

## Plan de l'article (pour information).

1	Introduction.....	2
2	Le concept GPS, une norme ISO ?.....	3
3	Les concepts généraux, la norme ISO 17450-1 (juin 2005).....	4
3.1	Présentation.....	4
3.2	Le contenu de la norme.....	4
3.2.1	Les modèles.....	4
3.2.2	Classe d'invariance et degré d'invariance.....	5
3.2.3	Les opérateurs.....	6
3.3	Que retenir de cette norme.....	7
3.4	Norme complémentaire, ISO 14660.....	7
4	Un langage complexe.....	8
5	L'évolution des normes applicatives (ISO 1101 et ISO 5459).....	9
5.1	Présentation.....	9
5.2	La norme ISO 1101 (février 2005) et son amendement.....	9
5.2.1	Un changement ?.....	9
5.2.2	Un tableau difficile à comprendre.....	9
5.2.3	La collection (groupe d'éléments).....	10
5.2.4	L'amendement de la norme 1101.....	12
5.2.5	Que retenir de cette norme ?.....	13
5.3	La norme ISO 5459 (à paraître).....	13
5.3.1	Un changement ?.....	13
5.3.2	Constat sur la norme version 1981.....	13
5.3.3	Rappel des rôles des références spécifiées.....	14
5.3.4	Les contraintes entre les références.....	15
5.3.5	Les règles (lecture et écriture).....	17
5.3.6	Que retenir de cette norme ?.....	19
6	Interprétation ou signification.....	20
7	Conclusion.....	20
8	Bibliographie.....	20

## Cotation ISO.

### Les nouvelles normes.

#### Une évolution nécessaire

#### Frédéric Charpentier

Professeur Agrégé de Génie Mécanique  
Formateur à l'IUFM de Créteil et à l'ESCPI/CNAM dans la formation ingénieurs 2000.  
Expert Français AFNOR - ISO à l'UNM au TC 213 (GPS).  
Email : [Frederic.Charpentier@cfc-technic.com](mailto:Frederic.Charpentier@cfc-technic.com)

### Résumé

Cet article traite de l'évolution des principales normes de spécification du produit. L'évolution du langage normalisé à partir du concept GPS (spécification géométrique du produit) fait apparaître des normes conceptuelles nécessaires à l'homogénéisation des normes applicatives. Parmi ces normes conceptuelles, l'ISO 17450-1 : juin 2005 permet de comprendre l'évolution des normes applicatives, l'ISO 1101 : février 2005, son amendement, et l'ISO 5459 qui doivent être publiées très prochainement. Les nouvelles normes, quelles conséquences ?

### 1 Introduction.

La cotation fonctionnelle des produits industriels devient une préoccupation grandissante dans les démarches de conception intégrée. Afin de répondre à des problématiques de prescription, de conception et de vérification, les différents acteurs industriels, contribuant à l'élaboration des produits, doivent utiliser un système de communication rigoureux et général. La démarche normative liée à la « spécification géométrique des produits » s'efforce de donner des outils permettant de répondre à ces problématiques.

La normalisation constitue alors un outil de communication avec les différents acteurs (les utilisateurs, les concepteurs produit, les concepteurs méthode, les fabricants, les pouvoirs publics et tous les autres partenaires). Les différentes normes sont élaborées, par consensus, par l'ensemble des acteurs du marché, au travers de groupes de travaux dans les bureaux de la normalisation.

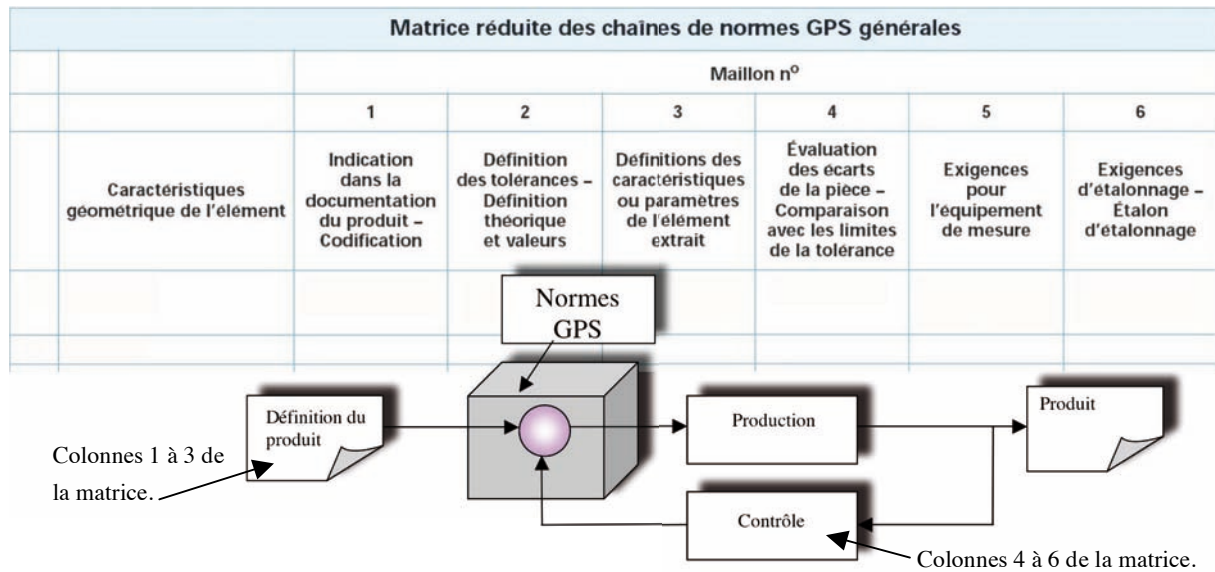
Il est important de rappeler que les normes ne sont pas des textes législatifs ou réglementaires, mais bien des textes de références officiels auxquels chacun peut se référer de façon volontaire. Cette adhésion volontaire explique que certaine entreprise n'y adhère pas de façon systématique. Mais « *la normalisation est une activité essentiellement technique à vocation économique* » [1], propos de F. CONTET, lors de la présentation du séminaire : cotation ISO : les nouvelles normes, quelles conséquences ? .

Une étude effectuée dans les années 90, dans le secteur de l'automobile française révélait que 80 % [2] des difficultés rencontrées lors des mesures dimensionnelles sont dues principalement à une méconnaissance des normes de la part des concepteurs produit ou méthode, ou des métrologues. Les 20 % restant sont dus aux lacunes ou aux divergences entre les différentes normes.

En 1996, un comité technique est créé, l'ISO/TC 213 (TC comité technique) ; il est chargé des « spécifications dimensionnelle et géométrique des produits ». Ce comité travaille à partir d'un outil de programmation et d'analyse mis au point sous forme de matrice : la matrice GPS. Celle-ci a pour but de visualiser les normes existantes, pour chaque caractéristique dimensionnelle, macro géométrique et micro géométrique, allant du langage graphique à l'exigence de l'appareillage de mesure, en passant par des définitions univoques et des procédures de mesure.

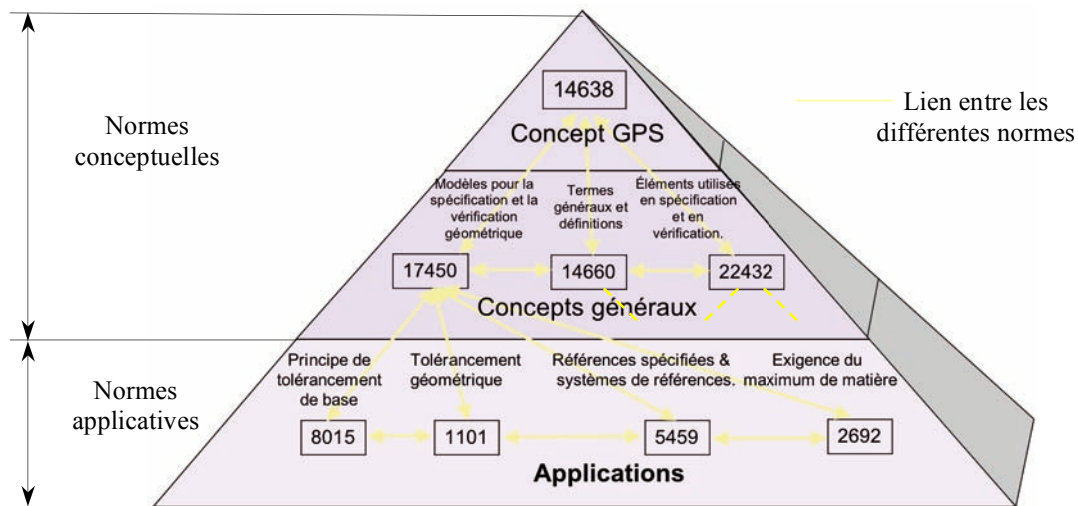
## 2 Le concept GPS, une norme ISO ?

Le concept, mis en place sous forme de matrice, permet d'identifier les normes manquantes et les doublons. Il donne lieu à une première norme ISO/GPS : Schéma directeur [3], figure 1.



Cette norme a pu déstabiliser, dans un premier temps, les différents acteurs, utilisateurs des normes ISO. Les propos échangés lors des formations ou des consultations témoignent de ce constat par l'expression suivante : « je sais « coter » ISO mais pas GPS »[4].

Ne nous trompons pas de cible ; cette norme : schéma directeur, expression du concept GPS, n'est pas une norme applicative par définition.



