



HAL
open science

Le tolérancement tridimensionnel adaptatif et ses applications au processus d'industrialisation

Salim Boukebbab, Jean-Marc Linares, Idriss Amara, Jean-Michel Sprauel

► **To cite this version:**

Salim Boukebbab, Jean-Marc Linares, Idriss Amara, Jean-Michel Sprauel. Le tolérancement tridimensionnel adaptatif et ses applications au processus d'industrialisation. Sciences & Technologie B, 2004, 22, pp.59-66. hal-01409735

HAL Id: hal-01409735

<https://amu.hal.science/hal-01409735>

Submitted on 6 Dec 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LE TOLERANCEMENT TRIDIMENSIONNEL ADAPTATIF ET SES APPLICATIONS AU PROCESSUS D'INDUSTRIALISATION

Reçu le 10/11/2003 – Accepté le 20/11/2004

Résumé

L'objectif de ce travail est de réduire les rebuts par une meilleure maîtrise de la transcription de la fonctionnalité de service d'une pièce mécanique lors la phase de tolérancement. Issus de l'approche systémique, le concept de Groupe Fonctionnel, permet de mieux décrire cette fonctionnalité et de fournir une plus grande latitude aux autres fonctions du processus d'industrialisation situées en aval de la fonction conception. Ceci se traduit par une libération des contraintes d'usinage, donc par une diminution des rebuts et des coûts. Pour la phase de tolérancement une cotation adaptative est proposée avec prise en compte des propriétés des interfaces. Des procédures de contrôle et de vérification sont proposées pour valider les pièces mécaniques tolérancées suivant la méthodologie proposée précédemment. Elle utilise un fichier au format VDA issu d'une machine à mesurer tridimensionnelle. La maîtrise des reports de liberté permet de diminuer fortement le nombre de rebuts alors que la fonction souhaitée est respectée.

Mots clés: *Processus, Industrialisation, Cotation, Tolérancement, Jeu, Contrôle.*

Abstract

The objective of this work is to reduce scraps using a transcription optimization of the fitting functionality of mechanical parts. Born of the systemic approach, the functional group allows a better description of the functionality of parts during tolerancing and provides a wider scope for the other functions taking place after design. An adaptive tolerancing method is suggested. It takes the properties of interfaces into account. A control and verification process is developed to validate the tolerancing according to the previously suggested methodology. Mastering the transfers of the degrees of freedom, allows to strongly decrease the number of scraps while respecting the expected function.

Keywords: *Processes, Industrialisation, Tolerancing, Clearance, Control, degrees of freedom, Design.*

S. BOUKEBBAB¹
J.M. LINARES²
I. AMARA¹
J.M. SPRAUEL²

¹ Laboratoire de Mécanique
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri-Constantine
Campus Châab Ersas
25017 Constantine (Algérie)

² Laboratoire EA(MS)²
IUT d'Aix-en-Provence
Avenue Gaston Berger
F 13625 Aix-en-Provence (France)

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إيجاد طريقة ناجحة في التقليل من إنتاج القطع الغير صالحة للتركيب باستعمال طريقة منهجية وناجحة في وضع التوافقات. هذه الطريقة مبنية على مبدأ الأجزاء المتصلة والذي يمنح لمستعمله الحصول على نفس جديد من ناحية الإنتاج خال من كل العراقيل الموضوعية الخاصة بالآلات الصنع. يمكن التحكم في مجالات السماح كذلك بصفة فعلية لمهندس مكتب الدراسات في وضع محكم لمواصفات القطع الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: *التصنيع، المواصفات، المراقبة، مجال السماح، الدراسات.*

La mondialisation de l'économie se traduit par une baisse des marges et l'économie se traduit par une baisse des marges et un besoin de compétitivité pour toutes les industries de la mécanique [1]. Ce nouveau challenge nécessite une maîtrise poussée du processus d'industrialisation. Dans ce système complexe et suivant la loi de Pareto, il est de coutume d'essayer de chercher des solutions dans les secteurs à forte potentialité tel l'opérationnel (fabrication, assemblage...) et surtout d'appliquer une automatisation des procédés. Si l'on pousse plus loin le raisonnement, cela briderait la créativité de l'homme en standardisant inconsciemment les produits et le processus d'industrialisation.

Depuis une trentaine d'années la recherche de la compétitivité s'est cantonnée aux différents secteurs d'activités pris isolément, et les efforts ont porté sur les procédés avec une indépendance des actions menées sur le processus d'industrialisation; ainsi sont apparus de nouveaux mots, de nouvelles définitions dans chaque corps de métier (SPC, SMED, CPK, SADT...). Cette situation, explique en partie l'échec de l'ingénierie simultanée dans ces débuts [2]. Depuis, l'ingénierie simultanée et concurrente ont apportés des réponses partielles à ce problème. Cependant, l'approche systémique des problèmes d'industrialisation permet d'apporter des réponses à grande échelle d'utilisation [3,4].

Dans ce cadre, une nouvelle proposition d'outil en conception doit impérativement se soucier des implications induites sur toute la chaîne d'industrialisation pour s'inscrire dans une démarche d'ingénierie concurrente. De ce constat, émerge après une phase d'étude, un cahier des charges fonctionnel qui est décrit suivant les outils proposés par les

normes en vigueur. La partie qui nous concerne est la réalisation de la fonction globale du produit. Par une étude de conception, le projecteur donne du volume aux schémas cinématiques fonctionnels. Ensuite, la phase de dimensionnement et de tolérancement est activée. Après cette étape du processus d'industrialisation, la majeure partie du coût final du produit est potentiellement définie, car il n'est pas nécessaire de rappeler que 75% du coût final d'un produit est fixé dès la phase de conception.

