant un point au voisinage de B1 et en orientant le modèle pour que le plan B[CF] passe par ce point.

Des points sont prélevés au voisinage de la ligne B1. Ces points sont répartis en tronçons perpendiculaires à la ligne B1 (Figure 59). Dans chaque tronçon, la surface nominale B est associée avec le critère minimax avec uniquement une translation dans le plan perpendiculaire à la ligne nominale. Le point représentatif du tronçon est le point de la ligne B1 de la surface associée dans cette section.

Le modèle nominal est orienté autour de A pour rendre le plan de contact B[CF] tangent extérieur matière.

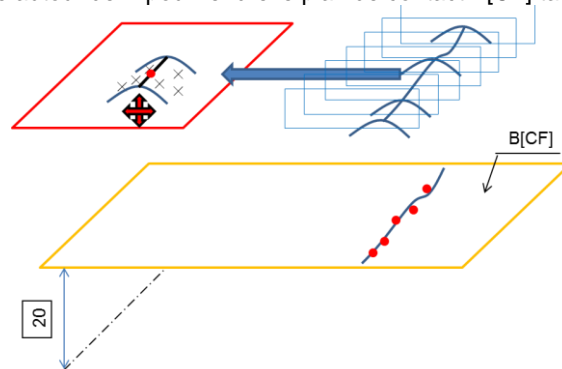


Figure 60 - Construction de l'élément de contact

### 6.1.3 Elément de contact avec contact linéique

La Figure 61a représente le modèle nominal de la pièce avec les 2 éléments de contact cylindrique B[CF] et l'élément de contact cylindrique C[CF]. Ces éléments de contact sont donc en position nominale dans le modèle nominal et en contact avec le modèle nominal (sans mobilité).

En B1 ou B2, la zone partielle est un segment de longueur 10 mm. L'élément de contact B[CF] est constitué de deux cylindres  $\varnothing 8$  en position nominale en contact seulement avec les deux segments des zones partielles.

En C, il n'y a pas de zone partielle. L'élément de contact C[CF] est un cylindre  $\varnothing 8$  en position nominale en contact avec la totalité de la hauteur de l'élément de référence C.

La référence primaire du modèle nominal est associée avec le critère minimax à l'élément de référence A. (Les mobilités résiduelles sont deux translations dans le plan A et la rotation autour de la normale à A.)

Le modèle nominal est ensuite déplacé pour placer les deux éléments de contact cylindriques en contact avec la surface réelle B. (La mobilité résiduelle est une rotation autour du centre du cylindre B en faisant glisser les éléments de contact sur la surface réelle B).

Le modèle nominal est orienté pour placer le cylindre C[CF] en contact avec la surface réelle C.

Le modèle nominal définit alors les surfaces nominales spécifiées et la zone de tolérance pour la spécification de position de surface quelconque.

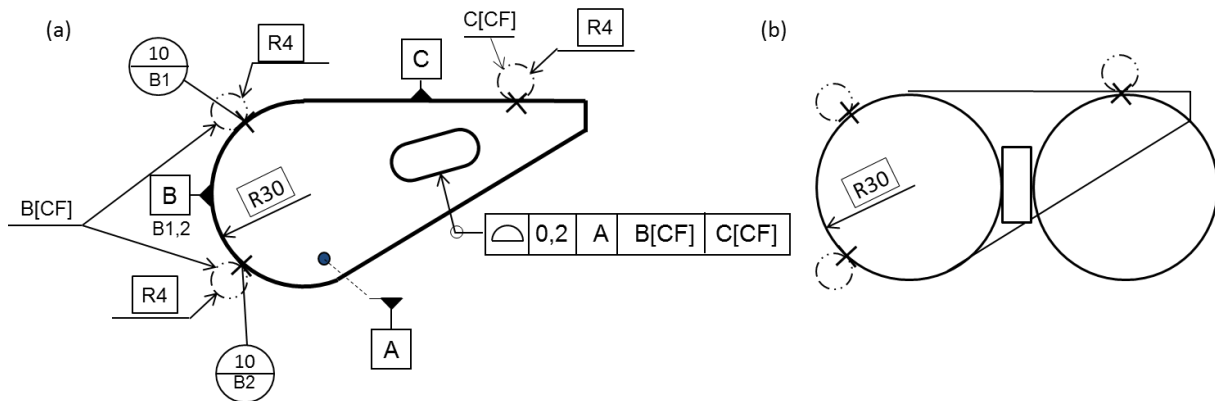


Figure 61 - Élément de contact secondaire et tertiaire

Le système de références peut être simulé à l'aide d'un montage de contrôle avec trois cylindres  $\varnothing 8$  en position nominale. Les cylindres B1 et B2 doivent être dégagés pour limiter l'étendue de la zone de contact. Pour s'affranchir des défauts de position relative des cylindres B1 et B2, l'origine du repère mesure doit être définie sur l'axe d'un calibre cylindrique de rayon 30 placé sur les deux cylindres B[CF] (Figure 61b). L'orientation du repère est définie par cet axe et par l'axe d'un second cylindre en appui sur C[CF]. Une cale placée entre les deux cylindres assure le positionnement du second calibre pour qu'il soit tangent à la surface nominale C.

Le contrôle direct de la pièce sans élément de contact revient à assimiler les éléments de contact à des zones partielles.

## 6.2 Élément de contact mobile

### 6.2.1 Mobilité avec liaison glissière

La Figure 62 représente une bague devant assurer la position relative de deux lentilles.

La spécification de forme (1) garantit la qualité de la surface torique recevant chaque lentille.

L'élément de contact A[CF] est une sphère  $\varnothing 30$  fixe dans le modèle nominal.

L'élément de contact B[CF] est une sphère  $\varnothing 30$  définie dans le modèle nominal. La surface associée est mobile par une glissière définie dans le modèle nominal. La direction de translation est l'axe passant par les deux centres des sphères nominales.