Elle s'inscrit dans un processus qui permet de définir des concepts généraux (normalisés) utiles à des normes applicatives, figure 2. Ces dernières sont des normes que nous utilisons pour la plupart depuis les années 80. Ces concepts généraux vont permettre d'homogénéiser les termes et les définitions. La norme : concepts généraux – partie 1 : Modèle pour la spécification et la vérification géométriques [5] est présentée dans le paragraphe 3.

### À qui s'adresse les normes conceptuelles ?

En premier, aux normalisateurs, afin qu'ils puissent faire « l'état de l'art » des normes associées à la prescription, la conception et la vérification des produits.

Puis en second, à tous ceux qui souhaitent comprendre le processus qui conduit de la prescription au contrôle. Parmi eux, nous trouvons les concepteurs produit et méthode, mais aussi tous les acteurs des formations aux normes ISO/GPS.

Lors de la spécification de son produit, le concepteur peut se limiter aux seules normes applicatives.

## 3 Les concepts généraux, la norme ISO 17450-1 (juin 2005).

### 3.1 Présentation.

Pour les formateurs, les normalisateurs et les chercheurs, cette norme est fondamentale. Elle est née du besoin d'identifier explicitement les éléments géométriques, les caractéristiques et les conditions des composants à produire. Elle est destinée à être utilisée comme un outil de base pour réviser et compléter les normes existantes, les normes applicatives. Elle offre un langage déclaratif pour la spécification et la vérification des produits disposant d'outils basés sur les caractéristiques des éléments, sur les contraintes entre ces éléments et sur les opérations des éléments utilisés. Elle permet ainsi de déclarer une **spécification** comme une **condition** sur une **caractéristique** définie sur des **éléments géométriques** obtenus par des **opérations**.

Cette norme fait appel à des normes complémentaires comme l'ISO 14660 : octobre 1999 et l'ISO 22432 (à paraître) qui restent des normes conceptuelles.

### 3.2 Le contenu de la norme.

**Préambule :** *L'objet de ce paragraphe n'est pas de décrire de façon exhaustive le contenu de cette norme mais bien de donner des axes directeurs. Pour plus d'informations, il est nécessaire de consulter la norme.*

#### 3.2.1 Les modèles.

Le concepteur définit un « composant [6] » (pièce) de géométrie parfaite avec des formes et des dimensions adaptées aux fonctions techniques élémentaires [6], le modèle nominal (ou les éléments idéaux), figure 3. À partir de cette géométrie nominale (ou idéale), le concepteur produit imagine un modèle de la surface réelle (élément non idéal, skin modèle), représentant les variations possibles de la surface réelle du composant, figure 4.

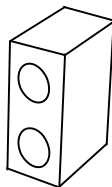


Figure 3 : Modèle nominal. Figure 4 : « image » des surfaces réelles (skin modèle).

Le « **skin** » **modèle** est constitué de surfaces réelles (interfaces entre la matière et son environnement) dont les différentes parties jouent des rôles fonctionnels distincts dans le mécanisme à l'échelle micro-géométrique et/ou macro-géométrique.

**Remarque :** La représentation même de la surface réelle du composant (skin modèle) est une filtration par l'outil de description, la photographie. Sa représentation peut conduire à faire émerger de faux concepts. Afin de donner une « image » des surfaces réelles du composant, l'illustration est une photographie, figure 4.

### 3.2.2 Classe d'invariance et degré d'invariance.

La géométrie nominale est constituée d'éléments idéaux (ou éléments géométriques) de nature ponctuelle, linéique ou surfacique appartenant à l'une des 7 **classes d'invariance** [9], figure 5.

Classe d'invariance	Degré d'invariance
complexe	Aucun
prismatique	1 translation selon une droite
de révolution	1 rotation autour d'une droite
hélicoïdale	1 translation selon une droite et 1 rotation combinée autour de la même droite
cylindrique	1 translation selon une droite et 1 rotation autour de la même droite
plane	1 rotation autour d'une droite et 2 translations dans un plan perpendiculaire à cette droite
sphérique	3 rotations autour d'un point

Figure 5 : Classe et degré d'invariance.

Il est alors possible de définir des caractéristiques intrinsèques pour les éléments idéaux (angle au sommet d'une surface conique, diamètre d'une surface sphérique, ...) et des éléments de situation (point, droite, plan et hélice) comme l'axe d'une surface cylindrique.

Les caractéristiques de situation (situation relative des éléments idéaux) se définissent entre les éléments idéaux. Ces caractéristiques se classent en caractéristiques de position (distance) ou d'orientation (angle).

Le **degré d'invariance** d'un élément idéal est le nombre de déplacements pour lequel l'élément reste identique (invariant) dans l'espace. La classification en degré d'invariance s'appuie sur la théorie des SATTs introduit par A. Clément dans les années 90 [10].

**Exemple :** Pour une surface cylindrique, la translation suivant l'axe et la rotation autour de l'axe laissent le cylindre invariant. Le degré d'invariance est 2.

La classe d'invariance est cylindrique, figure 5.

**Remarque :** la collection d'éléments idéaux appartient à l'une de ces 7 classes.

#### Les classes et les degrés d'invariance servent à quoi ?

En conception ou en métrologie [11], par exemple, la recherche des caractéristiques de situation entre deux cylindres non nominalemeent parallèles peut se déterminer à partir de la classe d'invariance des éléments idéaux et leur degré d'invariance, figure 11.

La classe d'invariance de l'élément idéal (Cy1 ou Cy2) est de classe cylindrique, son degré d'invariance est de 2.

La classe d'invariance de la collection de ces deux éléments idéaux (Cy1 et Cy2) est de classe complexe, son degré d'invariance est de 0.

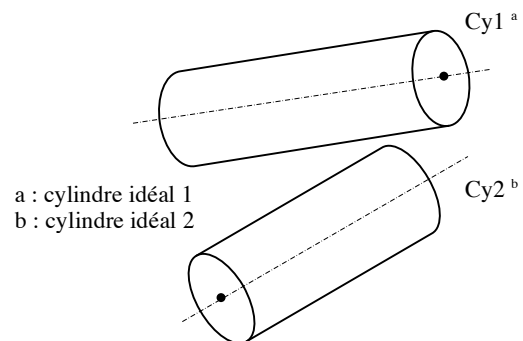


Figure 6 : Deux surfaces cylindriques non nominalemeent parallèles.

Le nombre de caractéristiques est défini par la relation suivante [12] :

$$\left( \begin{array}{c} \text{Le nombre de} \\ \text{caractéristiques} \end{array} \right) = [6 - \text{degré d'invariance S1}] + [6 - \text{degré d'invariance S2}] - [6 - \text{degré d'invariance S1} \cup \text{S2}]$$

Appliquons cette relation aux deux surfaces cylindriques non nominalemeent parallèles, avec S1 la surface cylindre Cy1 et S2 la surface cylindrique Cy2, figure 6.

$$\left( \begin{array}{c} \text{Le nombre de} \\ \text{caractéristiques} \end{array} \right) = [6 - 2] + [6 - 2] - [6 - 0]$$

Soit

$$\left( \begin{array}{l} \text{Le nombre de} \\ \text{caractéristiques} \end{array} \right) = 2$$

Le nombre de caractéristique de situation est de deux, une dimension linéaire (l'entraxe en les deux axes) et une dimension angulaire (l'angle porté par la direction, produit vectoriel des directions des deux axes).

### Que faire pour une géométrie avec défaut ?

Les caractéristiques de situation entre les éléments idéaux et les éléments non idéaux sont basées sur les distances entre chaque point des éléments non idéaux avec l'élément idéal.

#### 3.2.3 Les opérateurs.

Pour définir correctement une spécification dimensionnelle ou géométrique, il est nécessaire que le concepteur produit et le métrologue utilisent la même démarche conduisant à utiliser six « opérations » basées sur les différents groupes d'éléments.

Les groupes d'éléments sont les éléments idéaux (définis par leur type, leur classe et leur caractéristique) et les éléments non idéaux (les éléments intégraux ou dérivés, extrait ou les éléments réels : skin model).

Les opérations sont la partition, l'extraction, le filtrage, l'association, la collection et la construction. L'ensemble de ces opérations est détaillé dans la norme ISO 22432 [8] (à paraître).

La **partition** permet d'obtenir des éléments non idéaux bornés à partir de la peau du composant (skin modèle), figure 7.

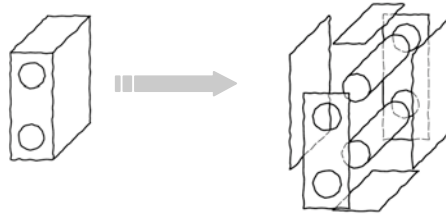


Figure 7 : Partition : identifier des éléments bornés.

L'**extraction** permet d'identifier un nombre fini de points à partir d'un élément, selon des règles spécifiques., figure 8.

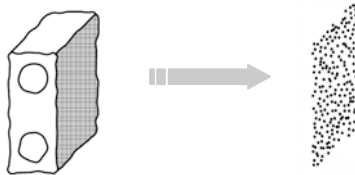


Figure 8 : Extraction : identifier un nombre fini de points.

Le **filtrage** permet de distinguer la rugosité, l'ondulation, la structure et la forme,...

L'**association** permet d'ajuster un (des) élément(s) idéal(aux) à un (des) élément(s) non idéal(aux), selon des règles spécifiques appelées critères, figure 9.