Dans cet article, nous proposons le résultat de travaux sur la cotation fonctionnelle; notre approche est une extension du tolérancement vectoriel [5]. La proposition d'un tolérancement adaptatif suite à l'utilisation des nouvelles zones de tolérance décrites par des équations vectorielles permet d'inclure les potentialités des interfaces présentes dans les mécanismes en vue de diminuer le rejet de pièces respectant la fonction montage. Cependant, il est impératif de s'intéresser à l'impact de ce tolérancement sur le processus d'industrialisation pour s'inscrire dans une démarche d'ingénierie concourante.

1- LES OUTILS ET METHODES DE TOLERANCEMENT ET LEURS IMPLICATIONS

Dans la phase de tolérancement, le projecteur dispose d'outils: tolérance d'orientation, tolérance de forme, tolérance de position et tolérance de dimension, ainsi que des méthodes: principes d'indépendance et d'enveloppe, exigences maximum et minimum de matière. Suivant les choix réalisés, il prédéfinit le travail de la fonction contrôle des pièces ainsi cotées.

L'exigence d'enveloppe s'applique dans de nombreux cas où la fonction assemblage est demandée ; la fonction montage est bien transcrite par l'exigence de maximum de matière. Toutefois, l'exigence de minimum de matière trouve son application dans la maîtrise de la qualité du positionnement d'une surface ou d'un groupe de surfaces [6].

La mise en équation du mécanisme de report dans les cas de maximum ou minimum de matière se scinde en deux types:

Type I : Ecart dimensionnel d'une surface de référence vers les écarts géométriques d'une autre, ou écart dimensionnel d'une surface vers les écarts géométriques

d'elle-même (Fig. 1a).

Type II : Ecart dimensionnel de plusieurs surfaces de références vers les écarts géométriques d'une autre (Fig. 1b).

Une cotation basée sur les exigences oriente la fonction contrôle vers le processus de contrôle par gabarit qui reconstitue l'environnement fonctionnel que rencontrera la pièce lors de son assemblage et montage dans le mécanisme. Ce contrôle est binaire : soit la pièce se monte, donc elle satisfait la cotation fonctionnelle demandée, soit le montage souhaité n'est pas possible sur gabarit, dans ce cas, elle doit être refusée pour cause de non respect des exigences fonctionnelles. Cependant, nous pouvons noter quelques limites sur l'emploi des possibilités des exigences de maximum et minimum de matière; dans le cas des reports multiples « Type II », il n'existe pas, au niveau des fonctions conception et contrôle, des formulations permettant de maîtriser ce type de reports [7]. De plus, sur les dernières versions de logiciel de machine à mesurer tridimensionnelle, seuls les cas simples de reports de Type I sont implémentés [8]. Pour conclure ce paragraphe, nous pouvons dresser des correspondances implicites entre les deux fonctions conception et contrôle (Fig.2).

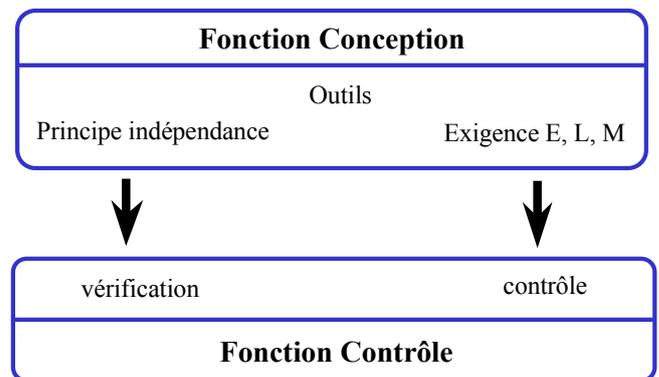


Figure 2: Correspondance entre la fonction conception et la fonction contrôle.

Cette illustration met bien en évidence les échecs constatés dans l'industrie lorsque l'on remplace les gabarits matérialisés par une machine à mesurer tridimensionnelle qui

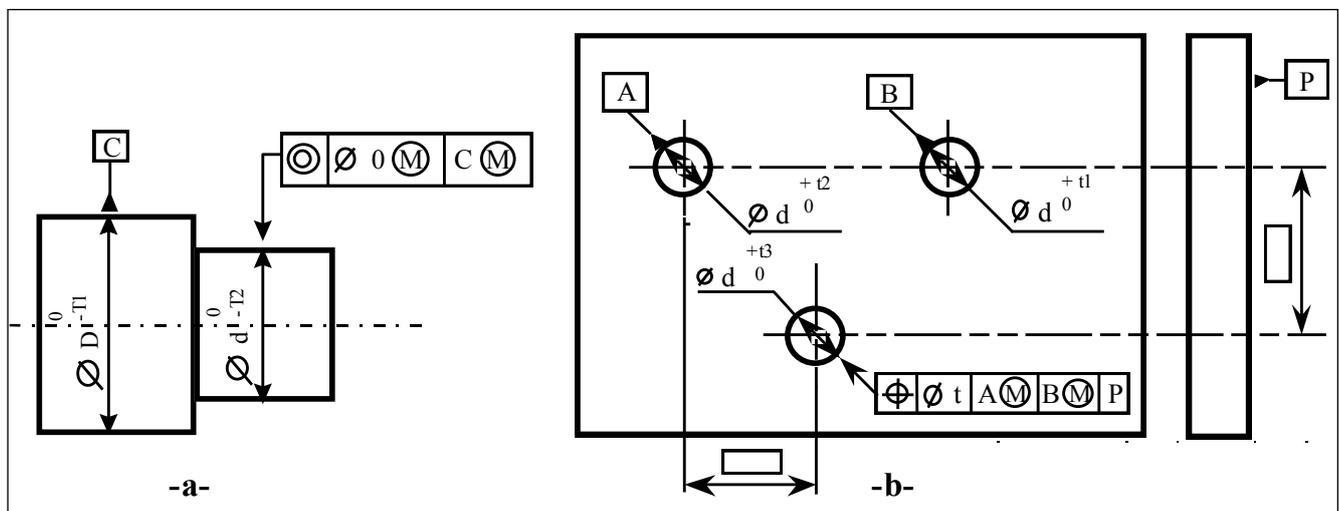


Figure 1: Mécanisme de report.

fondamentalement réalise plutôt de la vérification que du contrôle dans l'état actuel des logiciels [9]. La proposition de gabarits informatisés, ou de toute autre méthode utilisant les relevés d'une machine à mesurer, n'atteindra pas la perfection des gabarits matérialisés (malgré le coût généré par la fabrication de ces derniers), car elle ne possède qu'une vue dégradée de la pièce représentée par un échantillon de points. Cependant la facilité d'utilisation, la flexibilité et le haut degré d'automatisation des machines à mesurer sont des atouts majeurs face aux contraintes industrielles. Dans ce cas et parallèlement aux gabarits informatisés, une 3^{ème} voie est possible. Cette dernière consiste à fournir à la fonction contrôle une autre alternative lui permettant de regrouper la phase de vérification et la maîtrise des lois de port (Fig.3).