La vérification peut être réalisée avec un montage de contrôle en plaçant la bague sur une sphère A et en plaçant une seconde sphère sur B[CF]. Le modèle nominal est centré sur le centre de la sphère A[CF]. Il est orienté par la droite passant par les deux centres de sphère.

La localisation (2) porte sur la surface associée à B[CF]. Elle permet de vérifier la distance entre les centres des sphères en contact.

La localisation (3) permet de vérifier la position de l'alésage central, en prenant A[CF] comme référence primaire. La référence B[CF] est la sphère en position nominale. C'est la surface associée à B[CF] qui est décalée en contact avec l'élément de référence B.

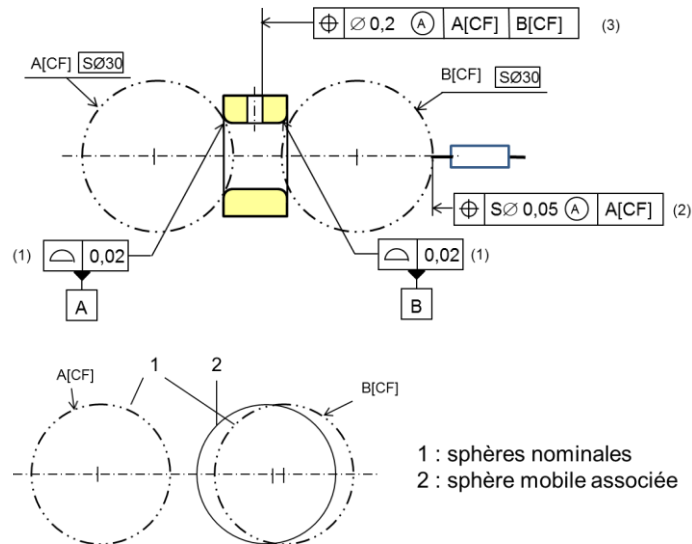


Figure 62 - Élément de contact sur glissière

La Figure 63 est similaire à la Figure 62, mais avec deux éléments de contact synchrones identifiés avec le même nombre (A[CF1] et B[CF1]) montés sur glissière. Le déplacement est tel que les distances des sphères associées aux sphères nominales sont identiques.

Pour la localisation (3), le système de références est construit sur les deux sphères nominales, sans priorité entre les éléments de contact. Ces éléments de contact sont en positions nominales. Ce sont les sphères associées qui sont décalées en contact avec les surfaces réelles A et B. Le modèle nominal est ainsi bien centré sur les sphères associées.

La spécification (2) indique la position de l'élément associé à B[CF1] par rapport à la référence nominale A[CF1]. Cette localisation ne donne pas la distance entre les sphères associées. La localisation (4) porte sur le groupe des deux sphères associées. Elle décrit bien la distance entre les centres de sphères associées.

La spécification dimensionnelle (5) convient également en imposant une tolérance sur la dimension locale mesurée entre les sphères associées.

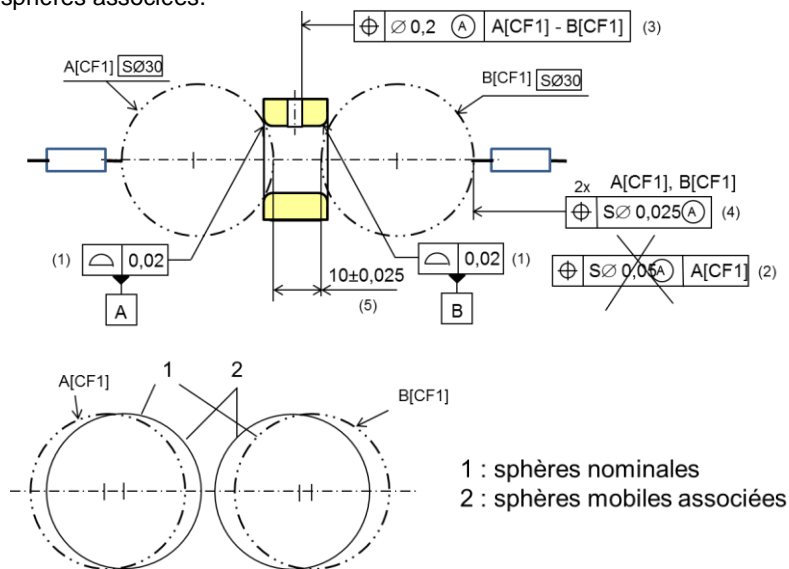


Figure 63 - Éléments de contact synchrones

## 6.2.2 Mobilité avec liaison plane

La pièce Figure 64 comporte un plan primaire A et un vé secondaire B. La localisation (2) mentionne un élément de contact B[CF] qui est un cylindre  $\varnothing 10$  monté en liaison plane, avec un plan perpendiculaire à A.

NOTE : Si l'élément de contact était fixe et parallèle à A, le contact ne pourrait se faire que sur l'un des deux plans du vé. Si l'élément de contact était monté sur une glissière, l'axe de l'élément de contact ne pourrait pas se placer dans le plan médian du vé.

L'élément de contact B[CF] est un cylindre en position nominale. La surface associée est un cylindre dont l'axe est dans le plan perpendiculaire à A passant par l'axe de l'élément de contact Cette surface associée est en contact avec les deux faces du vé.

