

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/279940708>

Intégration du tolérancement dans les système de CFAO : Méthode de synthèse statistique des tolérances par estimation des graduents

Conference Paper · May 2004

READS

27

3 authors, including:



Idir Belaidi

University M'Hamed Bougara of Boumerdes

74 PUBLICATIONS 22 CITATIONS

SEE PROFILE

sur la tolérance d'un assemblage sans itération globale du calcul. En outre, les distributions continues des variations de fabrications sont remplacées par des distributions discrètes équivalentes [SKO'96] dans les méthodes d'analyse statistique de tolérances [BOU'04],[CHA'98].

Un système d'aide au tolérancement doit prendre en considération au moment de la spécification des tolérances l'aspect fonctionnel et l'aspect fabrication (fig.1)

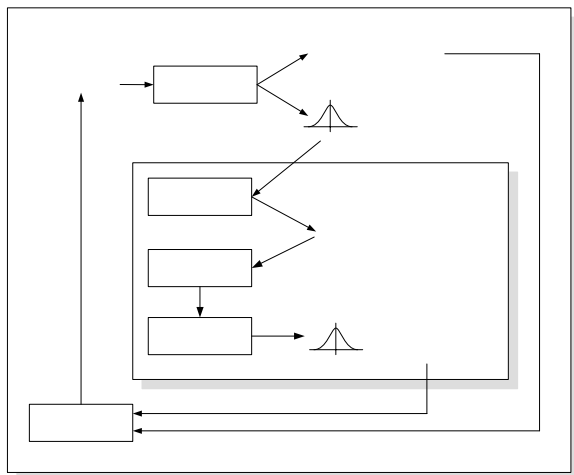


Fig.1 Processus de synthèse statistique de tolérances

En effet, l'aspect fonctionnel consiste à déterminer les dimensions et les tolérances appropriées pour assurer certaines fonctions et l'aspect fabrication consistent à choisir des tolérances techniquement réalisables avec un coût minimum [PIL'01], [PIL02].

Une synthèse de tolérance performante repose nécessairement sur des outils d'analyse de tolérance efficaces, afin de pouvoir optimiser les valeurs des tolérances composantes lors des itérations successives de l'algorithme d'optimisation.

Plusieurs Méthodes d'estimation des moments de distribution de la fonction de conception à partir des moments des différentes variations individuelles des composants, entre autres la simulation de Monté Carlo [EVA75] [CVE'98] [DED'88] [GAO '95], Quadrature [EVA75] [CHA'91] et la méthode de Taguchi [D'ER'88] [KHA'02] [LEE'00] [PIL02], ont été expérimentées [NIG'95]. Il s'est avéré que ces méthodes soient incapables de calculer la sensibilité par une autre technique autre que les différences finies.

La synthèse et l'analyse statistique de tolérances reposent sur deux suppositions: les différentes variations de fabrications sont normalement distribuées [MAN63] et la fonction de conception de la pièce ou de l'assemblage est linéaire par rapport aux différentes variations composantes [NIG'95]. Ces hypothèses mènent permettent en effet de faire deux simplification :

- la distribution des différentes variations peut être exprimé en fonctions des tolérances (l'écart type σ égal au sixième de la largeur de la zone de tolérance) [MAN63],

- la fonction de conception est normalement distribuée avec une variance sous forme linéaire des différentes variances composantes [NIG'95].

Cependant dans la plupart des cas, l'analyse de l'assemblage est représentée par des fonctions non linéaires, la distribution des variables composantes n'est pas normale et la variance de la fonction de conception n'est pas une combinaison linéaire des variances des différentes variations composantes. Ce qui justifie la nécessité de recourir à de nouvelles technique pour calculer la distribution de la fonction de conception.

3. Estimation statistique de la fonction de conception

La méthode d'estimation de la fonction de conception est basée sur l'hypothèse suivante :

Si on dispose de deux ensembles de variables aléatoires (variations de fabrication) ayant des distributions équivalentes, alors les distributions correspondant aux variables aléatoires dépendantes (variations de conception), représentées par la même fonction, sont également équivalentes. Dans le cadre de l'analyse statistique de tolérances, les variables aléatoires indépendantes sont les variations de fabrications, appelées variables modèles. Les variables aléatoires dépendantes représentent les dimensions critiques de l'assemblage, appelés fonctions de conception [NIG'95].