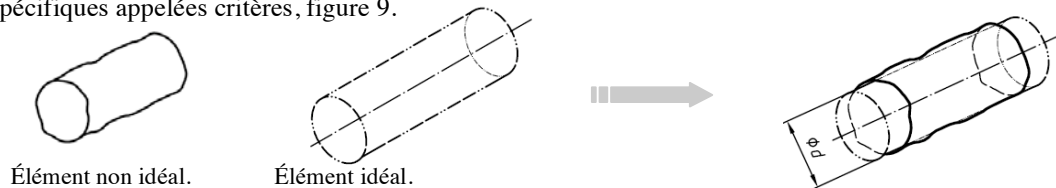


Figure 9 : Association : ajuster un élément idéal à un élément non idéal.

La **collection** permet de considérer et d'identifier ensemble des éléments qui, conjointement, jouent un rôle fonctionnel, figure 10.

a : cylindre idéal 1.

b : cylindre idéal 2.

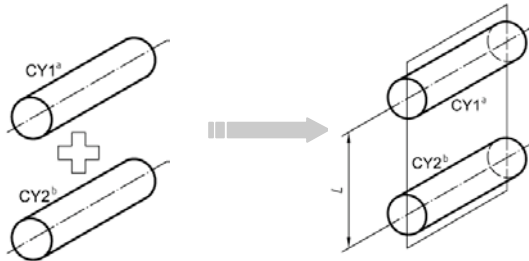


Figure 10 : Collection : considérer ensemble des éléments.

La **construction** permet de construire un (des) élément(s) idéal(aux) à partir d'autre(s) élément(s), figure 11.

a : plan idéal 1.

b : plan idéal 2.

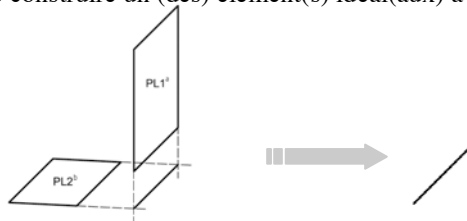


Figure 11 : Construction : construire un élément idéal à partir d'autres éléments.

**Synthèse sur les opérations :** Toutes ces opérations permettent d'exprimer les spécifications par dimension ou par zone ; elles permettent de définir les procédures de mesure cohérentes et univoques pour le métrologue.

### 3.3 Que retenir de cette norme.

Cette norme est basée sur l'expression d'opération appliquée aux éléments idéaux et non-idéaux. Elle définit trois familles d'éléments géométriques (idéaux, non idéaux et limités), six types d'opérations (partition, extraction, filtration, collection, association et construction), des caractéristiques intrinsèques d'un élément idéal, des caractéristiques de situation entre des éléments, et des conditions qui définissent un intervalle dans lequel doit se trouver une dimension (caractéristique).

Cette norme offre un langage qui permet une représentation formelle des informations pour les activités de conception, de fabrication et de contrôle intégrant une vue réaliste des composants. Ce langage déclaratif pour la spécification et la vérification géométrique des produit fait parti d'un modèle, le modèle Geospeeling ( Model for Geometrical Specification and Verification) [13].

### 3.4 Norme complémentaire, ISO 14660.

**Préambule :** *L'objet de ce paragraphe n'est pas de décrire de façon exhaustive le contenu de cette norme mais bien de donner des axes directeurs. Pour plus d'informations, il est nécessaire de consulter la norme.*

Pour compléter les termes et définitions des éléments idéaux et non idéaux, la norme ISO 17 450-1 n'est pas suffisante, il est nécessaire de consulter la norme ISO 14660.

Les termes et définitions développés dans cette partie sont les éléments intégraux et les éléments dérivés.

L'**élément intégral** est une ligne ou une surface.

L'**élément dérivé** est un centre, ligne médiane ou surface médiane provenant d'un ou de plusieurs éléments intégraux.

Deux termes sont à retenir : intégral et dérivé.

Pour illustrer les définitions, l'exemple choisi est un cylindre.

### Les éléments idéaux.

Les deux termes (élément intégral et élément dérivé) sont complétés par le mot **nominal**, figure 12.

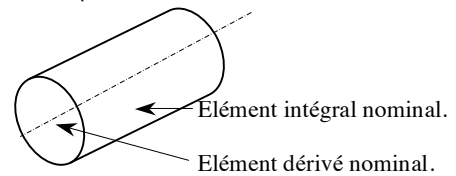


Figure 12 : Géométrie idéal.

### Les éléments non idéaux.

La surface réelle de la pièce, le « skin » modèle.

Seul l'un des deux termes est complété par le mot **réel**, figure 13. L'élément intégral réel (ou encore l'élément réel) est un élément intégral consécutif de la surface réelle de la pièce, limité par des éléments intégraux réels adjacents. Il n'existe pas d'élément dérivé réel. L'expression « axe réel de la surface réelle » n'a aucun sens.

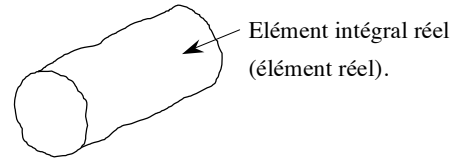


Figure 13 : « image » du « skin » modèle.

Les deux termes sont complétés par le mot **extrait**, figure 14.

L'**extraction** permet d'obtenir l'élément intégral extrait à partir de l'élément intégral réel.

Les opérateurs (cf. 3.2.3) permettent d'obtenir l'élément dérivé extrait à partir de l'élément intégral extrait (cf. : annexe A3 a – norme ISO 17450-1).

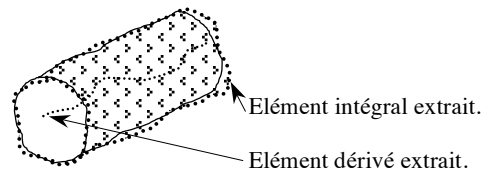


Figure 14 : géométrie non-idéale.

### Les éléments idéaux.

L'**association** permet de construire des éléments intégraux, des éléments dérivés **directement** associés ou **indirectement** associés. Les éléments associés sont des éléments idéaux.

L'**élément dérivé directement associé** est l'**élément dérivé nominal** issu de l'**élément intégral nominal** associé à l'**élément intégral extrait**, figure 15.

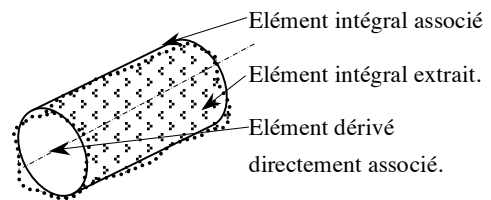


Figure 15 : élément dérivé directement associé.

L'**élément dérivé indirectement associé** est l'élément géométrique (droite) associé à l'**élément dérivé extrait**, figure 16.

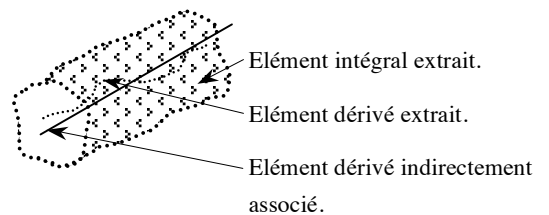


Figure 16 : élément dérivé indirectement associé.

## 4 Un langage complexe.

La description des pièces mécaniques lors des différentes phases de conception, de fabrication et de contrôle s'appuie sur des modèles de représentation d'une géométrie idéale pour laquelle différentes activités de modélisation et de simulation se sont développés, notamment autour de la maquette numérique. La limitation des défauts géométriques des pièces est aujourd'hui largement développée par les normes GPS sous forme d'informations graphiques. Les termes et définitions précédents permettent une communication entre les différentes applications métiers de la représentation du produit, dont l'activité est fondamentale. Cette communication dépend fortement de la sémantique des données échangées, de leur pérennité, de leur partage et des possibilités de les réutiliser. Les normes conceptuelles présentées dans cette première partie témoignent de l'importance de définir une communication robuste, dont le langage déclaratif s'appuie sur des termes et des définitions exploitables dans les normes applicatives tant au niveau de la conception du produit qu'au niveau de la métrologie.

À la lecture de cette première partie, est-ce un langage complexe? Je ne le pense pas, car bien au contraire, il manquait entre ces normes applicatives des liens, une homogénéité dans les termes et les définitions, laissant la place à des « experts » qui comblaient ce vide en créant un « méta langage divergent » des normes ISO/GPS.

Ce langage normatif ne se complexifie pas, il se dévoile clairement permettant une cohérence dans la spécification des caractéristiques.

## 5 L'évolution des normes applicatives (ISO 1101 et ISO 5459).

**Préambule :** *L'objet de ce paragraphe n'est pas de décrire de façon exhaustive le contenu de ces normes mais bien de donner des axes directeurs. Pour plus d'informations, il est nécessaire de consulter les normes.*

### 5.1 Présentation.

Les normes les plus usitées par le concepteur produit sont au nombre de 10, figure 17. Parmi cette liste de normes, nous retrouvons la norme 1101 (tolérancement de forme, d'orientation, de position et de battement) et la norme 5459 (références spécifiées et systèmes de références spécifiées).

L'évolution de la norme 1101 a pour volonté d'intégrer à moyen terme les normes relatives à la zone de tolérance, c'est-à-dire, les normes sur la zone de tolérance projetée (ISO 10578 – 1992), la cotation des pièces non-rigides (ISO 10579 – 1993), le tolérancement des localisations (ISO 5458 – 1998), la cotation et tolérancement des cônes (ISO 3040 – 1990) et le tolérancement des profils (ISO 1660 – 1988).



Figure 17 : 10 normes de base pour le concepteur produit [14].

### 5.2 La norme ISO 1101 (février 2005) et son amendement.

#### 5.2.1 Un changement ?

Qu'est ce qui a changé après 22 années d'utilisation de la précédente version de cette norme ?

En première lecture peu de chose.