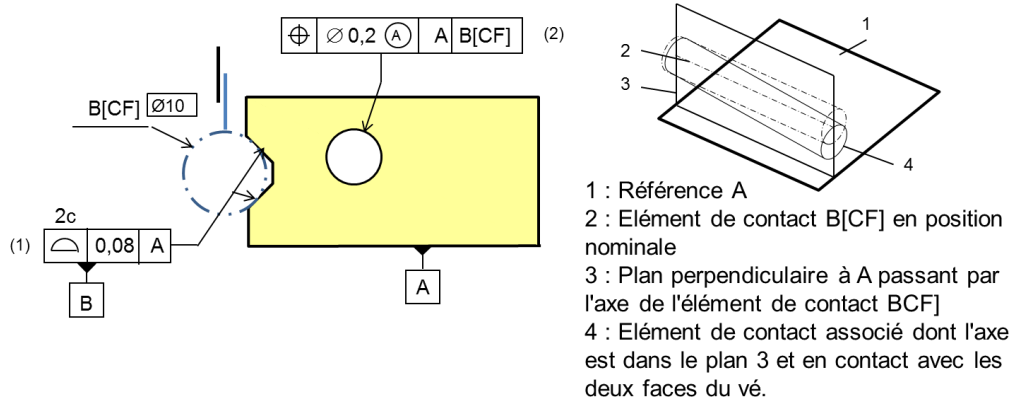


Figure 64 - Elément de contact en liaison plane

Le système de références peut être simulé à l'aide d'un montage de contrôle en plaçant un cylindre Ø10 dans le vé. Le modèle nominal est positionné sur A. L'axe de l'élément de contact est positionné dans le plan perpendiculaire à A passant par l'axe du cylindre Ø10 posé dans le vé.

## 6.3 Elément de contact à l'état libre et à l'état contraint

### 6.3.1 Elément de contact mobile

La Figure 65 présente une tubulure qui sera fixée sur deux distributeurs supposés en position relative parfaite. Les conditions de mesure imposent de fixer la pièce sur un montage muni de 2 billes distantes de 100mm et d'un appui ponctuel sur le côté du tube.

A l'état libre, les deux spécifications de forme (1) peuvent être vérifiées indépendamment pour assurer le bon contact cône sphère.

La localisation (2) a une référence primaire définie avec un élément de contact A[CF] primaire qui impose de placer une bille Ø6 dans le cône. L'élément spécifié est également un élément de contact. Une bille Ø6 dans le cône B. La localisation revient à mesurer la distance de la bille B par rapport à la bille de référence A[CF].

Les deux localisations (3) comporte une référence primaire A[CF] sur la première bille et une référence secondaire B[CF] montée sur une glissière dont l'axe passe par les deux centres des deux sphères nominales. Le modèle nominal est centré sur A[CF], puis orienté de sorte que le droite A[CF], B[CF] passe par le centre de la sphère associée matérialisé par la bille placé dans le cône B. L'orientation du modèle est définie en annulant la distance entre le point identifié au voisinage du point CA et la surface nominale C. Ces localisations vérifient l'orientation de l'axe de chaque cône par rapport à l'axe défini par les deux sphères. Cette opération impose de placer temporairement des billes dans les cônes pour établir le système de références, puis de les retirer pour identifier les axes des cônes.

Les dimensions locales (4) doivent être respectées à l'état libre.

La spécification de position de surface quelconque (5) est à vérifier sur le montage. Les écritures (5) ou (6) sont équivalentes, car la mise en position est assurée par le montage en imposant la distance entre les deux sphères. Le modèle nominal est identifié sur le montage avant de placer la pièce.

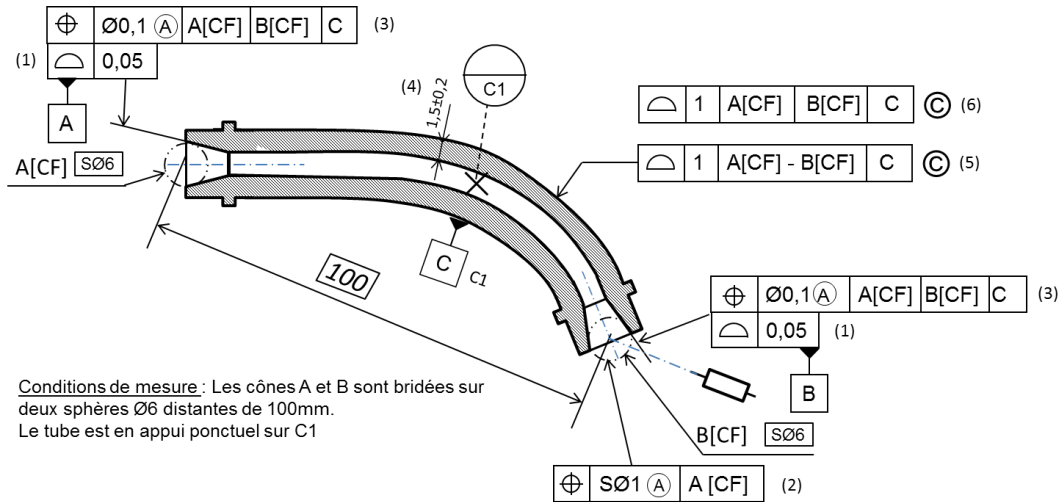


Figure 65 – Conditions de mesure avec élément de contact mobile

La mesure directe sans billes est possible à l'état libre : Chaque cône est associé avec un angle variable par les moindres carrés, pour déterminer la position du centre d'une sphère Ø6 placée dans le cône associé.

### 6.3.2 Élément de contact libre

La Figure 66 illustre une des rares possibilités d'utiliser un élément de contact libre dans une référence. Les exigences sont identiques à celles de la Figure 65.

L'élément de contact B<CF> est libre. Il est simplement placé dans le cône et a ainsi une position unique. Pour la localisation (3), le modèle nominal est centré sur A[CF]. Il est orienté de sorte que le centre de l'élément de contact B<CF> soit sur la droite nominale passant par A[CF] et B<CF>. Les conditions de mesure de la spécification (5) mettent la pièce dans la position requise. L'élément de contact B<CF> est alors confondu avec la sphère du montage de contrôle.