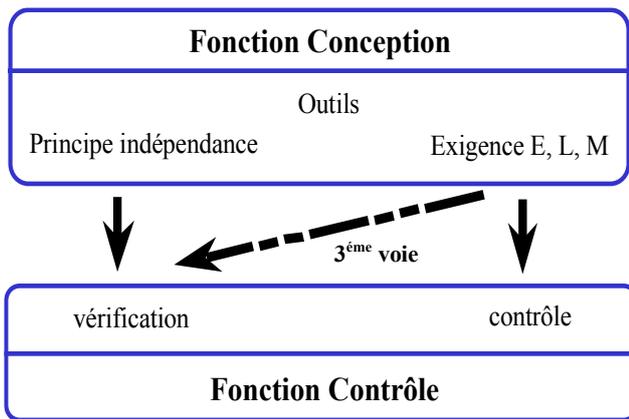


Figure 3: Présentation de la 3^{ème} voie.

Pour cela, nous proposons une méthodologie concourante (Conception, Contrôle) par la proposition d'une cotation adaptative basée sur l'exigence de maximum de matière dans la transcription de la fonction montage. Cependant, on ne peut proposer une cotation sans qu'elle soit en mesure de répondre au cahier des charges et sans qu'elle soit capable de vérifier que toutes les fonctions participant au processus d'industrialisation réalisent leur travail avec un minimum de perte d'informations. De ce fait, la conformité de la cotation proposée sera établie par la fonction contrôle.

2- VERS UNE COTATION ADAPTATIVE

Notre approche de cotation fonctionnelle est architecturée autour du concept de Groupe Fonctionnel qui correspond à l'enveloppe fonctionnelle de géométrie parfaite qui limite les surfaces réelles contribuant à l'élaboration d'une condition fonctionnelle [10]. Il est de dimension tridimensionnelle mais semi-limité. Par assemblage des Groupes Fonctionnels appartenant à une même pièce, on obtient la forme fonctionnelle de cette dernière comme le montre la figure 4.

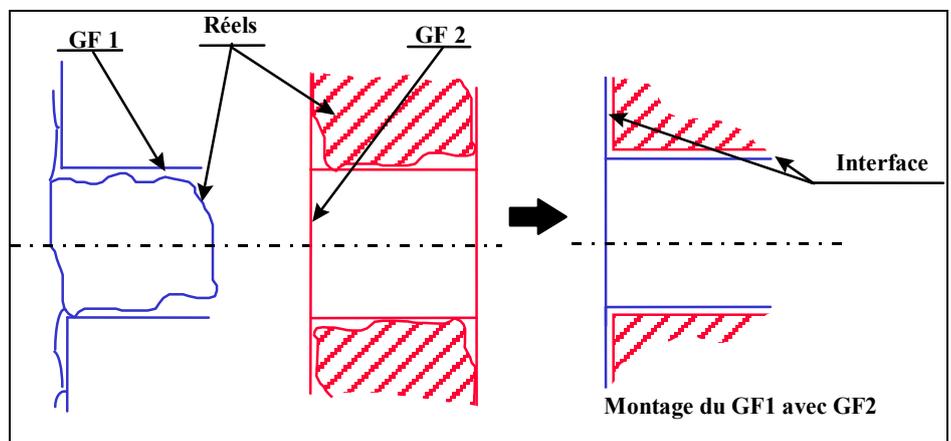


Figure 4: Modélisation par Groupe Fonctionnel.

2.1- Fonction conception

Une méthodologie de cotation basée sur le concept de Groupe Fonctionnel met en évidence la dualité qui existe entre la cotation interne des Groupes Fonctionnels et les espaces jeux. Leur regroupement permet la création d'espaces de liberté (Fig.5). Cette notion d'espace de liberté demande la mise en place d'une nouvelle description de zone de tolérance. Actuellement, avec les outils fournis par les normes ISO, il est possible de décrire seulement des zones circulaires, cylindriques, planes et en forme de parallélogramme. Ces espaces de liberté sont de formes complexes et issues d'équations paramétrées [11].

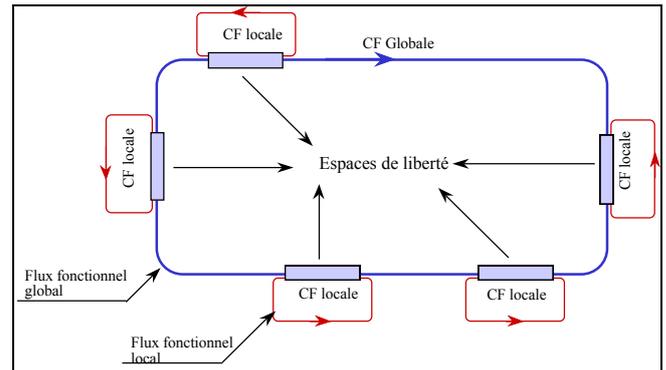


Figure 5: Espaces de liberté.