3.1 Calcul des valeurs des fonctions distribution des variables de fabrication

La distribution équivalente qui remplace la distribution réelle continue des variables modèles est une distribution discrète composée d'un échantillon de valeurs. Chaque point de la distribution discrète est analysée et les valeurs de la fonctions de conception sont calculées. La valeur moyenne de la fonction de conception ou les autres moments peuvent être calculée par l'équation :

$$m_{jy} = \sum_k w_k y_k^j \quad (1)$$

où

w_k : est la valeur de la distribution de la fonction de conception au point k .

y_k : est la valeur de la fonction de conception au point k .

m_{jy} : le $j^{ème}$ moment de la distribution de la fonction de conception.

L'équivalence entre les distributions est définie comme égalité entre les moments. Les moments des distributions réelles continues des

Synthèse statistique de tolérance

Tolérances

Processus de fabrication

variables modèles sont connues à partir du processus de fabrication choisi et les moments des variables aléatoires discrètes s'obtiennent à partir de la relation:

$$m_{ji} = \sum_k^m w_k x_{ik}^j \text{ avec } i=1,K,n \text{ et } j=1,K,4 \quad (2)$$

où :

w_k : la valeur de la distribution de la $i^{\text{ème}}$ variable de fabrication au point k .

x_k : la valeur de la $i^{\text{ème}}$ variable de fabrication au point k .

m_{ji} : la $j^{\text{ème}}$ moment de la distribution de la fonction de la $i^{\text{ème}}$ variable de fabrication.

m : le nombre de point de la discrétisation.

Pour des variables indépendantes, le comoment est égal au produit des différents moments :

$$m_{j_1 i_1, j_2 i_2} = m_{j_1 i_1} m_{j_2 i_2} \quad (2)$$

La covariance est exprimée par la relation:

$$\sum_k^m w_k x_{ik} x_{jk} = m_{1i} m_{1j} \quad (3)$$

Les comoments, pour n variables aléatoires, sont donnés par :

$$\sum_k^m w_k x_{i_1}^{j_1} \wedge x_{i_n}^{j_n} = m_{j_1 i_1} \wedge m_{j_n i_n} \quad (4)$$

Une autre condition très importante est la somme des probabilités de la distribution discrète exprimée par:

$$\sum_k^m w_k = 1 \quad (5)$$

Le système d'équations (2), (3), (4), (5) et (6) peut s'écrire sous la forme :

$$UW = M_x \quad (6)$$

avec :

M_x : le vecteur des moments m_{ji} des variables de fabrications.

U : la matrice des valeurs des variables modèles au point de la discrétisation x_{ki}^j .

Pour le calcul des moments dans le cas où les valeurs moyennes des variables modèles sont différentes de zéro, les relations précédentes se ramènent à :

$$\begin{aligned} m_{1i} &= \mu_i \\ m_{2i} &= \sigma_i^2 + \mu_i^2 \\ m_{3i} &= \gamma_i \sigma_i^3 + 3\sigma_i^2 \mu_i + 4\mu_i^3 \\ m_{4i} &= \Gamma_i \sigma_i^4 + 4\gamma_i \sigma_i^3 \mu_i + 6\sigma_i^2 \mu_i^2 + 5\mu_i^4 \end{aligned} \quad (7)$$

avec : μ_i , σ_i , γ_i et Γ_i représentant respectivement la moyenne, l'écart type, "l'assymétrie" (skewness) et "l'aplatissement" (kurtosis) de la distribution de la $i^{\text{ème}}$ variable de fabrication, pour des variables de fabrication

représentées par des distributions normale $\gamma = 0$ et $\Gamma = 3$.