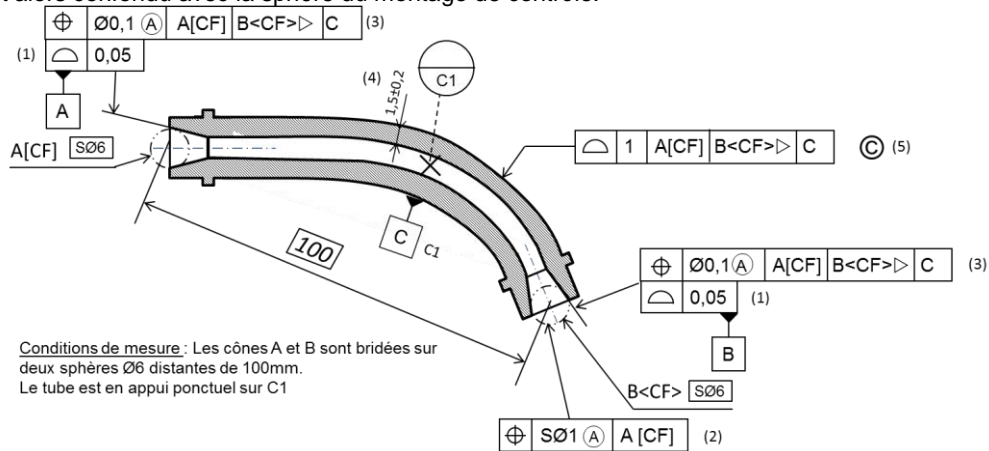


Figure 66 - Conditions de mesure avec élément de contact libre

## 7. Références en zones projetées

### 7.1 Projection dans un groupe de cylindres coaxiaux

#### 7.1.1 Spécification et référence dans un groupe homogène

La Figure 67a présente un mécanisme avec 2 pions serrés dans deux alésages. L'exigence étudiée est la montabilité de la partie des deux pions dans la plage ©. (Il est suffisant de définir la plage © pour un seul élément du groupe)

Rectitude au maximum de matière (1) : Le compteur 2c et les flèches indiquent que la rectitude porte sur les deux alésages coaxiaux. L'indication 2r signifie que la rectitude est dupliquée 2 fois de manière indépendante sur les deux paires de cylindres coaxiaux.

- Élément tolérancé : surface composée (2c) des deux cylindres réels coaxiaux (tous les points de la surface réelle)

- Zone de tolérance : espace extérieur au cylindre  $\varnothing 7,97 \text{ (M)}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

Le cadre de référence E sous la rectitude désigne les deux alésages coaxiaux. Il y a deux références E en raison de la répétition.

(2) Dimension au minimum de matière  $\varnothing 7,99 \text{ (L)}$

- Élément tolérancé : surface composée (2c) des deux cylindres réels coaxiaux identifiés par les lignes repères (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace contenu dans le cylindre  $\varnothing 7,99 \text{ (L)}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

Cette spécification est répétée 2 fois de manière indépendante (2r) pour des deux paires de cylindres coaxiaux.

(3) Localisation : C'est un groupe de deux surfaces composées de deux cylindres. Il y a 2 zones de tolérance.

- Éléments tolérancés : 2 axes associés chacun aux deux cylindres coaxiaux E. Chaque axe est l'axe du cylindre associé par les moindres carrés avec offset aux deux cylindres coaxiaux E (les deux associations sont indépendantes et indépendantes de la référence D).
- Référence primaire : plan nominal associé par minimax à la surface réelle D
- Surface nominale : 2 axes nominaux distants de 40
- Zone de tolérance : 2 zones cylindriques de diamètre 0,05.
- La spécification est vérifiée si les deux éléments tolérancés sont simultanément contenus dans les 2 zones de tolérance dans la plage  $\text{(P)}$ . Le modèle nominal peut glisser sur D pour placer si possible les axes associés dans les deux zones de tolérance (Figure 68).

(4) Localisation

- Élément tolérancé : Surface réelle cylindrique centrale
- Référence primaire : la référence D du modèle nominale est associée par minimax à la surface réelle D
- Référence secondaire : Les éléments de références sont l'ensemble des surfaces identiques à  $E \text{ (P)}$ . Les références sont les deux axes nominaux E (distants de 40). Les 2 zones de tolérance cylindriques  $\varnothing 0,05$  sont centrés sur les axes nominaux et doivent contenir les 2 axes des cylindres associés aux deux paires d'alésages E, dans toute la plage de projection indiquée par  $\text{(P)}$  (Figure 68).
- Surface nominale : cylindre perpendiculaire à D centré entre les axes nominaux E.
- Zone de tolérance : espace contenu dans un cylindre  $\varnothing 20 \text{ (L)}$  centré sur l'axe nominal.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance. Le modèle nominal peut flotter sur D tant que les axes associés aux deux éléments spécifiés E sont dans les zones de tolérance projetée, pour que l'élément tolérancé soit si possible dans la zone de tolérance.

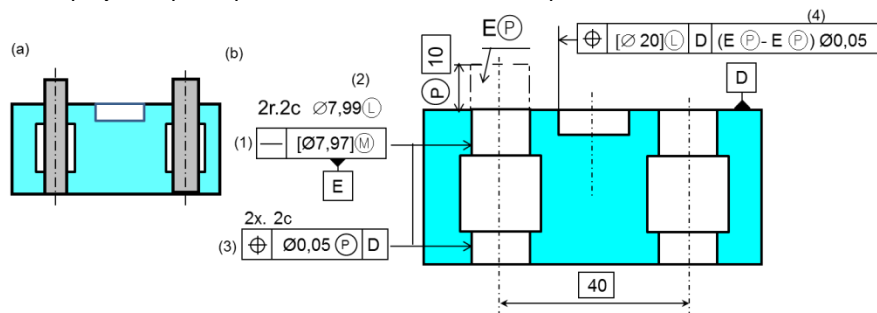


Figure 67 – Projection d'un groupe

NOTE : Si le diamètre maxi des pions est D, le diamètre au maximum de matière des deux pions est  $D + 0,05$ .