En y regardant de plus près, vous trouverez l'intégration des normes conceptuelles (ISO 17 450 et ISO 14 660) dans le chapitre 18 (de la norme 1101 : 2005), définitions des tolérances géométriques. Les éléments idéaux sont remplacés par des éléments non idéaux dans les zones de tolérance et la syntaxe utilisée est en trait pointillé fort pour les **éléments dérivés extrait** et en trait interrompu court fort pour les **éléments intégraux extraits**. Cette évolution est fondamentale!

#### 5.2.2 Un tableau difficile à comprendre.

Le tableau de présentation des différents symboles a évolué, figure 18. Dans sa première version (1983), la première colonne à gauche désignait des éléments isolés ou associés. Cette colonne souvent difficile à comprendre fut oubliée, laissant émerger de faux concepts, interdisant l'utilisation des symboles de forme d'une ligne quelconque ou de surface quelconque dans les tolérances de position et d'orientation.

Éléments et tolérances		Caractéristiques tolérancées	Symboles	Paragraphes
Éléments isolés	Tolérances de forme	Rectitude	—	14,1
		Planéité	▭	14,2
		Circularité	○	14,3
		Cylindricité	⊘	14,4
		Forme d'une ligne quelconque	⤿	14,5
Éléments isolés ou associés		Forme d'une surface quelconque	⤿	14,6
Éléments associés	Tolérances d'orientation	Parallélisme	//	14,7
		Perpendicularité	⊥	14,8
		Inclinaison	∠	14,9
	Tolérances de position	Localisation	⊕	14,10
		Concentricité et coaxialité	⊙	14,11
		Symétrie	≡	14,12
	Tolérances de battement	Battement simple	↗	14,13
		Battement total	↗↗	14,14

Tolérances	Caractéristiques	Symbole	Référence associée	Paragraphe
Forme	Rectitude	—	non	18.1
	Planéité	▭	non	18.2
	Circularité	○	non	18.3
	Cylindricité	⊘	non	18.4
	Profil d'une ligne	⤿	non	18.5
	Profil d'une surface	⤿	non	18.7
Orientation	Parallélisme	//	oui	18.9
	Perpendicularité	⊥	oui	18.10
	Inclinaison	∠	oui	18.11
	Profil d'une ligne	⤿	oui	18.6
	Profil d'une surface	⤿	oui	18.8
Position	Localisation	⊕	oui ou non	18.12
	Concentricité (pour des centres)	⊙	oui	18.13
	Coaxialité (pour des axes)	⊙	oui	18.13
	Symétrie	≡	oui	18.14
	Profil d'une ligne	⤿	oui	18.6
	Profil d'une surface	⤿	oui	18.8
Battement	Battement circulaire	↗	oui	18.15
	Battement total	↗↗	oui	18.16

Figure 18 : Symboles des caractéristiques géométriques, évolution du tableau 1983 et 2005 .

5.2.3 La collection (groupe d'éléments).

Dans la version précédente (1983), lorsque les éléments fonctionnellement indépendants ont les mêmes caractéristiques le langage graphique permet des simplifications d'écriture, figure 19. Cette représentation graphique reste inchangée dans la version de 2005.

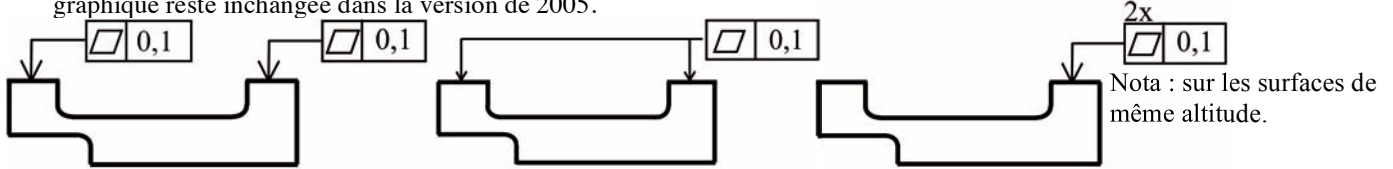


Figure 19 : Spécification sur plusieurs éléments ne jouant pas le même rôle fonctionnel.

**Remarque importante :** Le signe x ne donne pas lieu à une collection d'éléments (groupe d'éléments). Il permet simplement de ne pas recopier le langage graphique sur chaque surface faisant l'objet d'une spécification de forme. Il ne faut pas confondre la fonction technique élémentaire avec la syntaxe d'un langage graphique.

Dans l'exemple suivant (figure 20), le 3 avant la caractéristique dimensionnelle de l'alésage ne donne aucunement lieu à une collection (d'éléments ayant le même rôle fonctionnel).

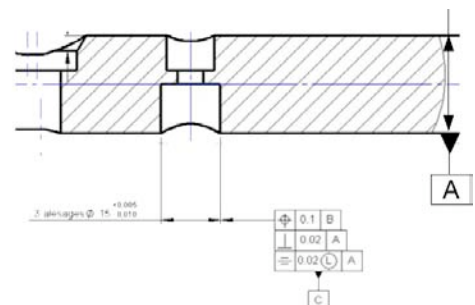


Figure 20 : Eléments (simples) – sujet du concours externe de PLP option productive 2005.

**La collection d'éléments ou groupe d'éléments.**

Lorsque que les deux éléments de la figure 19 ont le même rôle fonctionnel, les éléments ne font qu'un, un groupe, une collection d'éléments.



Figure 21 : Collection d'éléments.

La norme 1101 de 1983 reste principalement limitée aux éléments simples (simple ≠ collection), sauf dans le cas de la notion de zone de commune.

Pour exprimer une caractéristique sur une collection d'éléments, il faut utiliser une norme complémentaire, la norme ISO 5458 : 1998, tolérancement des localisations. En reprenant l'exemple du sujet du PLP, figure 20, si les trois alésages ont le même rôle fonctionnel, c'est-à-dire, qu'ils forment une collection (ou un groupe) d'éléments, les spécifications sont les suivantes, figure 22.

Remarque : la perpendicularité s'applique à un élément (simple) et non au groupe (afin de montrer la différence entre les syntaxes graphiques)

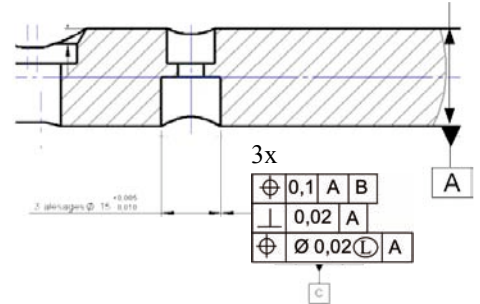


Figure 22 : Collection d'éléments (groupe).

**Quelle est l'évolution avec la version de 2005, sur ce point ?**

Une évolution somme toute mineure, le déplacement du texte : zone commune, de l'extérieur du cadre de la spécification vers l'intérieur, dans la case de la tolérance, en utilisant l'acronyme en anglais, soit CZ, figure 23.

**Attention**, « CZ » n'est pas un modificateur, il ne doit pas être entouré. C'est un opérateur de collection.

Mineure, peut être pas, si nous poussons cette notion de collection au-delà.

La collection peut servir à gérer la variation d'épaisseur d'un couvercle dont les deux surfaces qui encadrent la matière sont des éléments dont le profil est défini suivant la figure 24.

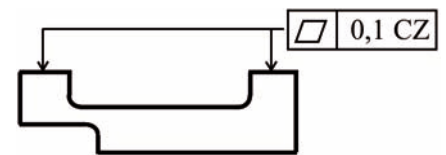


Figure 23 : zone commune, version 2005.

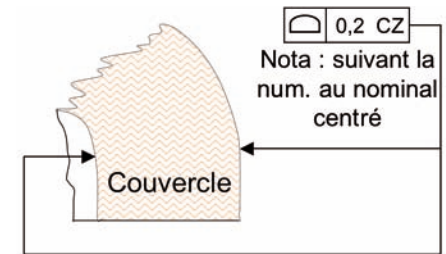
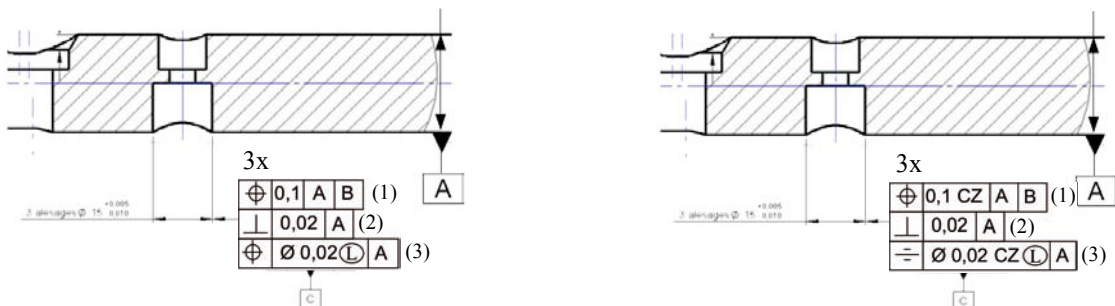


Figure 24 : deux profils de surface en zone commune.

**Que devient l'écriture des spécifications de la figure 22, dans le cas d'une collection d'éléments, figure 25 ?**



a : Collection d'éléments (normes iso 1101 : 1983 et ISO 5458 : 1998).

b : Collection d'éléments (norme ISO 1101 : 2005).

Figure 25 : collections d'éléments.