Dans un souci de simplification et de facilité d'utilisation pour la fonction conception, nous proposons de remplacer ces équations paramétrées par des fonctions vectorielles. Leurs coefficients sont proposés sous une forme simplifiée avec un risque maîtrisé pour permettre au concepteur de l'inclure facilement dans son tolérancement sans une assistance informatique [12]. L'application du modèle dans la cotation interne du groupe fonctionnel alésage, par exemple, nous donne les spécifications représentées dans la figure 6. Nous remarquons que cette cotation est adaptative et que les seules variables d'entrée sont les diamètres des différents alésages ainsi que la topologie. La conformité de cette dernière sera établie par la fonction contrôle.

2.2. Fonction contrôle

Pour s'inscrire dans la philosophie "ingénierie concourante",

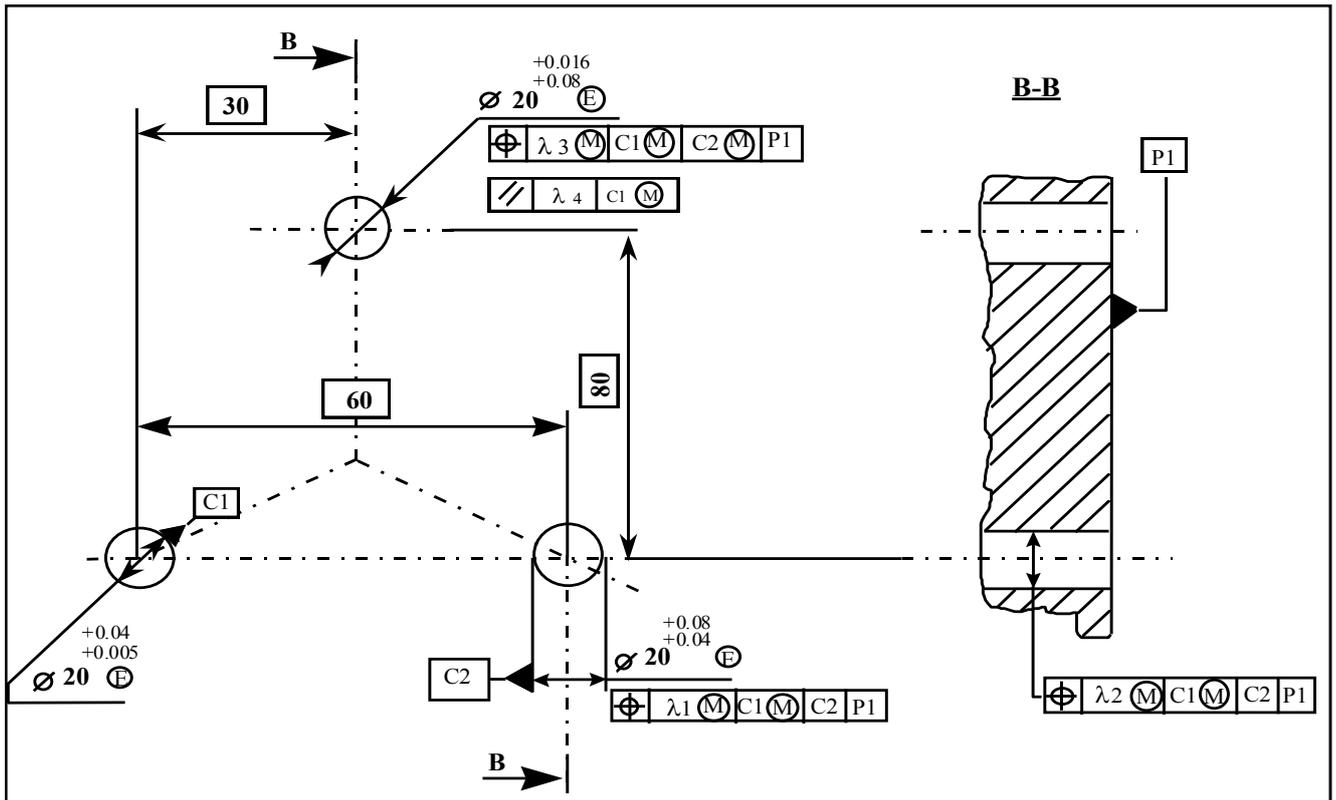


Figure 6: Exemple cotation interne Groupe Fonctionnel alésage.

nous devons maintenant proposer une méthodologie pour la fonction contrôle. Pour cela, deux voies ont été explorées (Fig.7) :

Première voie : Vérification avec gestion et incorporation des flux de reports de type I et II,

Deuxième voie : Contrôle et/ou appairage avec les surfaces associées (contrôle de niveau I).

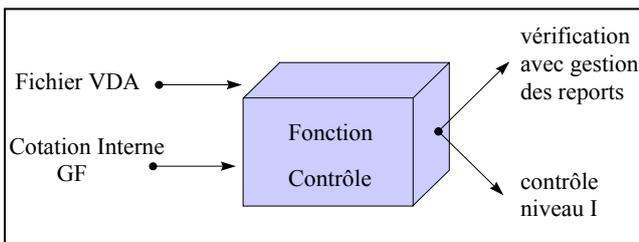


Figure 7: Processus de Contrôle proposé.

Le contrôle proposé est qualifié de niveau 1 car il intègre le même doute que la vérification du fait qu'il est basé lui aussi sur un échantillon de points de la surface réelle. Les entrées nécessaires au processus de contrôle sont un fichier contenant tous les points M_i des surfaces palpées dans le référentiel de mesure de la machine à mesurer tridimensionnelle et les données de la cotation interne des deux Groupes Fonctionnels destinés à s'assembler.

2.2.1- Procédure de vérification par gestion des flux de report

Le processus de vérification débute par une étape d'acquisition des surfaces réelles. Nous utilisons une machine à mesurer tridimensionnelle Trimesure 1005E

équipé de la dernière version du logiciel de Métrosotf. Par un pré-traitement des données, nous récupérons un fichier de points sous le format VDA (Fig.8).

Dans l'étape de traitement des mesures, nous déterminons, dans un premier temps, dans le référentiel de mesure, les vecteurs directeurs et le centre de gravité des surfaces associées au nuage de points fournis par le fichier au format VDA (Fig.9).