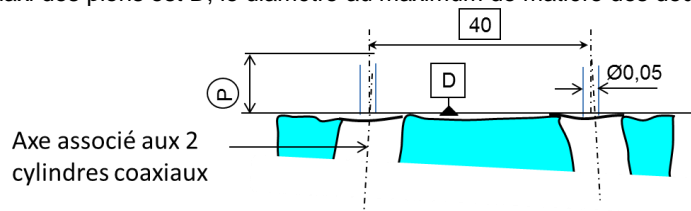


Figure 68 - Zones de tolérance de la projection

## 7.2 Composition avec des zones projetées

### 7.2.1 Référence sur deux projections coaxiales indépendantes

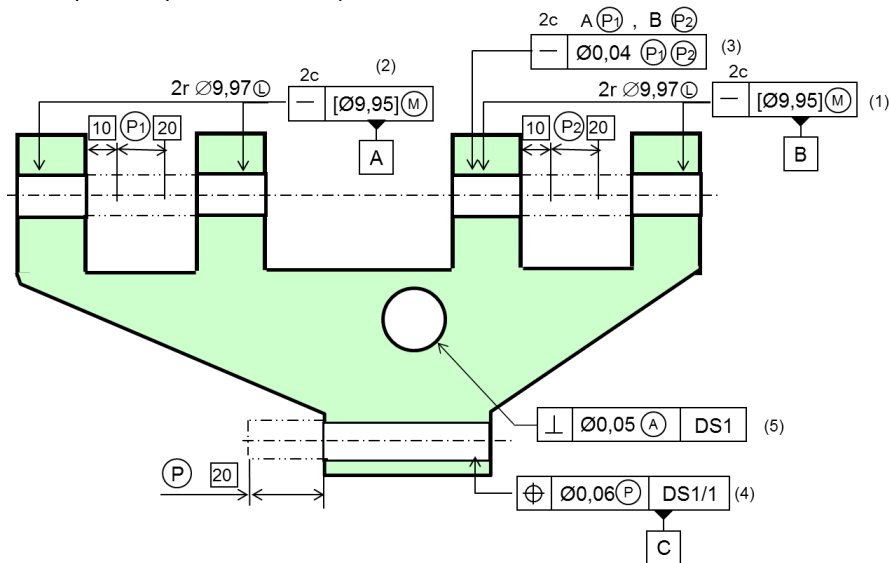
La Figure 69 illustre un bras articulé sur une liaison avec deux arbres indépendants montés dans deux chapes. Le guidage est assuré sur deux zones partielles P1 et P2 par une liaison élastique autocentrante. Les rectitudes (1) et (2) assurent la montabilité des deux arbres. Dans la rectitude (3), les éléments tolérancés sont les axes des alésages A et B projetés dans les plages P1 et P2. Les éléments tolérancés doivent être placés si possible dans un cylindre  $\varnothing 0,04$ .

Le système de références DS1 est défini dans le cartouche. Il est flottant. Les axes associés aux alésages réels A et B sont dans les zones de tolérance  $\varnothing 0,04$  centrées sur les axes nominaux A et B dans les plages P1 et P2. L'axe associé à l'alésage réel C est également dans une zone de tolérance  $\varnothing 0,04$  dans la plage P, mais à distance variable, c'est-à-dire avec un décalage admissible de la zone de tolérance dans le plan nominal défini par A-B et C. Le flottement de DS1 permet une position indépendante du système de références pour toutes les spécifications utilisant DS1.

La conformité de la référence primaire est déjà vérifiée par la rectitude (3). La conformité de la référence secondaire impose un nouveau parallélisme de l'axe de C par rapport à la primaire (sans contrainte de distance).

La localisation (4) par rapport à la référence primaire de DS1 (DS1/1) positionne l'axe de la tige montée dans C, sur la plage de projection  $\textcircled{P}$ . L'élément tolérancé est l'axe de C projeté dans la plage  $\textcircled{P}$ . L'élément tolérancé doit être compris dans un cylindre  $\varnothing 0,06$  quelle que soit la position de la pièce de sorte que les axes de A et de B soient dans un cylindre  $\varnothing 0,04$  centré sur le nominal dans les plages P1 et P2. (La rotation autour de A-B reste disponible pour placer si-possible la surface tolérancée dans la zone de tolérance).

La perpendicularité (5) par rapport à DS1 oriente l'axe réel de l'alésage par rapport à l'axe nominal défini par rapport à A-B et C. L'élément tolérancé doit être compris dans un cylindre  $\varnothing 0,05$  quelle que soit la position de la pièce de sorte que les axes de A et de B soient dans un cylindre  $\varnothing 0,04$  centré sur le nominal dans les plages P1 et P2 et que l'axe de C soit dans un cylindre  $\varnothing 0,04$  dans la plage P. L'axe de ce dernier cylindre doit se trouver dans le plan nominal passant par A-B et C, et parallèle à l'axe nominal de C.



Nom du système	Description	Commentaire
DS1	$(A\varnothing 0,04 \textcircled{P}_1 - B\varnothing 0,04 \textcircled{P}_2) \textcircled{L}$ $C\varnothing 0,04 \textcircled{P} \textcircled{L} \triangleright$	

Figure 69 – Projection sur deux arbres indépendants

### 7.2.2 Référence sur deux projections restreintes à un point

La Figure 70 illustre un bras articulé sur une liaison avec deux arbres indépendants montés dans deux chapes. Le guidage est assuré sur deux zones partielles ponctuelles P3 et P4 (centre de rotulage des roulements, considérés sans jeu).