Une fois les probabilités w_k connues, en résolvant le systèmes d'équation (7), les moments des distributions des fonctions de conception seront déterminées par :

$$\mu_y = \sum_k w_k y_k \quad (8)$$

avec y_k : la valeur de la fonction de conception au $k^{\text{ème}}$ point de discrétisation,

Les autres moments sont déterminés à partir de :

$$\mu_{jy} = \sum_k w_k (y_k - \mu_y)^j \quad (9)$$

3.2. Estimation des Graduents pour le calcul des sensibilités

Les dérivées sont obtenues à partir de la méthode d'estimation statistique de la fonction conception. L'équation (1) se ramène sous sa forme vectorielle à:

$$E(Y) = YW \quad (10)$$

avec Y et W , deux vecteurs représentant respectivement les valeurs de la fonction de conception les valeurs de la fonction de probabilité au points de la distribution discrète. En remplaçant le vecteur W par : $W = U^{-1} \cdot M_x$, l'équation (10) devient :

$$E(Y) = YU^{-1} M_x \quad (11)$$

Le gradient des statistiques de la fonction de conception est alors donnée par :

$$\nabla E(Y) = YU^{-1} \nabla M_x \quad (12)$$

avec ∇M_x , la matrice dérivée des moments des variables modèles.

4. Algorithme d'optimisation des tolérances et calcul des critères de performances

La détermination des valeurs des fonctions distribution des variables de fabrication et l'estimation des graduents pour le calcul des sensibilités sont un préalable pour le calcul des tolérances optimales. Traditionnellement, le rapport entre les dimensions composantes (variables de fabrication) d'un assemblage et les résultantes de l'assemblage mécanique (fonctions de conception) sont exprimées par :

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (13)$$

avec :

x_i : Les dimensions composantes,

y_i : Les fonctions de conception.

La détermination d'un critère d'acceptation sur les caractéristiques composantes x_i garantissant l'acceptation de la caractéristique résultante y_i quelles que soient les quantités produites fait appel à une fonction « perte de qualité » selon Taguchi [D'ER'88] [LEE'00] [PIL'01] [PIL02], dont la forme quadratique est exprimée par , :

$$L(y_i) = K_{Q_i} (y_i - y_{ci})^2 \quad (14)$$

Avec :

- K_{Q_i} , une constante calculée à partir d'une valeur connue de la perte de qualité pour toute valeur désignée de y_i et

- y_{ci} , la valeur cible de la fonction de conception [Pil02].

Pour une tolérance composante t_i , avec une perte de qualité A , en remplaçant dans l'équation (4) on obtient :

$$K_{Q_i} = \frac{A}{t_i^2} \quad (15)$$

Si l'on considère que la relation tolérance et le coût de fabrication sont un fonction puissance inverse [SUT'75] [WU'88] [LEE'93b], alors :

$$C_f = K_c t^{-n_i} \quad (16)$$

Le problème de synthèse de tolérance statistique, en d'autre terme l'algorithme d'optimisation, doit donc minimiser le coût total [LEE'93b], qui est défini sous la forme d'une somme de la perte de qualité [D'ER'88] [PIL02] [KHA'02] et le coût de fabrication. On a alors :

$$C_T = \sum_j C_{f_j}(t_j) + \sum_i E(L(F_i, t_n)) \quad (17)$$

avec :

C_T : le coût total de conception;

C_{f_j} : le coût de fabrication de la $j^{ème}$ variable de fabrication;

t_j : la tolérance de la $j^{ème}$ variable de fabrication;

$E(L(F_i))$: la moyenne de la perte de qualité de la fonction de conception.

Si on considère que toutes les variables de fabrication sont indépendantes, et en remplaçant les équations (4) et (5) dans (6), on obtient :

$$C_T = \sum_{j=1}^n \left(\frac{K_{c_j}}{t_j^n} \right) + \sum_{i=1}^m K_{Q_i} \left(\sum_{j=1}^n s_{ji} \frac{t_j^2}{36} \right) \quad (18)$$

où s_{ji} est la *sensibilité* de la $i^{ème}$ *perte de qualité*

L'équation précédente peut se mettre sous la forme:

$$C_T = \sum_{j=1}^n \left(\frac{K_{c_j}}{t_j^n} + \sum_{i=1}^m s_{ji} K_{Q_i} \frac{t_j^2}{36} \right) \quad (19)$$

En remplaçant $K_{Q_i} = \sum_j s_{ji} K_{Q_i}$ et en résolvant

l'équation $\partial C_T / \partial t_j = 0$, on obtient finalement la relation donnant les tolérances optimales :

$$t_j = {}^{n_i+2} \sqrt{\frac{18 n_i \cdot K_{c_j}}{K_{Q_i} T_j}} \quad (20)$$

5. Application

5.1. Mise en œuvre informatique

La synthèse statistique des tolérances par estimation des gradients a été implémentée sous Matlab. Le programme général, dont le pseudo-code de l'algorithme est donné en annexe, permet de calculer les tolérances optimales pour chaque dimension ainsi que le coût de fabrication, les pertes de qualités, le coût total et la fraction d'acceptance.