**Remarques :**

- ✓ Pour le cas a, le “3x” signifie à la fois la répétition des spécifications lorsqu’elles ne sont pas rattachées aux deux autres alésages (ISO 1101) et la collection (ISO 5458) d’éléments pour les spécifications n°1 et 3.
- ✓ Pour le cas b, le “3x” signifie simplement la répétition des spécifications lorsqu’elles ne sont pas rattachées aux deux autres alésages. Il n’y a pas d’ambiguïté sur la notion de collection lorsque l’opérateur CZ se trouve dans la case de la tolérance.
- ✓ Dans les deux cas, la spécification n°2 s’adresse à un élément (simple ≠ collection). Le “3x” signifie simplement la répétition des spécifications lorsqu’elles ne sont pas rattachées aux deux autres alésages.

Les précédentes remarques ne doivent pas inciter le lecteur à abandonner la norme ISO 5458 lorsque les fonctions techniques élémentaires conduisent à caractériser une collection d’éléments, elle reste d’actualité. Néanmoins, ces remarques témoignent de l’intégration à court terme de cette norme dans la norme ISO 1101.

**5.2.4 L’amendement de la norme 1101.**

L’amendement de la norme provient principalement de la volonté de spécifier directement sur le composant en 3D. Les travaux menés sur le moteur M9 (RENAULT sas), entre autres, ont conduit à s’interroger sur l’évolution du langage graphique, figure 26.

Cet amendement apporte des compléments à la norme 1101 sur la représentation graphique du langage dans le cas d’une expression sur un modèle 3D.

La représentation graphique d’une spécification est la suivante, figure 27, et elle s’effectue dans un plan d’annotation.

Le langage graphique se développe avec l’apparition des drapeaux qui se décomposent en deux familles.

Plan d’intersection, figure 28.



Plan d’orientation, figure 29.



Dans le cas de la rectitude, pour la version de 1983 de la norme, les plans d’extraction (d’intersection) sont parallèles au plan de projection de la représentation 2D du composant. Cette signification est lourde de conséquences dont la principale est lors de la métrologie. Comment peut-on identifier le plan de projection d’un modèle nominal sur un moyen de métrologie à partir du « skin » modèle ?

Lorsque le langage graphique de la spécification de rectitude s’effectue sur le modèle 3D du composant cette question se pose également, mais du point de vue du concepteur produit qui doit alors choisir un plan d’annotation à partir des éléments géométriques du composant, figure 28.

A-t-on complexifié le langage ? Non, les représentations implicites du langage deviennent explicites afin de créer une continuité dans le processus de caractérisation du produit, de la conception à la métrologie.

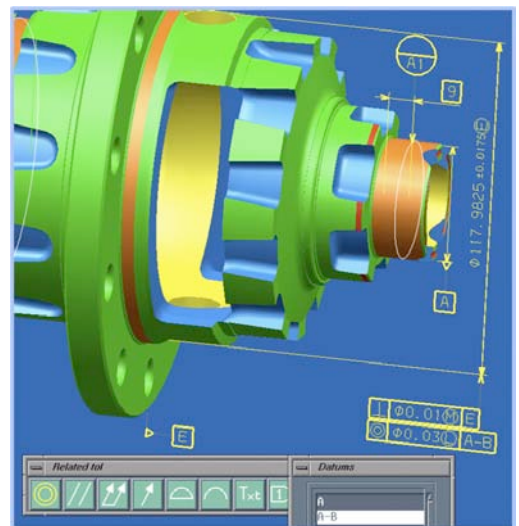


Figure 26 : langage graphique pour la 3D : FD&T [15].

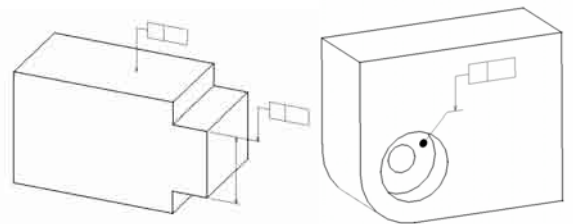


Figure 27 : représentation graphique de la spécification.

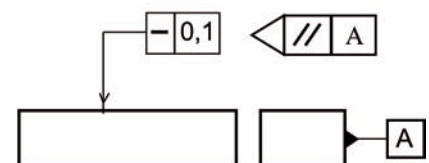


Figure 28 : plan d’intersection.

Le parallélisme d'un élément dérivé extrait par rapport à un élément dérivé (directement) associé. La zone de tolérance par défaut est définie à partir de deux plans parallèles distants de 0,1 par exemple, figure 29. L'orientation secondaire de la zone de tolérance est donnée par le drapeau.

**Remarques :**

- ✓ Le plan d'annotation « B » est totalement différent du plan, référence spécifiée « B ».
- ✓ La référence spécifiée « B » est contrainte en orientation par rapport à la référence spécifiée « A », figure 30. Le plan d'orientation « B » est libre de toute contrainte par rapport à la référence spécifiée « A », figure 29.

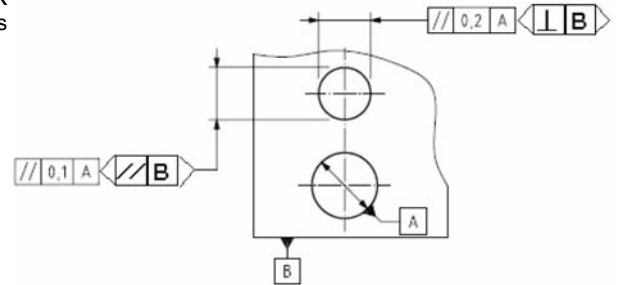


Figure 29 : plan d'orientation.

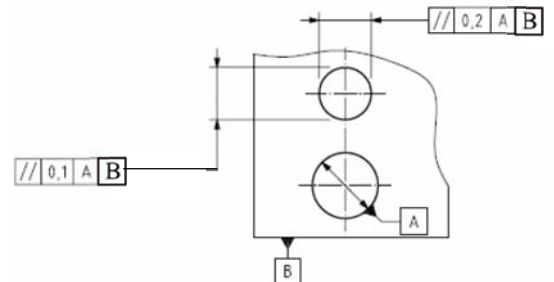


Figure 30 : Système de référence.

### 5.2.5 Que retenir de cette norme ?

Les normes conceptuelles conduisent la norme 1101 vers une évolution majeure, prenant en compte les éléments intégraux extraits et dérivés extraits dans la compréhension des différentes spécifications géométriques. Les réflexions sur la collection d'éléments, au travers de la norme ISO 5458 ou de la notion de zone commune (« CZ »), permettent de comprendre les travaux des normalisateurs, dont le souci est d'avoir un langage cohérent et robuste permettant la description des pièces mécaniques lors des différentes phases de conception, de fabrication et de contrôle. La notion de drapeau dépasse la volonté de rendre explicite, une représentation implicite du langage graphique en 2D. Elle doit remonter à l'origine même de la fonction technique élémentaire [6] qui dans l'analyse fonctionnelle technique permet au concepteur de choisir entre cette représentation graphique et un système de références spécifiées.

## 5.3 La norme ISO 5459 ( à paraître).

### 5.3.1 Un changement ?.

Plus qu'un changement après 25 années d'utilisation de la version antérieure, la révision de cette norme apporte une vision cohérente et une rigueur dans l'établissement des références spécifiées et les systèmes de références spécifiées.

L'évolution permet de définir, par exemple :

- des règles générales d'écriture et de lecture, et non au cas par cas,
- des extensions des possibilités d'expression et,
- la prise en compte du traitement numérique de surface, et non plus seulement, celui de la simulation physique.

### 5.3.2 Constat sur la norme version 1981.

Avant d'entreprendre une présentation des axes principaux de l'évolution de cette norme, il est nécessaire de revenir un temps sur la version de 1981 afin de faire un premier constat sur les limites de cette version.

Quelles sont les limites ou les manques ?

Sans vouloir faire une liste exhaustive, la version de 1981 n'inclut pas la prise de référence sur des surfaces complexes, les références sont prises sur des surfaces cylindriques, planes, sphériques et coniques.

Elle ne prend pas en compte la mise en œuvre des références après captation d'un nuage de point sur MMT par exemple, et ne suggère que la simulation matérielle par un appui sur un plan, ou par des mandrins expansifs (élément de référence simulée).

Elle ne définit pas explicitement de règles, ni d'approches génériques, mais elle en donne l'idée par des illustrations ou par des exemples.

Pour le concepteur produit, les évolutions apportées sont des avancées majeures.

### 5.3.3 Rappel des rôles des références spécifiées.

Les références et les systèmes de référence permettent d'orienter ou de situer des zones de tolérance suivant la nature de la spécification géométrique en bloquant certains degrés de liberté. Les degrés de liberté à bloquer sont de six moins les degrés d'invariances de la zone de tolérance (cf. 3.2.2.).

La référence spécifiée est constituée de l'ensemble des éléments de situation de l'élément associé à la surface réelle correspondante.

#### 5.3.3.1 Surface nominale conique.

L'élément de référence spécifiée « A » est une surface réelle, un « cône » avec des défauts, ou encore une surface réputée conique, figure 30.

La surface associée, la surface conique, son angle est-il libre ou fixe ?

Reprenons la classe d'invariance d'une surface. Si l'angle de la surface conique est libre, il peut varier.

- ✓ Pour un angle à  $0^\circ$ , le cône devient une droite dont la classe d'invariance est 2.
- ✓ Pour un angle à  $180^\circ$ , le cône devient un plan dont la classe d'invariance est 3.
- ✓ Pour un angle différent des deux premiers, le cône a pour classe d'invariance 1.

Le degré d'invariance donne la nature de la mobilité de la surface dans l'analyse du mécanisme et, il ne peut varier dans une phase stable de ce mécanisme. Ce constat conduit à déterminer une taille fixe (angle fixe) pour le cône, une dimension théorique exacte, figure 31.