Les rectitudes (1) et (2) assurent la montabilité des arbres.

Dans la rectitude (3), les éléments tolérancés sont les axes des alésages A et B projetés dans les plages P1 et P2. Les éléments tolérancés doivent être placés si possible dans un cylindre  $\varnothing 0,04$ . (Cette spécification permet de limiter l'angle de rotulage des roulements montés sur P1 et P2).

Le système de références DS1/1 limité à la référence primaire est construit en plaçant les points A(P3) et B(P4) identifiés sur les axes des alésages A et B sur la droite nominale A-B. Le modèle nominal peut tourner librement autour de cet axe et éventuellement se translater suivant cet axe.



L'orientation (4) et la localisation (5) positionne l'axe de la tige montée dans C par rapport à DS1. L'axe de C doit être parallèle à son axe nominal dans la plage de projection P1 (pour limiter l'angle de rotulage du roulement). Le point P2 de C doit être localisé dans un cylindre  $\varnothing 0,2$  par rapport à son axe nominal.

La perpendicularité (5) oriente l'axe de l'alésage par rapport à l'axe nominal. Le modèle nominal est associé de sorte que les deux zones ponctuelles P3 et P4 soient centrées sur l'axe nominal défini dans DS2.

Le système de références DS1 est construit en plaçant les points A(P3) et B(P4) identifiés sur les axes des alésages A et B sur la droite nominale A-B, puis le point C(P2) décalé par rapport à l'axe C nominal dans le plan nominal formé par A-B et C nominal. La translation suivant l'axe A-B reste disponible pour placer si besoin la surface tolérancée dans la zone de tolérance.

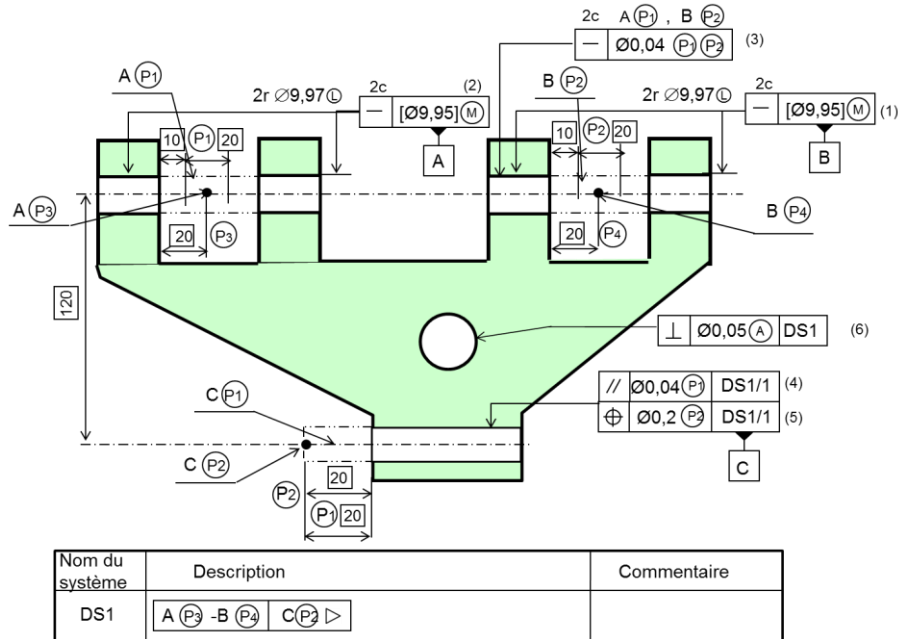


Figure 70 - Référence sur 2 points projetés

### 7.2.3 Référence composée d'une projection et d'un mini matière

La Figure 71 illustre un bras articulé sur une liaison avec deux arbres indépendants. Un arbre est serré dans l'alésage A. L'autre arbre est fixé dans la pièce voisine et est guidé avec du jeu dans l'alésage B.

La rectitude (1) assure la montabilité de l'arbre avec serrage dans A.

La rectitude (2) assure la montabilité simultanée dans l'arbre dans la plage A(P) et dans l'alésage B au maximum de matière. La zone de tolérance est obtenue par concaténation d'un cylindre  $\varnothing 0,02$  devant contenir l'axe de A dans la plage (P) et d'un cylindre  $\varnothing 10(M)$  devant être hors matière de la surface réelle de l'alésage B.

Le système de références DS1/1 limité à la référence primaire est défini au-dessus du cartouche. Il est flottant. La référence impose que l'axe associé à l'alésage réel A soit dans un cylindre  $\varnothing 0,02$  centré sur l'axe nominal dans la plage A(P) et que la surface réelle de B respecte le cylindre  $\varnothing 10,05(L)$  centré sur l'axe nominal. L'axe associé à l'alésage réel C est également dans une zone de tolérance  $\varnothing 0,04$  dans la plage (P), mais à distance variable, c'est-à-dire avec un décalage admissible de la zone de tolérance dans le plan nominal défini par A-B et C.

La localisation (3) positionne l'axe de la tige montée dans C par rapport à DS1/1. Quelle que soit la position du modèle nominal respectant le système de références DS1/1, l'axe associé à l'alésage réel C doit être compris sur la plage (P) dans une zone de tolérance limitée par deux plans distants de 0,2, parallèles au plan d'orientation F défini dans le nominal associé à DS1/1. Cette zone est centrée sur l'axe nominal de C.

La perpendicularité (5) impose que l'axe réel de l'alésage doit être dans une zone de tolérance  $\varnothing 0,05$  parallèle à l'axe nominal défini dans DS1, quelle que soit la position du modèle nominal permise par DS1.

