



■ Maurice PILLET

# Améliorer la productivité



**Déploiement industriel  
du tolérancement inertiel**

EYROLLES

Éditions d'Organisation



- Une démarche de rupture dans l'approche de la qualité des produits
- Une nouvelle façon de concevoir la conformité d'une caractéristique
- Des outils pour maîtriser les processus de production très innovants
- Une approche globale et cohérente de la spécification au contrôle pour garantir la qualité aux clients

Le tolérancement inertiel vise à garantir une excellente qualité des produits, tout en laissant le plus de liberté possible à la production. Il limite ainsi la variabilité dimensionnelle des pièces mécaniques. L'usage veut que l'on délimite la variabilité par un intervalle de conformité. Or cette approche centenaire est en passe d'être dépassée par le tolérancement inertiel, récemment normalisé, qui donne plus de liberté à la production, tout en garantissant une excellente fonctionnalité des produits assemblés.

Contrairement aux approches traditionnelles, le tolérancement inertiel pousse à respecter le centrage sur la cible. Les outils de la maîtrise inertielle des processus (MIP) avec les cartes de contrôles inertiels très performantes, associées à des indicateurs de capabilité et un pilotage multicritère rendent très simple le pilotage sur la cible des processus, afin de garantir l'inertie maximale admise.

Cet ouvrage a pour objectif de décrire de façon pragmatique l'ensemble de la chaîne inertielle, depuis la spécification des tolérances jusqu'au pilotage des machines, en passant par la maîtrise des moyens de mesures.

**Maurice Pillet**, certifié « Fellow » apics – CFPIM, ancien élève de l'ENS Cachan, est professeur des universités. Directeur de recherche au Laboratoire SYMME de l'Université de Savoie, il enseigne au département QLIO de l'IUT d'Annecy.

Il entretient depuis des années une collaboration étroite avec des entreprises de différents secteurs d'activité dans le domaine des méthodes et des outils de la qualité. Cette double expérience d'universitaire et de praticien est à l'origine du concept de tolérancement inertiel dont il est l'inventeur.

Code éditeur : C54754  
ISBN : 978-2-12-54754-2

# **Améliorer la productivité**

Déploiement industriel  
du tolérancement inertiel

Éditions d'Organisation  
Groupe Eyrolles  
61, bd Saint-Germain  
75240 Paris cedex 05

[www.editions-organisation.com](http://www.editions-organisation.com)  
[www.editions-eyrolles.com](http://www.editions-eyrolles.com)

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2010  
ISBN : 978-2-212-54754-2

Maurice Pillet

# **Améliorer la productivité**

Déploiement industriel  
du tolérancement inertiel

**EYROLLES**

Éditions d'Organisation



# Remerciements

Ce livre est le résultat de nombreuses années de recherches et de collaborations avec plusieurs dizaines d'entreprises et d'universités. Toutes ces rencontres ont été une source de réflexion et de progrès. Que tous les industriels et les chercheurs que j'ai été amené à rencontrer, avec lesquels j'ai échangé, soient remerciés de leur importante contribution.

Je tiens à remercier les membres du groupe « Tolérancement inertiel » du pôle de compétitivité « Arve Industrie mont Blanc » qui a été à la source de nombreux progrès dans la méthode, et plus particulièrement Marc, qui a remarquablement dirigé ce groupe, Jacques et Pierre-Olivier, qui ont investi beaucoup de leur temps pour faire aboutir les expérimentations et la normalisation.

Je remercie également tous les membres du laboratoire SYMME et du département QLIO de l'université de Savoie, avec qui collaborer est un plaisir quotidien, et plus particulièrement Pierre-Antoine, Dimitri et Ephraïm, qui ont largement contribué à faire évoluer le concept avec leurs travaux de doctorat, et Daniel, Serge et Éric, pour leurs idées et nos riches échanges.

Enfin, mes remerciements vont à Murielle pour la relecture attentive du manuscrit et ses remarques toujours judicieuses.