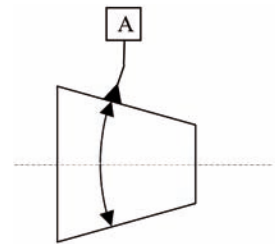


Figure 30 : élément de référence spécifiée « A », la surface réputée conique.

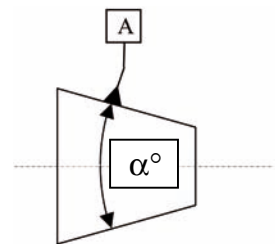


Figure 31 : angle fixe.

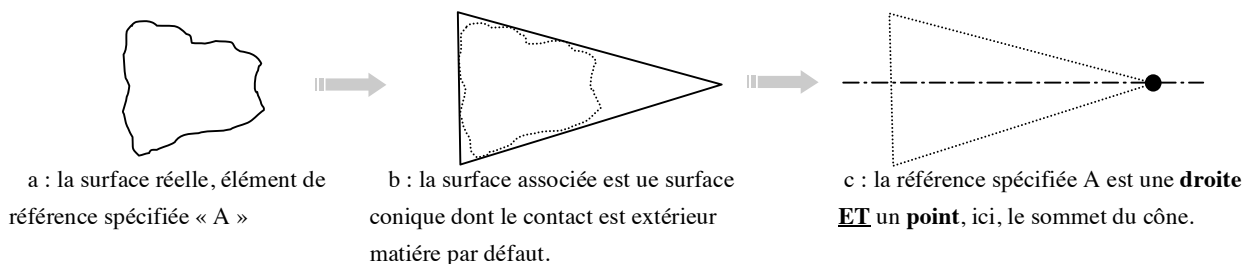


Figure 32 : éléments de situation relatifs à la référence spécifiée « A ».

La référence spécifiée « A », figure 33, est à la fois une droite et un point, sommet du cône. Il est possible à l'aide de dimensions théoriques exactes (TED) de prendre un plan particulier perpendiculaire à l'axe du cône.



Figure 33 : référence spécifiée « A » simple.

Lorsque la fonction technique élémentaire conduit à une caractéristique dont le point est le seul élément de situation nécessaire, l'écriture précédente n'exprime pas cette exigence complémentaire à partir de cette surface conique. Une exigence complémentaire à la référence spécifiée « A » est nécessaire, figure 34, cas c.

La règle 10 de lecture et d'écriture permet de répondre à cette question. En effet, si la référence spécifiée est utilisée avec des exigences complémentaires, alors les modificateurs correspondants sont placés dans le cadre de tolérance après la lettre avec l'indication [CF], [PL], [SL] ou [PT], (extrait de la règle d'écriture 10 de la norme).



Figure 34 : les modificateurs et la référence spécifiée « A » simple.

Dans le cas du cône, la référence spécifiée « A » est :

- ✓ une droite et un point, cas a,
- ✓ une droite, cas b, ou,
- ✓ un point, cas c.



Figure 35 : élément de référence spécifiée, le biplan (deux plans parallèles en vis à vis).

### 5.3.3.2 Plan médian.

Pour illustrer l'intérêt des degrés d'invariance dans la mise en oeuvre des éléments de situation, prenons pour exemple l'élément de situation issu de la taille d'un biplan (deux plans parallèles en vis-à-vis), figure 35.

La classe d'invariance d'un plan est de 3. La classe d'invariance d'un biplan est aussi de 3 que ces deux plans en vis-à-vis soient confondus ou distants. Le plan médian, par définition, possède la même classe d'invariance que le plan. Ce constat permet de conclure que le plan médian ne change pas le degré d'invariance que donne la nature de la mobilité du biplan dans l'analyse du mécanisme. La référence spécifiée « A » est un plan médian issu des deux plans associés aux deux surfaces réputées planes, figure 36.

Le plan bissecteur n'est pas un élément de situation issu de la référence spécifiée « A », figure 37, car sa construction change le type de mobilité du mécanisme, donc la classe d'invariance.

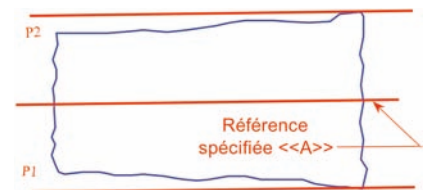


Figure 36 : le plan médian est la référence spécifiée « A ».

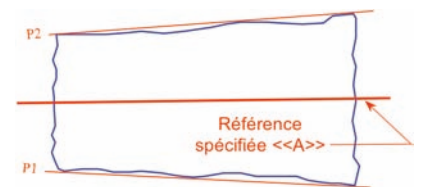


Figure 37 : le plan bissecteur n'est pas la référence spécifiée « A », version de 1981.

### 5.3.3.3 Synthèse.

La notion de classes d'invariance, issue des termes et définitions de la norme : concepts généraux – partie 1 : Modèle pour la spécification et la vérification géométriques [5], permet de réviser la norme 5459. D'autres points sont à développer concernant les apports majeurs de cette révision dans cette première partie, mais ce ne serait plus un article mais un cours.

### 5.3.4 Les contraintes entre les références.

Dans une spécification géométrique, il peut exister :

- Une référence simple liée à une seule surface.
- Une référence commue liée à plusieurs surfaces.
- Un système de référence composé des précédents.

5.3.4.1 La référence simple.

L'association est faite sans contrainte par rapport à d'autres éléments géométriques.

5.3.4.2 La référence commune.

L'association est faite en respectant des contraintes d'angles et de distances entre les éléments associés constituants (sauf une indication contraire).

Remarque 1 :

La mise en commun de deux références spécifiées de type plan ne donne pas une droite comme le laisser entendre la précédente version de cette norme, figure 38, cas a. Mais bien deux plans contraints en orientation que nous devons associer ensemble aux deux surfaces réputées planes, les éléments de référence « A » et « B », figure 38, cas b.

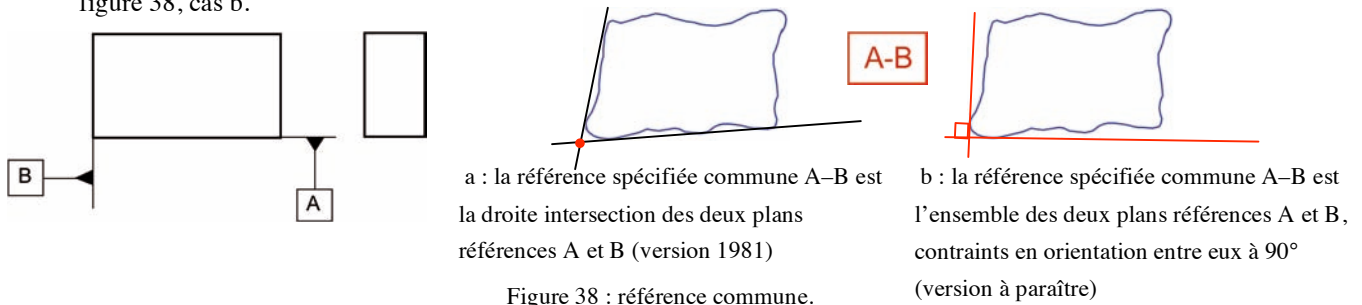


Figure 38 : référence commune.

Remarque 2 :

Le langage graphique de la figure 39 est issu de la norme NF E 04-554, il ne figure pas dans la norme ISO 5459 de 1981. La référence spécifiée « A » est, dans le cas de la figure 39, un plan associé aux deux surfaces réputées planes, figure 40. Modifiez cette écriture en intégrant l'évolution de la norme 1101 de 2005 qui consiste à écrire l'opérateur de collection « CZ » dans la case de la tolérance de la spécification. La spécification de planéité étant vérifiée, il reste à définir la signification de l'élément de référence spécifiée « A », figure 41.

La construction de l'élément de situation, la référence spécifiée « A » devient difficile.

Pourtant, la notion de référence commune apporte une réponse, figure 42. Lorsque les « n » éléments de référence « A » sont un groupe, une collection d'éléments géométriques, la référence spécifiée est une référence commune « A-A » (avec deux ou « n » références spécifiées). Lorsque la référence est une référence simple, l'écriture est l'expression d'une référence spécifiée « A ».

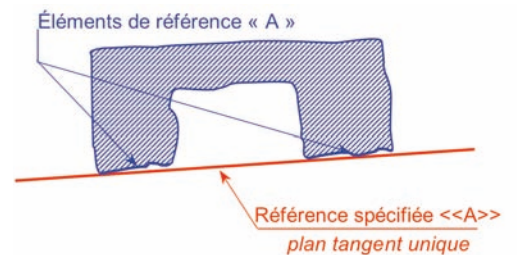
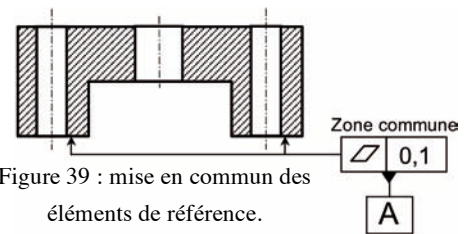


Figure 40 : référence spécifiée, norme NF E 04-554

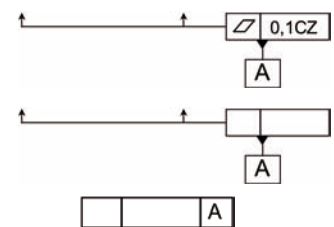


Figure 41 : référence spécifiée, la signification ?.