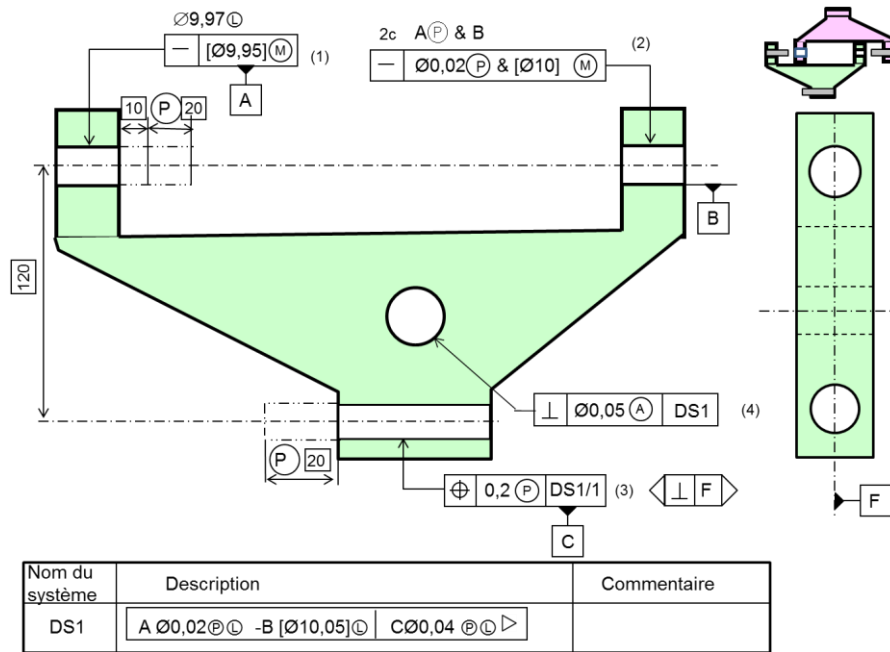


Figure 71 - Composition d'une projection et d'une liaison avec jeu

## 7.2.4 Spécification et référence dans un groupe hétérogène

La Figure 72 illustre un groupe d'éléments tolérancés différents, en zones projetées. La vue de dessus montre que le motif P (petits alésages) est répété deux fois. Le motif G (grands alésages) est répété 2 fois.

Rectitude au maximum de matière (1) : avec l'indication  $2r\ P$  la rectitude est dupliquée 2 fois de manière indépendante pour chaque élément du motif P (pour chaque paire d'alésages coaxiaux de diamètre identiques)

- Élément tolérancé : surface composée (2c) des deux cylindres réels coaxiaux (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace extérieur au cylindre  $\varnothing 7,97\text{M}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.
- Le cadre de référence E désigne les deux cylindres coaxiaux d'un motif P. Il y a deux références E (une par motif)

Rectitude au maximum de matière (1bis) : idem pour les 2 motifs G, avec un diamètre  $11,97\text{M}$ .

- Le cadre de référence F désigne les deux cylindres coaxiaux d'un motif G.

La coaxialité (2) est dupliquée de manière indépendante dans les deux motifs P.

- Élément tolérancé : surface cylindrique réelle du chambrage (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace extérieur au cylindre  $\varnothing 14\text{M}$
- Référence : espace contenu dans le cylindre  $\varnothing 7,99\text{L}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance et que les deux cylindres coaxiaux désignés par E sont dans la zone de tolérance de la référence.

La dimension au minimum de matière  $\varnothing 14,3\text{L}$  est appliquée de manière indépendante dans chaque motif P.

- Élément tolérancé : cylindrique réelle du chambrage (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace contenu dans le cylindre  $\varnothing 14,3\text{L}$
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance.

La coaxialité (2bis) : idem pour les 2 motifs G, avec des diamètres  $18\text{M}$ ,  $\varnothing 11,99\text{L}$ ,  $18,3\text{L}$ .

Il y a une plage de projection (P1) en deux exemplaires pour les motifs P et une plage (P2) en deux exemplaires pour les motifs G.

La localisation (3) porte sur un ensemble constitué des 4 axes dans les plages projetées respectives.  $(E^{P1} - E^{P1})$  désigne l'ensemble des axes identiques à E respectivement projetés dans la zone  $^{P1}$ . Chaque axe doit se trouver dans un cylindre  $\varnothing 0,05$  centré sur l'axe nominal. L'expression de la tolérance sous la forme  $\varnothing 0,05\ ^{P1}\ ^{P2}$  est équivalente à  $\varnothing 0,05\ ^{P1} - \varnothing 0,05\ ^{P2}$

NOTE : l'indication des surfaces tolérancées par (E-E) <sup>(P1)</sup> , (F-F) <sup>(P2)</sup> n'est pas équivalente, car la projection <sup>(P1)</sup> serait une seule projection des axes associés en une seule opération aux 2 alésages E.

La localisation (4) positionne le trou central par rapport aux 4 éléments projetés :

- Élément tolérancé : surface cylindrique réelle de l'alésage central (tous les points de la surface réelle)
- Zone de tolérance : espace contenu dans le cylindre Ø20(L)
- Référence primaire : le modèle nominal est associé à l'élément de référence D par le critère minimax.
- Référence secondaire :
  - o E <sup>(P1)</sup> -E <sup>(P1)</sup> désigne l'ensemble des axes identiques à E respectivement projetés dans la zone <sup>(P1)</sup>. Pour chaque exemplaire de E, l'axe de l'alésage E associé par la méthode des moindres carrés avec offset doit être contenu dans un cylindre Ø0,05 centré sur l'axe nominal dans la plage projetée <sup>(P1)</sup>.
  - o F <sup>(P2)</sup> -F <sup>(P2)</sup> désigne l'ensemble des axes identiques à F respectivement projetés dans la zone <sup>(P2)</sup>. Pour chaque exemplaire de F, l'axe de l'alésage F associé par la méthode des moindres carrés avec offset doit être contenu dans un cylindre Ø0,05 centré sur l'axe nominal dans la plage projetée <sup>(P2)</sup>.
- La spécification est vérifiée si l'élément tolérancé est contenu dans la zone de tolérance et que les 4 axes associés aux entités de référence E et F sont simultanément dans les 4 zones de tolérance.