En considérant l'exemple introduit dans [LEE'93b], les fonctions de conception qui assurent la faisabilité de l'assemblage (figure 2) s'intitulent :

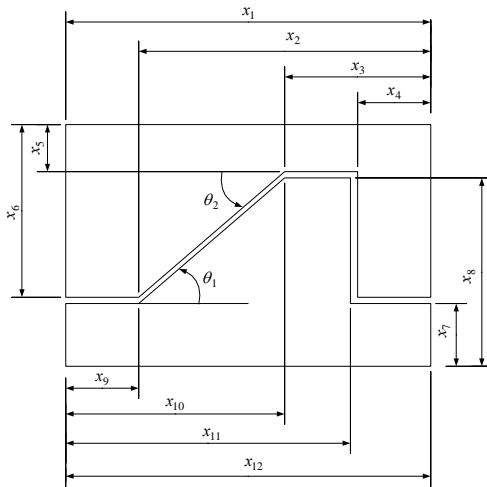


Fig. 2 Exemple d'application de la synthèse de tolérance non linéaire.

- la surface horizontale intérieure de la pièce supérieure (2) repose sur la surface de contact correspondante de la pièce inférieure (1);
- la variation de la différence des deux angles θ_1 et θ_2 est de 1° et la différence de la largeur entre les deux pièces doit être dans l'intervalle ± 0.01 .

Pour les données considérées dans le tableau 1, nous comparons les résultats obtenus par l'algorithme implémenté avec les résultats publiés dans [LEE'93a] utilisant un algorithme génétique basé sur la méthode des différences.

Variable	Valeur nominale	Constante $K_c \times 10^3$	Exposant n
x1	50.0	0.200	2.0
x2	40.00125	1.000	2.0
x3	20.05	0.015	2.0
x4	9.9985	0.015	2.0
x5	9.9985	0.008	2.0
x6	30.0	0.009	2.0
x7	10.0	0.008	2.0
x8	30.0	0.006	2.0
x9	10.05	1.000	2.0
x10	30.0	0.010	2.0
x11	40.0	0.015	2.0
x12	50.0	0.200	2.0

Tab.1 Dimension et paramètres de la fonction coût de fabrication.

La constante de la perte de qualité A est ajusté telle que la fraction d'acceptance de 95% corresponde au critère de Lee et Johnson [LEE'93a]. Une valeur de $A=10$ nous donne une fraction d'acceptance de 0.935 et une valeur de 20, une fraction d'acceptance de 0.969. Par interpolation, on retient la valeur de A appropriée, qui est de 14.

Les tolérances optimales pour la valeur de A calculées précédemment sont données dans le Tableau 2. Les coûts et la fraction d'acceptance pour chaque ensemble de tolérances sont montrés dans le Tableau 3. La fraction d'acceptance pour les tolérances calculées qui est de 0.954 se situe dans la région faisable de Lee et Johnson. On constate que la perte de qualité L_1 est plus élevée en comparaison aux autres pertes de qualité (Tableau 3). Ceci conduit à des tolérances t_5, t_6, t_7 et t_8 plus serrées que les autres, donc conformes aux résultats obtenus par Lee et Johnson. Cependant, une différence notable existe entre les résultats obtenus par Lee et Johnson et ceux des tolérances calculées : $t_1, t_2, t_3, t_4, t_9, t_{10}, t_{11}$ et t_{12} , due à leurs faibles contributions dans le coût et la performance du produit.