Les composants des vecteurs directeurs et les positions des centres de gravité des surfaces associées par rapport au repère de mesure, représentent les attributs de ces dernières. Ils sont obtenus après une optimisation de l'écart y_i (Fig.10). Ce dernier est écrit sans la linéarisation des fonctions trigonométriques de la matrice de rotation et optimisé suivant la méthode des moindres carrés [14].

Suite à cette étape, le référentiel du Groupe Fonctionnel est construit suivant les informations contenues dans la hiérarchie de ce dernier ; pour notre exemple, la procédure d'assemblage impose une hiérarchie entre les surfaces assemblées. Cette hiérarchie sera la même pour les deux Groupes Fonctionnels : surface primaire cylindre C_1 ou c_1 , surface secondaire cylindre C_2 ou c_2 , surface tertiaire plan P_1 ou p_1 . L'assemblage est considéré parfait (sans défaut d'état de surface) et rigide;

L'axe primaire (Z_{GF}) du Groupe Fonctionnel est l'axe associé de l'alésage C_1 . L'axe secondaire (Y_{GF}) est fourni par le vecteur constitué par O_1 et O_2 (O_1, O_2 sont obtenus par intersection des alésages respectivement C_1 et C_2 avec le plan P). Le troisième axe (X_{GF}) est le produit vectoriel des deux précédents. L'origine du Groupe Fonctionnel (O_{GF}) est l'intersection de l'axe Z_{GF} avec un plan de même direction

```

ALESAGES = HEADER / 20                                00001000
*****00001010
VDAFS VERSION   : 2.0                                00001020
-----ANGABEN UEBER DEN ABSENDER-----00001030
SENDERFIRMA    : METROEC SOFTWARE AG                 00001040
ANSPRECHPARTNER : ---                               00001050
- TELEFON      : (081) 257 07 00                     00001060
- ADRESSE      : COMERCIALSTRASSE 20, CH-7007 CHUR, SCHWEIZ 00001070
ERZUEGENDES SYSTEM : METROSOFT CM                    00001080
ERZEUGUNGSDATUM : 17.07.1997                        00001090
SENDE-FILENAME  : A:\ALESAGES.VDA                   00001100
-----ANGABEN UEBER DAS TEIL-----00001110
PROJEKT        : ---                               00001120
OBJEKTKENNUNG  : PIECE USINER: 14 ALSAGES            00001130
VARIANTE       : MESURE: 1 / ???                    00001140
VERTRAULICHKEIT :                                  00001150
GUELTIGKEITSDATUM :                                00001160
-----ANGABEN UEBER FUER DEN EMPFAENGER-----00001170
EMPFAENGERFIRMA : ---                               00001180
EMPFAENGERART   : ---                               00001190

*****00001200
$$              00001210
S1 = BEGINSET  00001220
$$              00001230
$$ 1 / ???     00001240
$$ -----    00001250
S1M1 = MDI / 24, 00001260
  414.5612, 307.0076, -194.3911, -0.0202, -0.0005, 0.9998, 00001270
  414.5622, 219.3706, -194.4361, -0.0202, -0.0005, 0.9998, 00001300
  399.0652, 219.3716, -194.7441, -0.0202, -0.0005, 0.9998, 00001310
  399.0662, 244.0896, -194.7541, -0.0202, -0.0005, 0.9998, 00001320
  399.0672, 278.1186, -194.7501, -0.0202, -0.0005, 0.9998, 00001330
    
```

Figure 8: Début du fichier de points du GF alésage au format VDA.

qui est en contact, du côté libre de la matière, avec P. La même procédure est effectuée pour l'autre GF.

Tous les vecteurs directeurs et les centres de gravité sont alors transportés dans le référentiel du Groupe Fonctionnel (Fig.11).

A partir de cet instant, la phase de vérification commence par la comparaison des diamètres associés à leurs limites admissibles.

Avec les reliquats laissés par les défauts dimensionnels et géométriques des deux surfaces C1 et C2, nous calculons à l'instant t1, les reports de libertés vers C3. Suite à la détermination de la valeur admissible du défaut de position de C3 (report de type II), nous chiffrons le défaut réel de la surface associée à C3. Après comparaison et succès de toutes les étapes précédentes, nous déclarons le Groupe Fonctionnel alésage réel conforme aux spécifications du Bureau d'Etude.

Le même traitement est alors appliqué au deuxième l'autre Groupe Fonctionnel. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

La procédure suivie dans cet exemple peut se résumer dans l'algorithme présenté à la figure 12.

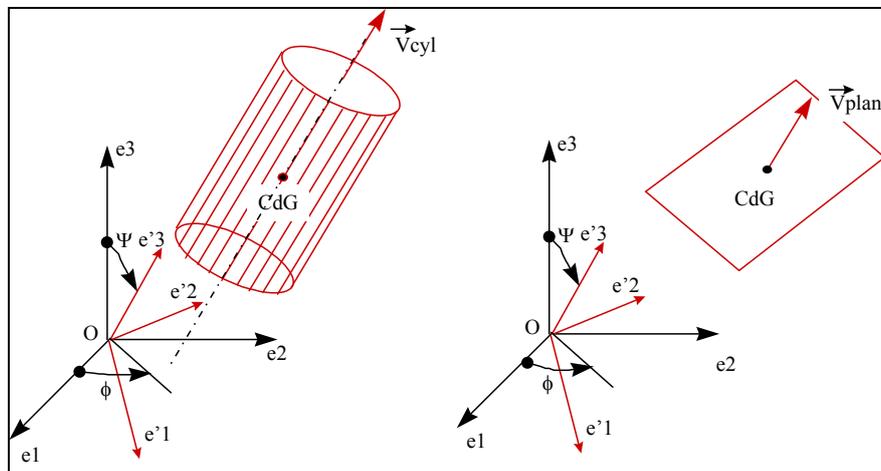


Figure 9: Attributs des surfaces.