NOTE : l'écriture sous la forme (4) est équivalente à l'écriture (5), car la zone de tolérance Ø0,05 est commune à tous les axes..

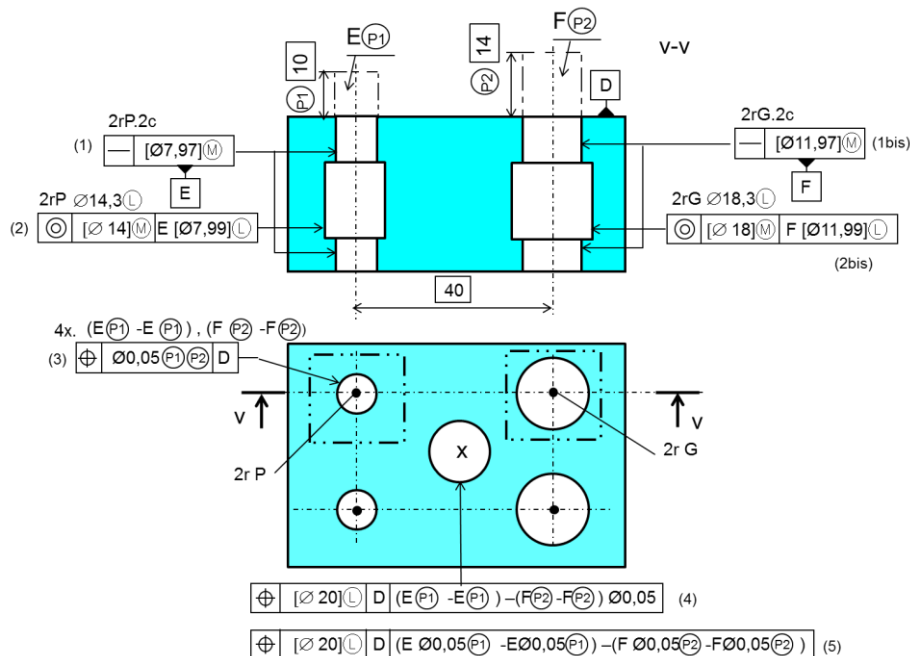


Figure 72 - Groupe hétérogène

### 7.3 Référence sur des centres de rotulage

La Figure 73 présente un arbre monté sur deux roulements coniques. L'axe de rotation est défini par les deux centres de rotulage. Chaque roulement est en appui plan sur l'épaule de l'arbre.

La cotation fonctionnelle de l'arbre impose les spécifications suivantes :

- Planéités (1) : qualité du contact du roulement sur l'arbre
- Perpendicularité (2) au maximum de matière : Montabilité du roulement en maintenant l'appui plan primaire.
- Diamètre (3) au minimum de matière : diamètre limitant le jeu maxi pour éviter l'effet de laminage de l'arbre par le roulement.
- Construction (4) d'un élément de contact C de type point dans le système de référence A|B (A associé par minimax, B par moindres carrés avec offset. Le point C est à 15 mm de A.
- Construction (5) d'un élément de contact F de type point dans le système de référence D|E (D associé par minimax, E par moindres carrés avec offset. Le point F est à 15 mm de D.
- Perpendicularité (6) de la face d'appui du plan par rapport à l'axe défini par C et F. Le modèle nominal est positionné avec C confondu avec l'élément de situation correspondant. Il est ensuite orienté de sorte que l'élément de situation F soit sur l'axe de révolution, décalé par rapport au point F nominal dans la

direction CF. Cette orientation de la face d'appui primaire de la bague intérieure du roulement limite l'angle de rotulage du roulement.

- Coaxialité (7) : l'axe réel de ce cylindre doit être dans une zone de tolérance cylindrique  $\varnothing 0,05$  centré sur l'axe nominal. Le modèle nominal est positionné par C et F. (comme ci-dessus)

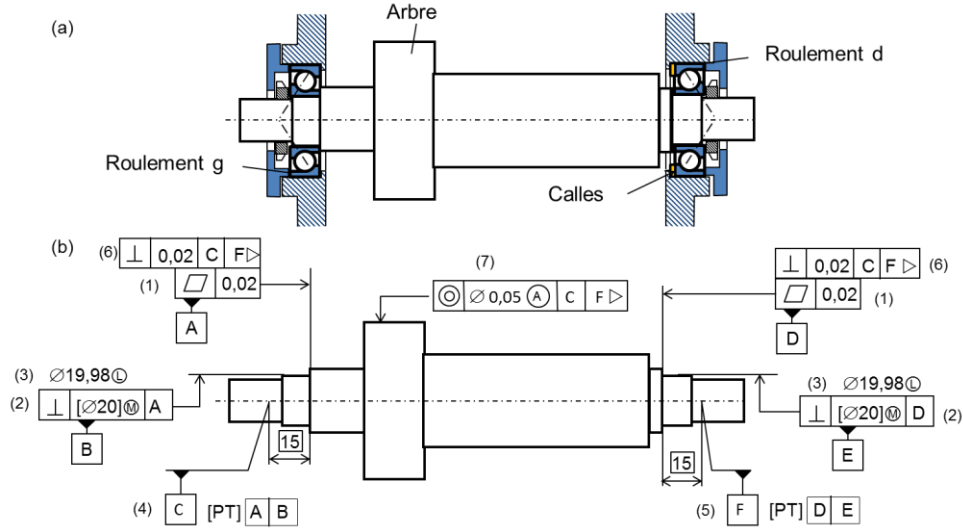


Figure 73 - Référence sur les centres de rotulage de roulements