Toler.	Résultat obtenu par Lee et Johnson			Résultats calculés
	1	2	3	
t_1	0.01647	0.01647	0.01294	0.01506
t_2	0.18824	0.20707	0.86591	0.18792
t_3	0.05897	0.05189	0.03585	0.01786
t_4	0.05646	0.05646	0.06587	0.01788
t_5	0.00235	0.00235	0.00235	0.00261
t_6	0.00212	0.00212	0.00212	0.00269
t_7	0.00306	0.00306	0.00306	0.00261
t_8	0.00212	0.00212	0.00212	0.00243
t_9	0.82765	0.63847	0.82765	0.18792
t_{10}	0.05788	0.06212	0.05647	0.01614
t_{11}	0.02353	0.01224	0.02259	0.01788
t_{12}	0.01176	0.01176	0.01294	0.01506

Tab.2 Tolérances optimales

Coût, perte de qualité et fraction d'acceptance	Résultat obtenu par Lee et Johnson			Résultats calculés
	1	2	3	
C_M	7.90	7.97	8.08	6.62
L_1	4.13	4.13	4.13	4.62
L_2	1.55	1.45	1.38	0.18
L_3	0.58	0.37	1.15	0.06
L_4	1.59	1.59	1.30	1.76
Coût total	15.75	15.51	16.04	13.24
Fraction d'acceptance	0.948	0.954	0.955	0.954

Tab. 3 Performances des tolérances optimales.

Dans cet exemple, il y'a deux paires de tolérances (t_1 et t_{12} , t_5 et t_7) qui ont les mêmes valeurs des constantes K_c et K_Q . Des valeurs identiques ont été obtenues pour les résultats calculées, ce qui n'est pas le cas pour les résultats obtenus par Lee et Johnson, qui est due probablement à la divergence de l'algorithme génétique.

5. Conclusion

L'intégration de la cotation automatique dans les systèmes de CFAO est plus que jamais d'actualité. Les systèmes actuellement disponibles restent incomplets et demeurent tous perfectibles ; les méthodes d'analyse et de synthèse font toujours l'objet de recherche et de développement continus.

La synthèse statistique des tolérances par estimation des gradients jouit d'une simplicité de mise en œuvre (utilisation des distributions discrètes au lieu des distributions continues), d'un temps de calcul réduit des dérivées par rapport à la méthode des différences finies, d'une précision appréciable pour le calcul des tolérances intervenant dans le coût et la performance du produit (perte de qualité importante, coût de fabrication important).

L'implémentation et l'intégration de cette méthode dans un logiciel de CFAO requiert toutefois la génération automatique des chaînes de cotes. En outre, un changement de la constante de perte de qualité ou de la fraction d'acceptance rendrait nécessaire la répétition du procédé global de calcul. Pour les tolérances qui ont une très faible contribution dans le coût et la performance du produit, on obtient une différence plus ou moins importante.

6. Références bibliographiques

- [BAL'95] A. BALLU, L. MATHIEU, "Univocal expression of functional and geometric tolerances for design, manufacturing and inspection", *In Proceedings of the 4th CIRP Design Seminar on Computer-Aided Tolerancing (Edited by F. Kimura)*: pp. 31-46.
- [BER'89] N-S. BERNSTEIN, K. PREISS, Representation of tolerance information in solid models, *International Conference on CAD/CAM an AMT in Israel, CIRP Sessions on Tolerancing for function in CAD/CAM environment Proceedings, Vol.2, Jerusalem, Israel, 11-14 December 1989*, p. 385-393.
- [BON'89] A-H. BOND, S-Z. AHMED, Knowledge based automatic dimensioning, *Artificial Intelligence in Engineering, Computational Mechanics Publications, Vol. 4, N°1*, p. 25-38. 1989.
- [BOU'02] S. BOUKEBBAB, I. AMARA, J. M. LINARES, "Tolérancement adaptatives en vue d'une implémentation dans les systèmes de CFAO", *Sciences & Technologie N° 18 Décembre 2002* : pp 55-62.
- [BOU'01] S. BOUTAHARI, A. ABDELMIJID SAKA, M. CARRARD, "Outil de tolérancement vectoriel", *Revue de CFAO et d'informatique graphique Vol 16(4) 2001* : pp 445-458.
- [BOU'04a] B. BOUCHERIT, "Analyse et de synthèse des tolérances pour l'intégration de la cotation en CFAO : Méthode statistique d'analyse des tolérances par estimation des gradients", *Mémoire de Magister, Université de Boumerdes (Algérie), janvier 2004*.
- [BOU'04b] B. BOUCHERIT, I. BELAIDI "Intégration de la cotation en CFAO : Méthode statistique d'analyse des tolérances par estimation des gradients", *Journées de Mécanique JE'2004, EMP Bordj, El Bahri, Alger, mars 2004*.
- [CHA'91] K. W. CHASE, A. R. PARKINSON, "A survey of research in the application of tolerance analysis to the design of mechanical assemblies", *Research in Engineering Design Vol. 3*: pp. 23-37.
- [CHA'96] K. W. CHASE, J. GAO, S. P. MAGLEBY, C. D. SORENSEN, "Including geometric feature variations in tolerance analysis of mechanical assemblies", *IIE Transactions Vol. 28(10)*: pp. 795-807.
- [CLÉ'93] A. CLÉMENT, A. RIVIÈRE, "Tolerancing versus nominal modelling in next generation CAD/CAM system", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993*: pp. 97-114.
- [CLO95] P. CLOZEL, Tolérances 3D : simulation des jeux et chaînes de cotes 3D, *Actes de séminaire sur le tolérancement et chaînes de cotes, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 8-9 février 1995*, p. 49-59.
- [DEL'92] P. DELANCHE, A. LEROY, Agencement et écarts de position en conceptique, *Technologie et formations, 1992, N°39*, p. 47-52.
- [ELM'93] H. A. ELMARAGHY, W. H. ELMARAGHY, "A system for modelling geometric tolerances for mechanical design", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993*: pp. 11-24.
- [ETE93] F. ETESAMI, "A Mathematical model for geometric tolerances", *Journal of Mechanical Design: Transactions of the ASME Vol. 115*: pp. 81-86.
- [FAR'86] L. E. FARMER, C. A. GLADMAN, "Tolerance technology – Computer-Based Analysis", *Annals of the CIRP Vol. 35/1*: pp. 7-10.
- [GE'92] Q. GE, B. CHEN, P. SMITH, C. H. MENQ, "Tolerance specification and comparative analysis for computer integrated dimensional inspection", *International Journal of*