2.2.2- Procédure de contrôle

La première partie du contrôle est commune au processus de vérification (détermination des surfaces et référentiel associés et chiffrage de l'espace de liberté). Dans un deuxième temps, les référentiels des deux GF sont confondus par un changement de repère. L'opération de contrôle consiste à trouver un cas de montage où l'intersection entre les extrémités des cylindres associés des deux Groupes Fonctionnels est inexistante (Fig.13).

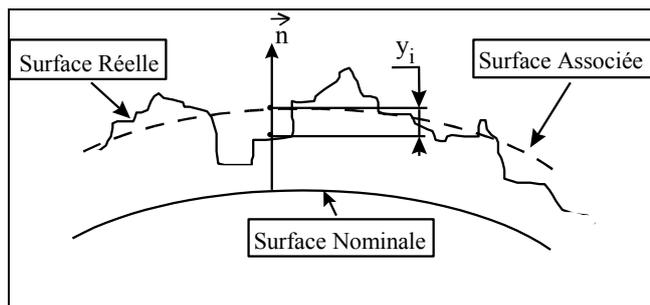


Figure 10: Modélisation des surfaces réelles.

La recherche du cas de montage, rendu possible par l'espace de liberté, s'effectue par une exploration statistique de son domaine. Cette détermination ne présente aucune difficulté de calcul, car la simulation information du montage est d'une grande souplesse d'utilisation.

Cette méthodologie permet de réaliser un appairage entre deux Groupes Fonctionnels représentés par leurs images mathématiques associées ou de procéder au contrôle entre les cylindres idéaux du gabarit informatique et les surfaces associées des Groupes Fonctionnels (Tab.2).

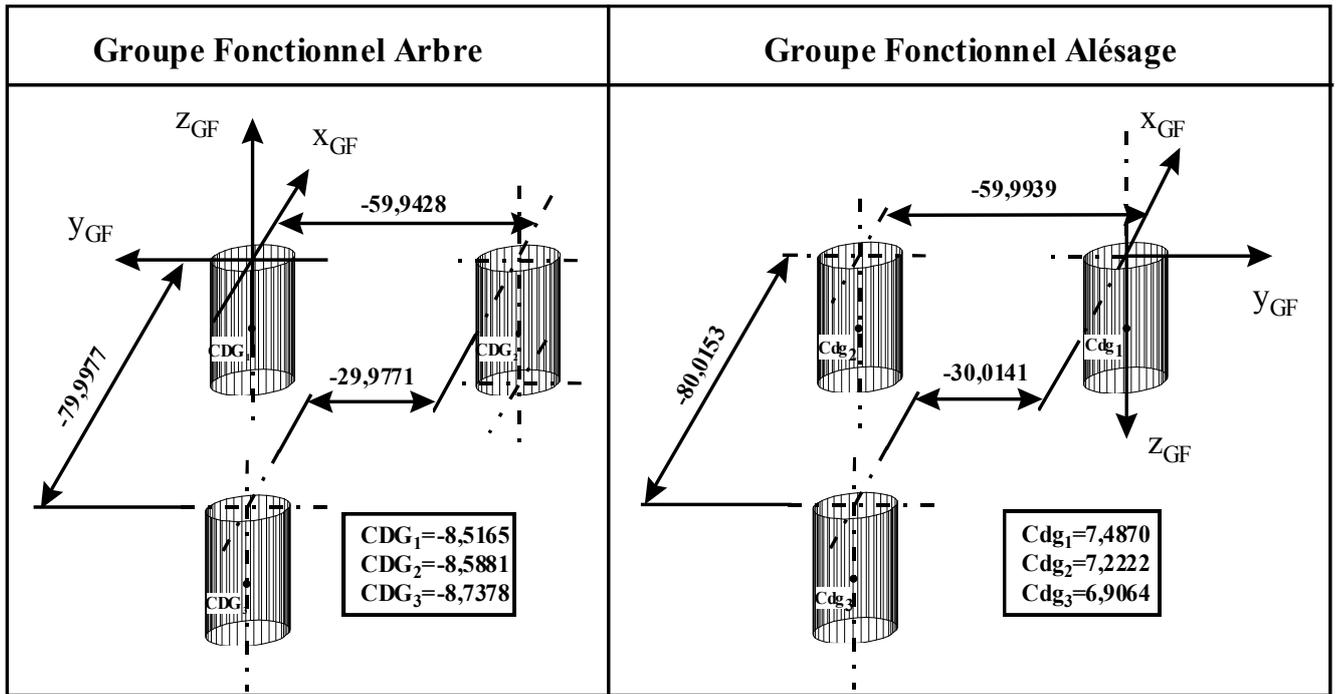


Figure 11: Configuration obtenue après optimisation.