# Sommaire

Remerciements .....	V
Introduction – De l’interchangeabilité à Six Sigma .....	1
<b>CHAPITRE 1 – Du tolérancement traditionnel au tolérancement inertiel .....</b>	<b>9</b>
1. Les trois incohérences du tolérancement traditionnel.....	9
1.1. Incohérence fonctionnelle .....	9
1.1.1. Incohérence de l’approche au pire des cas .....	13
1.2. Incohérence de conformité .....	15
1.3. Incohérence économique .....	17
1.4. Le coût de ces trois incohérences .....	21
2. De la nécessité de définir autrement la conformité .....	22
2.1. Définition de l’inertie.....	22
2.2. Le tolérancement inertiel et les trois incohérences.....	26
2.2.1. Incohérence fonctionnelle .....	26
2.2.2. Incohérence de conformité .....	32
2.2.3. Incohérence économique .....	34
3. Les implications culturelles du tolérancement inertiel .....	35
3.1. Avoir une vision chaîne logistique plutôt que de se focaliser sur chaque caractéristique .....	36
3.2. Avoir une vision statistique du processus de production.....	37
3.3. Limiter la variabilité, ce n’est pas automatiquement accepter une excursion de la moyenne autour de la cible.....	37
3.4. Changer de paradigme.....	38
<b>CHAPITRE 2 – Le tolérancement inertiel, une autre vision de la conformité .....</b>	<b>45</b>
1. Le tolérancement inertiel dans le cas bilatéral .....	45
1.1. Rappel de la définition du tolérancement inertiel .....	46

1.2. Représentation graphique du tolérancement inertiel .....	48
1.2.1. Représentation graphique de la conformité associée à un histogramme .....	48
1.2.2. Cas extrêmes .....	50
1.2.3. Représentation graphique de la conformité dans un graphe $\delta \sigma$ .....	51
1.2.4. Déclaration de conformité d'un lot, d'une pièce .....	52
1.2.5. Utilisation du graphe $\delta \sigma^2$ .....	53
2. Les indicateurs de capabilité en tolérancement inertiel .....	55
2.1. Définition .....	55
2.2. Exemple de calcul .....	56
2.3. Interprétation de ces indicateurs de capabilité .....	58
3. Le cas des limites unilatérales .....	59
3.1. Cas des caractéristiques unilatérales à limite supérieure .....	59
3.2. Cas des caractéristiques unilatérales à limite inférieure .....	61

**CHAPITRE 3 – Comment calculer une tolérance inertielle** 63

1. Calcul standard d'une tolérance inertielle .....	63
1.1. Définition de l'objectif sur l'exigence fonctionnelle .....	64
1.2. Calcul des cibles .....	66
1.3. Calcul de l'inertie – répartition uniforme des tolérances .....	67
1.4. Calcul de l'inertie – répartition non uniforme des tolérances..	68
1.5. Calcul de l'inertie – cas de tolérances figées .....	70
2. Garantir un taux de non-conformité sur l'exigence fonctionnelle	71
2.1. Situation d'assemblage la plus défavorable .....	71
2.2. Calculer l'inertie pour garantir un Ppk sur l'exigence fonctionnelle	72
3. Garantir une inertie sur l'exigence fonctionnelle .....	74
3.1. Combinaison des inerties .....	75
3.2. Hypothèse 1 : distribution aléatoire des moyennes, décentrage moyen nul .....	77
3.3. Hypothèse 2 : Pire des cas, décentrage maximal .....	77
3.4. Hypothèse 3 : décentrage d'une valeur $k\sigma$ de tous les composants .....	78
3.5. Hypothèse 4 : décentrage de m caractéristiques sur n .....	79
4. Exemple de calcul de répartition de tolérances inertielles .....	79
4.1. Calcul des cibles .....	80
4.2. Détermination des pondérations de faisabilité .....	80
4.3. Calcul en tolérancement traditionnel dans l'hypothèse pire des cas .....	80

4.4. Calcul en tolérancement traditionnel dans l'hypothèse statistique quadratique .....	81
4.5. Calcul en tolérancement inertiel .....	83
4.6. Calcul en tolérancement inertiel pour garantir un Ppk .....	84
4.7. Récapitulatif des différents calculs .....	85

## **CHAPITRE 4 – Maîtrise Inertielle de Processus** .....

1. De la MSP à la MIP .....	87
2. Les outils traditionnels de la MSP .....	88
2.1. Utilisation des cartes de Shewhart .....	89
2.1.1. Le principe de Shewhart.....	89
2.1.2. La carte de contrôle des moyennes.....	90
2.1.3. La carte de contrôle des étendues .....	91
2.1.4. Exemple de suivi par cartes de contrôle moyennes/étendues .....	91
2.1.5. Autres cartes utilisables.....	92
2.2. Cartes de Shewhart à limites élargies .....	93
2.3. Exemple de calculs de limites de contrôle avec les cartes de type Shewhart .....	95
2.4. Condition d'existence d'une limite élargie .....	96
3. La carte de contrôle inertielle .....	97
3.1. Loi de distribution des inerties de Scheffé .....	97
3.2. Carte de contrôle inertielle.....	98
3.2.1. Inertie historique court terme.....	99
3.2.2. Zone verte .....	99
3.2.3. Zone orange.....	100
3.2.4. Zone rouge .....	101
3.2.5. Zone noire .....	101
3.3. Représentation locale de l'échantillon .....	102
3.4. Carte en tunnel .....	103
3.5. Condition d'existence des différentes zones.....	103
3.6. Exemple de carte de contrôle inertielle.....	105
3.6.1. Présentation de l'exemple .....	105
3.6.2. Calcul de la carte de contrôle des inerties .....	106
4. Autres cartes de contrôle inertielles .....	109
4.1. Carte $\pm$ une inertie .....	109
4.2. Carte inertielle sans dérive.....	112
4.3. Choix entre la carte de contrôle.....	113
5. Conclusion .....	115