5.3.4.3 Le système de référence.

Le système de référence non ordonné a disparu de la nouvelle version. Le système de référence ordonné devient le système de référence.

La référence secondaire est contrainte en orientation par rapport à la référence primaire. La référence tertiaire est contrainte en orientation par rapport aux références primaire et secondaire.

Qu'elle est la différence entre une contrainte d'orientation ou de position ?

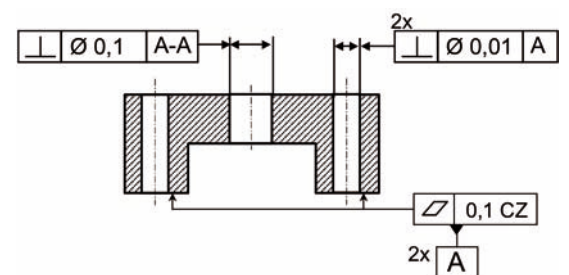


Figure 42 : référence spécifiée commune..

Prenons l'exemple suivant, figure 43.

La référence spécifiée secondaire « B » est strictement contrainte en orientation.

Analysons la signification de cette spécification en traitant ensemble et sur deux figures distinctes la contrainte d'orientation (cas 1), et la contrainte de position (cas 2) de la référence secondaire « B ».

En analysant le résultat, figure 44, la position de la zone de tolérance est différente suivant le type de contrainte associé à la référence secondaire.

Les chaînes de cotes produit réalisées sont plutôt issues de la représentation du cas 2, alors que sur le plan, le cas 1 est écrit (figure 43). Comment faire ?

L'une des réponses est d'ajouter un « nota » sous le cadre de la spécification en indiquant : *la référence « B »*

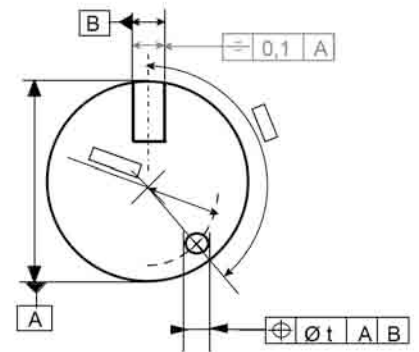


Figure 43 : la référence secondaire est contrainte en orientation par rapport à la référence primaire.

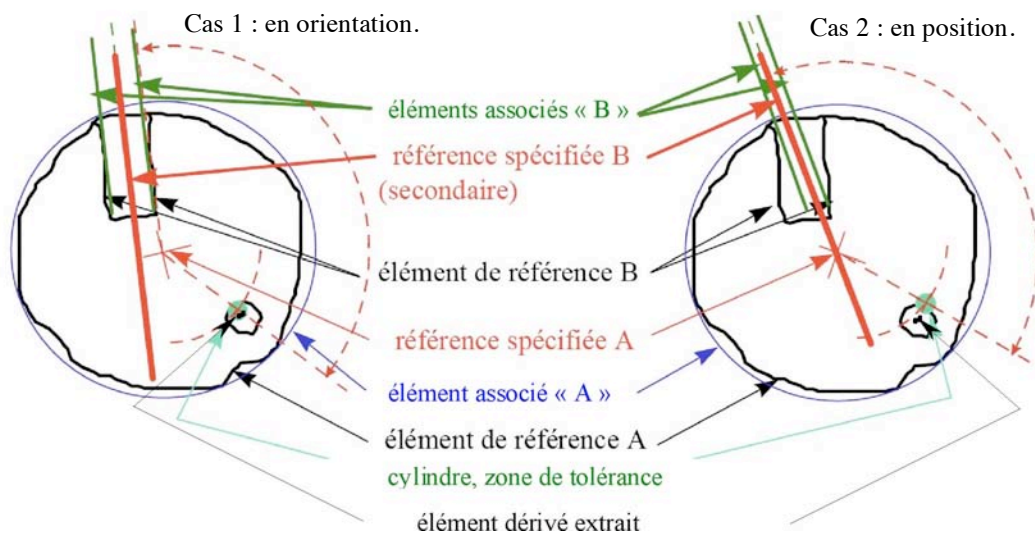


Figure 44 : signification des contraintes d'orientation et de position de la référence secondaire.

#### 5.3.4.4 Synthèse.

Les notions de référence, référence commune et système de référence sont cohérentes et répondent à des règles d'écriture et de lecture qui appartiennent à la nouvelle version de cette norme.

Le lecteur habitué à utiliser les versions précédentes des normes risquent de se sentir un temps déstabilisé. Or « retenir, c'est périr ». Pour le concepteur produit ayant besoin d'écrire en langage graphique son besoin fonctionnel, il était nécessaire de faire évoluer ces notions de référence.

Quelles sont ces règles de lecture et d'écriture des références ?

#### 5.3.5 Les règles (lecture et écriture).

Cette évolution permet de définir des règles générales en écriture et en lecture, et non au cas par cas au travers d'exemples non-exhaustifs. Parmi les 11 règles, les règles 2,6,7, 8 et 11 sont explicitées dans la suite de cet article. Pour plus d'informations, il est nécessaire de se reporter à la nouvelle version de la norme.

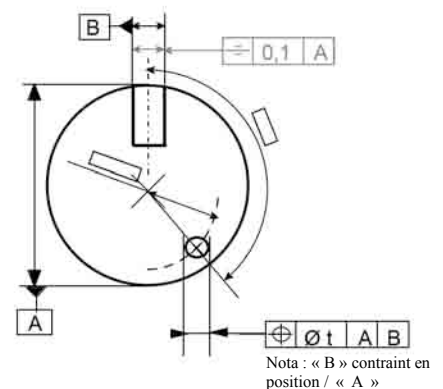


Figure 45 : la référence secondaire est contrainte en position par rapport à la référence primaire.

### 5.3.5.1 Règle 2.

« Si une caractéristique intrinsèque d'une entité dimensionnelle utilisée pour établir une référence spécifiée est considérée comme théoriquement exacte pour l'association, alors sa valeur doit être identifiée par une dimension théorique exacte (cote encadrée = TED) », figure 30. Si cette caractéristique est « considérée comme variable, sa dimension ne doit pas être identifiée par une TED ».

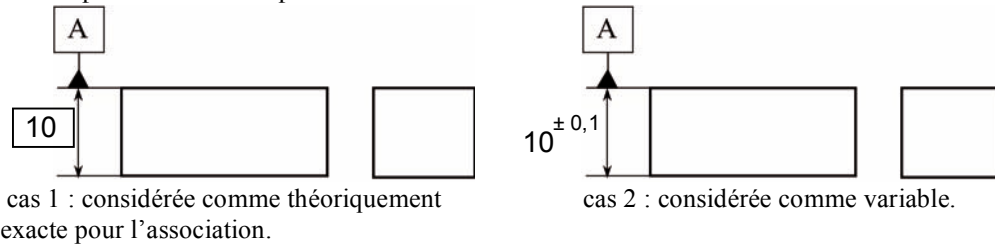


Figure 46 : caractéristique intrinsèque variable ou non.

Remarques :

La notion de caractéristique variable ou non existait déjà pour l'association. En effet, lorsque l'indicateur de la référence spécifiée « A » est associé à des modificateurs (M) pour l'exigence du maximum de matière ou (L) pour l'exigence du minimum de matière, dans le cas 2 de la figure 46, elle est comme fixe, soit théoriquement exact pour l'association.

La variabilité de la caractéristique intrinsèque dépend de sa classe d'invariance de l'élément et de la nature de la fonction technique élémentaire.

La norme ISO 2692 concernant les exigences du maximum, du minimum de matière ainsi que de la réciprocité (dont le modificateur est (R)) a fait l'objet d'une mise à jour publiée en 2005.

### 5.3.5.2 Règle 4.

Par défaut la distance entre deux références partielles est fixe, figure 47. Dans certains cas, il peut être nécessaire de définir certaines distances variables, lorsque les références partielles sont prises sur une entité dimensionnelle, dont sa distance doit être variable lors de l'association, figure 48.

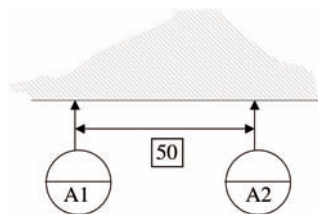


Figure 47 : syntaxe de la référence partielle pour une distance fixe.

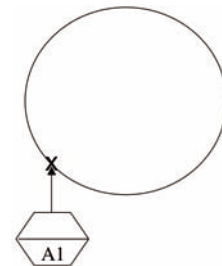


Figure 48 : syntaxe de la référence partielle pour une distance variable.

Remarque :

Pour définir la mise en position partielle d'un pied de bielle dans un vé, l'expression de l'élément de référence conduit à utiliser des références partielles dont la distance est variable, figure 49.

Ce constat permet de spécifier les pièces dans les états intermédiaires du processus de production [16].

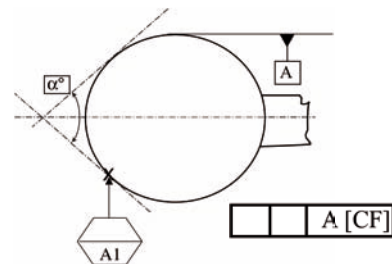


Figure 49 : syntaxe de mise en position sur un vé, vue de la pièce.

### 5.3.5.3 Règle 6.

« Lorsque l'élément à associer à la surface n'est pas du même type que l'élément sur lequel il est établi, la référence spécifiée utilisée doit être suivie du modificateur [CF], pour contacting feature (élément de contact) ».