- Production Research Vol. 30(9): pp. 2173-2197.*
- [GIO'93] M. GIORDANO, D. DURET, "Clearance space and deviations space. Application to three-dimensional chain of dimensions and positions", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993: pp. 179-196.*
- [HER'02] P. HERNANDEZ, M. GIORDANO, "Outil analytique d'aide au tolérancement géométrique en vue d'intégration en C.A.O", *IDMME 2002 Clermont-Ferrand, France, May 14-16 2002.*
- [HIL'78] R. C. HILLYARD, I. C. BRAID, "Analysis of dimensions and tolerances in computer aided mechanical design", *Computer-Aided Design Vol. 10(3), pp.161-166.*
- [JAY'89] R. JAYARAMAN, V. SRINIVASAN, "Geometric tolerancing, Virtual boundary requirements", *IBM Journal of Research, Vol 33(2): pp. 90-104, Mars 1989.*
- [JUS'92] N. P. JUSTER, "Modelling and representation of dimensions and tolerances: A survey", *Computer-Aided Design Vol. 24: pp. 3-17, 1992.*
- [LEL'02] C. LELU, M. DAHAN, "Utilisation de règles d'interférences floues pour le calcul des cotes d'un assemblage mécanique soumis a contraintes", *IDMME 2002 Clermont-Ferrand, France, May 14-16 2002.*
- [LIN'93] J. M. LINARES, C. MARTY, "Tolerancing by functional group", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993: pp. 267-277.*
- [MAT'98] L. MATHIEU, A. BALLU, "Virtual gauge with internal mobilities for the verification of functional specifications", *In Geometric Design Tolerancing: Theories, Standards and Applications (Edited by H. A. ELMARAGHY), pp.360-371. ISBN 0-412-83000-0. Presented at the 5th CIRP Seminar on Computer-Aided Tolerancing, Toronto, Canada.*
- [NAS'93] A. O. NASSEF, H. A. ELMARAGHY, "Allocation of tolerance types and values using Genetic Algorithms", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993: pp. 147-156.*
- [NIG'95] S. D. NIGAM, J. U. TURNER, "Review of statistical approaches to tolerance analysis", *Computer-Aided Design Vol. 27(1): pp. 6-15.*
- [PAN87] V. PANDIT, "Mechanical tolerance analysis using a statistical generates and-test procedure", *IMSL, 1987, "STAT/LIBRARY", IMSL, Inc, Houston, TX. pp 29-34.*
- [RIV'93] L. RIVEST, C. FORTIN, A. DESROCHERS, "Tolerance modelling for 3D analysis: Presenting a kinematics formulation", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993: pp. 51-74.*
- [REQ'86] A. A. G. REQUICHA, S. C. CHAN, "Representation of geometric features, tolerances and attributes in solid modellers based on constructive geometry", *IEEE Journal of Robotics and automation. Vol. RA-2(3), September 1986.*
- [ROY'91] U. ROY, C. R. LIU, T. C. WOO, "Review of dimensioning and tolerancing: representation and processing", *Computer-Aided Design Vol. 23(7): pp 466-483.*
- [SCH'93] F. SCHNEIDER, J. R. VINCENT, "The assembly function applied to the definition, control and manufacture of mechanical components", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993: pp. 129-146.*
- [SRI'93] V. SRINIVASAN, "Recent effort in mathematization of ASME/ANSI Y14.5M standard", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993: pp. 223-232.*
- [TAK'93] K. TAKAHASHI, H. SUZUKI, F. KIMURA, "Motion analysis of parts with geometrical errors based on dynamic simulation", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993: pp. 85-96.*
- [TEI'02] D. TEISSANDIER, J. DUFAURE, "Tolerance synthesis with polytopes: application to radial ball bearing arrangements", *IDMME 2002 Clermont-Ferrand, France, May 14-16 2002.*
- [TUR90] J. U. TURNER, "Exploiting solid models for tolerance computations", *Geometric Modelling for Product Engineering. Elsevier Science Publishers (North-Holland), IF/P 1990.*
- [WIL'92] R-G. WILHELM, SS LU, "Tolerances synthesis to support concurrent engineering", *Annals of the CIRP, Vol. 41/1, p. 197-200. 1992.*
- [WIR93] A. WIRTZ, "Vectorial tolerancing a basic element for quality control", *3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, April 1993: pp. 115-128.*