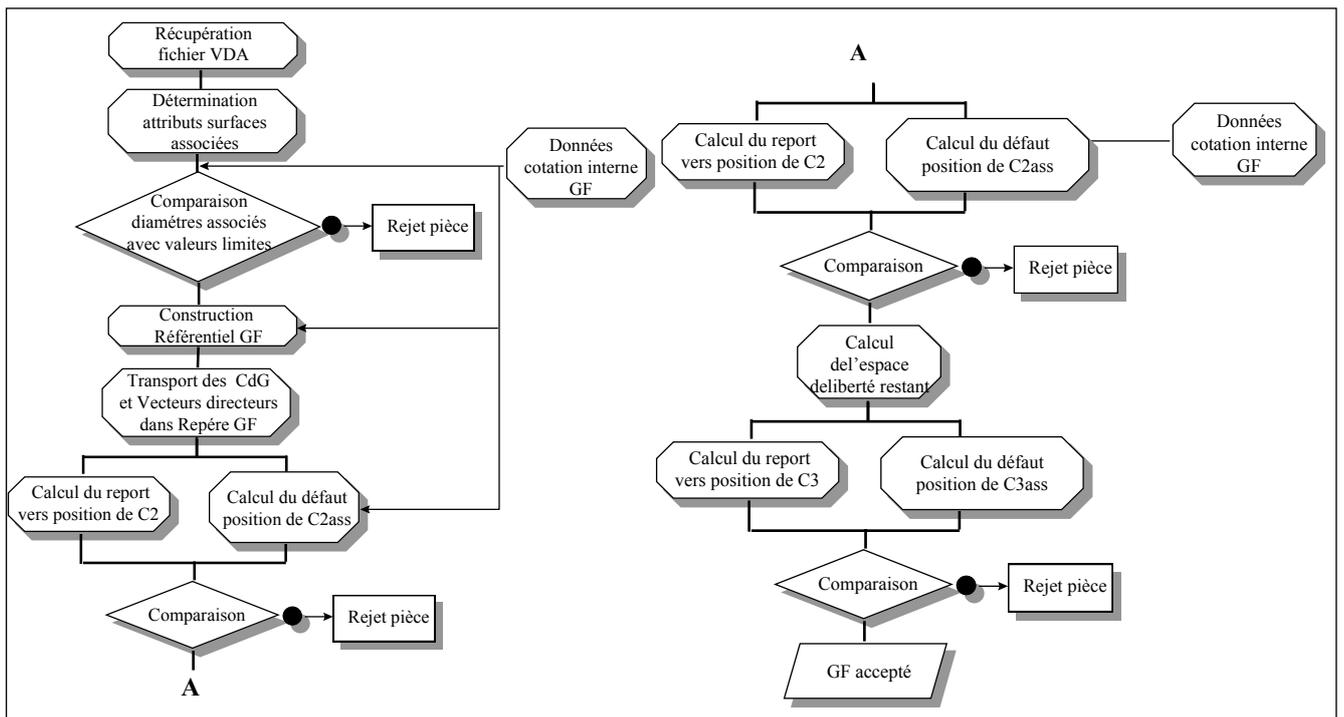


Figure 12: Algorithme de la procédure de vérification.

Tableau 1: Résultats de la vérification.

	Vérification du GF Alésage		Vérification du GF Arbre	
	Défaut autorisé (mm)	Défaut calculé (mm)	Défaut autorisé (mm)	Défaut calculé (mm)
Défaut de C2,c2 suivant Oy	0,0891	0,0066	0,05805	0,05613
Défaut de C2,c2 suivant Ox	0,0890	0,003	0,05081	0,00795
Défaut de localisation C3,c3	0,0497	0,0088	0,12217	0,01515
Défaut de // C3,c3	0,0131	0,009	0,03	0,0157

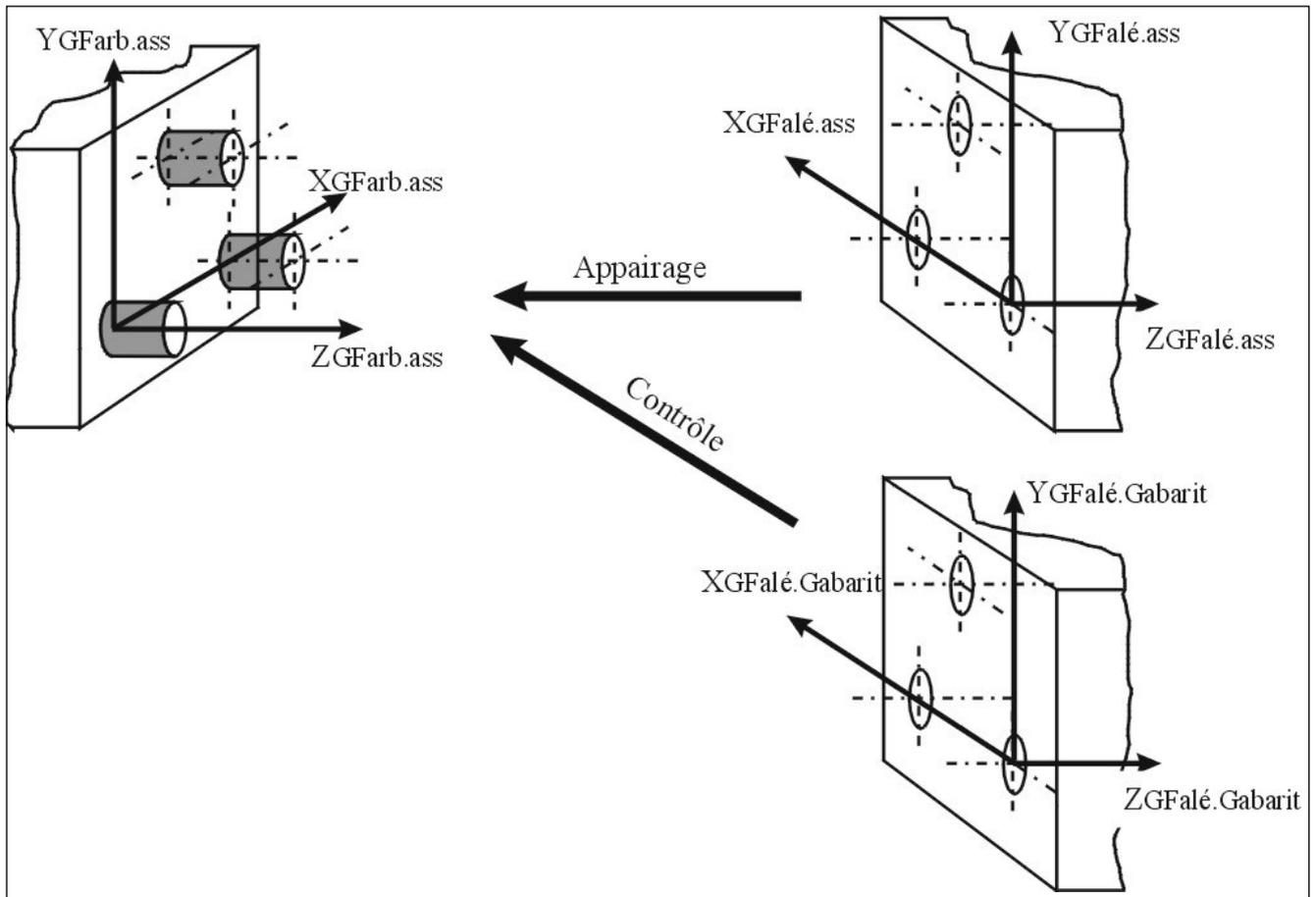


Figure 13: Contrôle et/ou appariage.