Remarque :

Dans les boîtes de vitesses, il est fréquent de mettre en position axiale une commande interne à l'aide d'un contact de type sphère. Écrire une exigence fonctionnelle ayant pour élément de référence la surface sphérique du composant assemblé au composant étudié devient possible par l'emploi du modificateur [CF], figure 50.

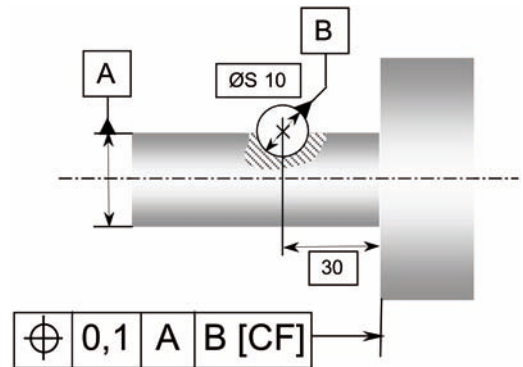


Figure 50 : [CF] élément de contact (contacting feature).

### 5.3.5.4 Règle 7.

« Si un groupe d'élément de même type sert à établir une référence commune, alors il est possible de simplifier l'écriture », figure 42.

### 5.3.5.5 Règle 8.

« Si une référence (simple ou commune) consiste à exprimer l'ensemble des éléments de situation, alors aucune indication complémentaire n'est à préciser, sinon il convient d'indiquer après la lettre de l'indication de la référence spécifiée le modificateur suivant [PT] (pour désigner l'élément de situation : point), [SL] (pour désigner l'élément de situation : droite) et / ou [PL] (pour désigner l'élément de situation : plan) », figure 34.

### 5.3.5.6 Règle 11.

« Par défaut, dans une référence commune, les distances entre les éléments constitutants sont fixées, pour les rendre variables un modificateur est introduit, il s'agit du modificateur [VD] (distance variable). »

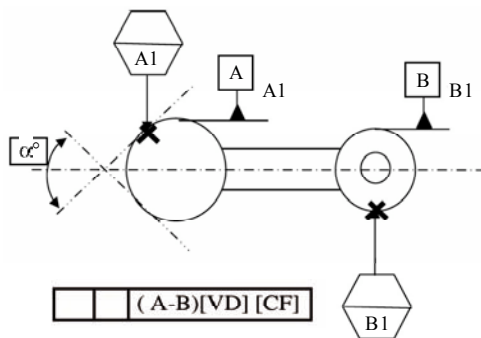


Figure 51 : distance variable pour la construction de la référence spécifiée

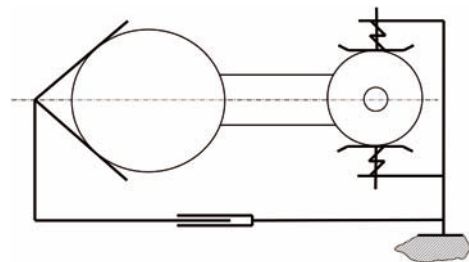


Figure 52 : schéma du montage (R. VINCENT / CETIM) [17].

Dans ce dernier exemple, les différents modificateurs présentés témoignent de la pertinence des différentes règles.

L'exemple de la figure 51 permet de faire le lien entre le contrat de phase [16] dont les caractéristiques des surfaces actives sont définies avec le langage GPS et la fiche de description du posage utilisant la symbolisation simplifiée des prises de pièces [18].

## 5.3.6 Que retenir de cette norme ?

La version à paraître est une évolution majeure nécessaire à la prescription des exigences fonctionnelles. Les onze règles présentes sont explicitées dans leurs utilisations tant au niveau de la lecture que de l'écriture des références spécifiées et des systèmes de références spécifiées. Le lecteur ayant pris pour habitude d'utiliser la version de 1981 risque d'être fort déstabilisé par cette nouvelle version. Or « faire un choix, c'est avant tout accepter de perdre quelque chose ».

Pour le concepteur produit qui s'appuie sur l'analyse fonctionnelle technique pour caractériser la pièce au travers de fonction technique élémentaire, cette évolution répond à ses attentes. L'emploi de la référence spécifiée sur une surface conique est déjà inscrit dans les pratiques de certaines entreprises depuis 2001 [14].

## 6 Interprétation ou signification.

Les textes des normes font l'objet de réflexions de la part de groupes d'experts dont la volonté est de définir des règles, des termes et des définitions qui doivent signifier un sens. Lorsque ce sens n'est pas suffisamment robuste, le lecteur, le concepteur produit, le concepteur méthode ou le concepteur métrologue peuvent alors interpréter une spécification. Le constat est que chacun a sa vision de cette interprétation, forcément différente. Il faut donc proscrire toute interprétation dans la spécification d'exigence fonctionnelle.

Reprenons l'exemple de la référence secondaire contrainte en position, figure 45. Si l'analyse fonctionnelle conduit à cette prescription, dans l'état de l'art de la norme, il faut ajouter un nota de façon à ne laisser aucune interprétation possible à quelques niveaux que ce soit.

Mettre en œuvre une formation sur le tolérancement géométrique, en développant la notion d'interprétation des normes, conduit à dénaturer le sens même des documents normatifs, et des actions menées par les normalisateurs. Le terme : interprétation est à proscrire, le terme : signification est préférable.

## 7 Conclusion.

La démarche normative liée à la « spécification géométrique des produits » s'efforce de donner des outils permettant de répondre à des problématiques de conception, de production et de métrologie. Les normes évoluent avec les prescriptions des exigences fonctionnelles identifiées par le concepteur produit lors de la conception de sa pièce, mais pas seulement. Mettre en place une spécification sur une surface d'une pièce est une déclaration d'engagement sur les variations de la surface réelle, mais surtout un témoignage de l'analyse fonctionnelle technique, et de tous les outils périphériques (chaînes de cotes, gravité, ...). Enrichir le langage découle des analyses effectuées tant en amont sur les fonctions techniques élémentaires [6], mais aussi en aval, sur les retours d'expérience, en production et en métrologie.

Lorsque des pratiques et des outils sont mis en place, il est toujours difficile de les remettre en cause. Mais l'évolution des normes permet de gagner en qualité, en coût et en délais (QCD). L'élaboration des normes repose sur les contributions de tous les acteurs économiques.

## 8 Bibliographie.

- [1] CONTET F. – « Opérateur de Normalisation à votre service », UNM (union de normalisation de la mécanique) – Séminaire : cotation ISO : les nouvelles normes, quelles conséquences ? – CETIM – UNM (30 novembre 2005).
- [2] RECUEIL DE NORMES. – « Spécification géométrique des produits (GPS) », 11<sup>e</sup> éditions, normes globales, AFNOR, (2002).
- [3] ISO/TR 14638 : 1995 – « Spécification géométrique des produits (GPS) –Schéma directeur. », AFNOR, (1995).
- [4] CHARPENTIER F., CHEP A. – « GPS ou un processus d'ingénierie simultanée », module de formation de 2<sup>e</sup> année, IUFM de CRETEIL, (2003).
- [5] ISO/TS 17450-1 : juin 2005 - « Spécification géométrique des produits (GPS) –concepts généraux – partie 1 : Modèle pour la spécification et la vérification géométriques. », AFNOR, (juin 2005).
- [6] CHARPENTIER F., PRENEL J.-M., DUMENIL J. – « Le TAFT un outil pour la capitalisation de l'analyse fonctionnelle technique », Technologie, sciences et techniques industrielles N° 148 mars 2007, CNDP.
- [7] ISO 14660-1 : 1999 - « Spécification géométrique des produits (GPS) – Eléments géométriques – partie 1 : termes généraux et définitions. », AFNOR, (1999).
- [8] ISO/DIS 22432 - « Spécification géométrique des produits (GPS) – Eléments utilisés dans la spécification et la vérification. », AFNOR, (à paraître).
- [9] SRINIVASAN V., - « A geometrical product specification language based on classification of symmetry groups », Computer-Aided Design, 31(11), pp. 659-668, (1999).
- [10] CLEMENT A., - « Resolution of positionning solids », annal of CIRP, Volume 40/1, (août 1991).

- [11] CHARPENTIER F., MERY B. – « Métrologie mécanique », cours et travaux dirigés de 1<sup>e</sup> année, IUFM de CRETEIL, chapitre 1, coordonnées relatives des surfaces, pp. 11-13, (1994).
- [12] MATHIEU L. – « CGP, contrôle géométrique des produits », cours de 1<sup>e</sup> année, l'ESCPI/CNAM dans la formation ingénieurs 2000, (1999).
- [13] MATHIEU L., BALLU A., « GEOSPELLING : a common language for Specification and Verification to express method uncertainty », Proceedings of 8th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Charlotte, USA , (April 2003).
- [14] RENAULT sas – NISSAN, « Formation aux normes ISO de tolérancement », cours version 3.0, RENAULT sas, (2001).
- [15] D. BUYSSE ; Figure issue de : « 3D tolerancing – FD&T » - Mechanical division IAO projet – RENAULT sas (1998).
- [16] CHARPENTIER F., CHEP A., FERNANDEZ B. – « Influence des normes GPS sur l'élaboration des documents de fabrication », séminaire national de Levallois-Perret (4, 5 et 6 décembre 2000).
- [17] VNCENT R. – « Références spécifiées et système de références spécifiées – Possibilités offertes par la future norme / ISO 5459 », UNM (union de normalisation de la mécanique) – Séminaire : cotation ISO : les nouvelles normes, quelles conséquences ? – CETIM – UNM (30 novembre 2005).
- [18] NF E 04-013 – « Dessins techniques – Dessins d'opérations – Symbolisation simplifiée des prises de pièces », AFNOR