Annexe1 : Pseudo-code de l'algorithme d'optimisation des tolérances mis en œuvre

Entrées : Nombre des variables aléatoires 'pour le calcul de sensibilité' nva_1
 Nombre des variables aléatoires 'pour le calcul de la fraction d'acceptance' nva_2
 Constante de perte de qualité A
 Nombre des dimensions composantes n
 Nombre de fonction d'assemblage m
 Vecteur des valeurs nominales (dimensions composantes) a
 Exposants de la fonction coût n_i
 Coefficient de la fonction coût K_{c_i}

Traitements :
Début
Faire : Calculer :

1. La matrice de sensibilité
Faire,
 Pour chaque dimension composante sur chaque fonction de conception
 1. Génération de nombre aléatoire x_{ij} , $i=1, \dots, n$ et $j=1, \dots, nva_1$
 2. Construction de la matrice des valeurs aléatoires des variables composantes U
 3. Calcul de l'inverse de la matrice U^{-1}
 4. Calcul du vecteur des valeurs des fonctions de conception Y
 5. Calcul de la sensibilité $S=Y*U^{-1}$**Fin faire**
2. La fraction d'acceptance fa
Faire pour $i=1, \dots, n$
Faire pour $j=1, \dots, nva_2$
 Création de la matrice des dimensions composantes aléatoires x_{ij}
Fin Faire j
Fin Faire i
Faire pour $i=1, \dots, nva_2$
Faire pour $j=1, \dots, m$
 Calculer la valeur de la fonction de conception m
Fin Faire j
Si toutes les fonctions de conception vérifient les conditions aux limites $p(i)=1$
Sinon $p(i)=0$
 Calculer la fraction d'acceptance : $fa=\sum(p(i))/nva_2$
Fin Faire i
3. Les tolérances composantes optimales t_i :
Faire pour $i=1, \dots, m$
 Calcul des constantes des fonctions de perte de qualité $K_{Q_i}=A/D_i(x_1 \dots x_n)$
Fin Faire pour i
Faire pour $i=1, \dots, n$
Faire pour $j=1, \dots, m$
 Appel la matrice de sensibilité [S]
 Calcul des constantes $K_{QT_i}=\sum S_{ij} * K_{Q_j}$
Fin Faire pour j
 Calcul des tolérances optimales $t_i= ((18*n_i*K_{c_i})/K_{QT_i})^{(n_i+2)}$
Fin Faire pour i
4. Le coût de fabrication C_f , les pertes de qualité L_i , le coût total C_T

Fin faire
Fin.