Tableau 2: Données de la procédure de contrôle.

Contrôle du Groupe Fonctionnel Alésage		Contrôle du Groupe Fonctionnel Arbre	
Diamètres des Alésages Associés (mm)	Diamètres des Arbres du Gabarit virtuel (mm) (M)	Diamètres des Arbres Associés (mm)	Diamètres des Alésages du Gabarit virtuel (mm) (M)
20,0351	20,005	19,9630	19,9995
20,0539	20,04	19,9299	19,96
20,1438	20,08	19,8817	19,92

CONCLUSION

La maîtrise du processus d'industrialisation des produits manufacturés est une nécessité imposée par la mondialisation des marchés. On ne peut plus se satisfaire d'une augmentation de la productivité par une automatisation à outrance, car la complexité et le coût des installations deviennent trop importants. La performance du système de production sera un compromis entre l'efficacité (faire correctement), la justesse (ce qu'il faut mais pas plus) et la souplesse (faire avec une marge de manœuvre).

La maîtrise des reports de Type II permet de faire bénéficier la fonction conception d'outils assurant une meilleure transcription de l'état fonctionnel interne d'un Groupe Fonctionnel. Ils permettent une plus grande latitude d'actions aux fonctions situées en aval du processus

d'industrialisation. La proposition d'équation de report simplifiée offre de nouvelles possibilités pour un tolérancement adaptatif. La cotation dans cette configuration se limite à la description de l'état fonctionnel souhaité sans contraindre les autres fonctions du processus d'industrialisation. L'utilisation d'équations mathématiques pour réaliser le tolérancement n'est pas nouveau. Le sous-comité de normalisation Y15.5.1 de l'ANSI avait proposé l'utilisation d'une définition mathématique pour tolérer la dimension des éléments géométriques [15,16].

La procédure de vérification par gestion des reports vient compléter la gamme de proposition qu'offre les machine à mesurer tridimensionnelle où les reports de type II ne sont pas proposés. Le contrôle réalisé par appariage peut répondre aux besoins des industriels travaillant suivant une politique basée sur les sous ensembles qui n'impliquent

plus un besoin d'interchangeabilité.

L'évolution de cette méthodologie de vérification et de contrôle implique une meilleure maîtrise de la surface associée par la recherche de la surface fonctionnelle qui permettra d'améliorer l'efficacité, la justesse et la souplesse du processus d'industrialisation.

REFERENCES

- [1]- Marty C., "Concurrent Engineering and economic effects of design decisions", Colloque International INRIA, Grenoble, France, (1995), pp 07-12.
- [2]- Braesch C. et Haurat, "A Modélisation systémique en entreprise", Paris Hermes, (1995), 288p.
- [3]- Auger P., "Hiérarchie et niveau de complexité", Afcet, Solignac, Revue internationale de systémique, Dunod, (1990).
- [4]- Lemoigne J., "La théorie du système général, théorie de la modélisation", Presse Universitaire de France, (1990).
- [5]- Wirtz A., "Vectorial tolerancing", proceeding of CIRP seminar on CAD/CAM, Jerusalem, (1989).
- [6]- Anselmetti B. "Application des exigences au minimum et au maximum de matière au tolérancement fonctionnel d'un mécanisme", Colloque, tolérancement et chaînes de cotes, ENS de Cachan, France, Février (1995).
- [7]- Boukebbab S., "Contribution à l'étude des discontinuités présentes dans les mécanismes en vue d'une ingénierie coopérative", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers Aix-en-Provence, (1998), 168p.
- [8]- Linares J.M., Boukebbab S., Sprauel J.M., "Co-operative engineering approach : tolerancing, control", CIPR Seminar, Production Technology Centre, Berlin, Allemagne, (1998), pp. 145-156.
- [9]- Amara I., Linares J.M., Sprauel J.M., "CMM Acquisition Chain", 33^{ème} International Congress MATADOR, Institute of Science and Technology, University of Manchester, UK, J.M. LINA, Juillet (2000), pp. 229-234.
- [10]- Linares J.M., "Contribution à l'étude de la cotation fonctionnelle par une approche systémique", Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (1996), 153p.
- [11]- Boukebbab S., Linares J.M., Sprauel J.M., "Vers une cotation fonctionnelle adaptative pour la CAO mécanique, Cas 3D équivalent à un cas 2D", Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique Vol. 14, n° 2, Décembre (1999), pp. 313-326.
- [12]- Linares J.M., Boukebbab S., Sprauel J.M., "Parametric tolerancing", 6th CIRP International seminar on Computer Aided Tolerancing, University of Twente, Enschede, The Netherlands, Mars (1999), pp. 167-176.
- [13]- Boukebbab S., Linares J.M., Amara I., Sprauel J.M., "Vers une cotation fonctionnelle adaptative pour la CAO mécanique", Revue Mécanique Industrielle et Matériaux Vol. 52, n° 3, Septembre (1999), pp. 95-99.
- [14]- Bourdet P., Mathieu L., Ballu A., "The concept of the small displacement torsor in metrology", Advanced Mathematical Tools in Metrology II, World Scientific Publishing Company, (1996).
- [15]- Requicha A.G., "Toward a theory of geometric tolerancing", International journal of robotic research, vol. 25, n° 4, (1983), pp. 45-60.
- [16]- Srinivasan V., "Recent efforts in mathematization of ASME/ANSI Y14.5M Standard", Proceeding of 3th CIRP seminars on Computer Aided Tolerancing, Cachan, Avril 27-28 (1993), pp. 223-232. □