<b>CHAPITRE 5 – Pilotage inertiel multicritère</b> .....	117
1. Le problème multicritère .....	117
2. Principe du pilotage inertiel multicritère .....	119
2.1. Solution du problème de pilotage inertiel multicritère .....	120
2.2. Exemple de pilotage inertiel multicritère .....	121
2.3. Prise en compte des cartes inertielles .....	123
3. Pilotage inertiel pondéré par la sévérité relative des cotes .....	126
4. Pilotage inertiel multicritères dans le cas d'une presse à injecter .....	129
4.1. Détermination de la matrice d'incidence et de la matrice de pilotage inertielle .....	130
4.2. Exemple de pilotage .....	133
5. Conclusion .....	134
<b>CHAPITRE 6 – Tolérancement inertiel total</b> .....	137
1. Faire évoluer le tolérancement géométrique .....	139
2. Établir la conformité par l'inertie totale .....	141
2.1. Définition de l'inertie totale .....	141
2.1.1. Inertie d'une surface .....	142
2.1.2. Inertie d'un ensemble de surfaces .....	142
2.2. Spécifier une pièce en inertie totale .....	143
2.2.1. Cas où il y a plusieurs références .....	145
2.2.2. Référence avec une direction privilégiée .....	145
2.3. Intérêt d'une spécification en inertie totale .....	147
3. Piloter une production en inertiel total .....	148
3.1. L'approche pilotage inertiel total .....	148
3.2. Exemple de pilotage en inertie totale .....	150
3.2.1. L'exemple .....	150
3.2.2. Détermination de la matrice d'incidence $A$ .....	151
3.2.3. Calcul de la matrice de pilotage inertielle .....	153
3.2.4. Calcul de la correction .....	154
3.2.5. Hiérarchisation des corrections .....	155
3.3. Intérêt du pilotage en inertie totale .....	156
3.4. Calcul de la matrice d'incidence dans différents cas .....	157
3.5. Pondération en fonction de l'inertie maximale .....	157
3.5.1. Le problème .....	157
3.5.2. Pilotage inertiel total pondéré .....	160
4. Pilotage par carte inertielle .....	162
5. Conclusion .....	163

<b>CHAPITRE 7 – Réception de lots en tolérancement inertiel</b>	<b>165</b>
1. Règle de prélèvement et d'acceptation – Méthode $\sigma$ , écart-type connu .....	167
1.1. Le problème .....	167
1.2. Détermination du plan de contrôle .....	168
1.3. Carte de contrôle réception avec sigma connu .....	169
2. Règle de prélèvement et d'acceptation – Cas sigma inconnu – méthode S .....	171
2.1. Loi de distribution des inerties .....	171
2.2. Calcul de la taille des échantillons .....	171
2.3. Calcul de l'inertie maximale admissible .....	172
2.4. Approche pragmatique .....	173
2.5. Exemple d'application .....	174
2.5.1. Calcul à partir des risques .....	174
2.5.2. Calcul à partir de la taille d'échantillon .....	176
3. Définition des limites de tri dans le cas du refus d'un lot .....	177
3.1. Cas de la loi uniforme .....	177
3.1.1. Cas d'une distribution centrée autour de la cible .....	177
3.1.2. Cas d'une distribution décentrée autour de la cible .....	179
3.2. Cas de la loi normale .....	180
3.3. Cas d'une loi non spécifiée .....	183
3.4. Exemple de tri en contrôle de réception .....	183
3.4.1. Calcul des limites de tri .....	184
3.4.2. Résumé des calculs .....	185
 <b>CHAPITRE 8 – Validation d'un processus de mesure en inertiel</b> .....	 <b>187</b>
1. Justesse et Dispersion .....	187
2. Capabilité des processus de contrôle inertielle $C_{pc_i}$ .....	189
2.1. Estimation de la dispersion de mesure .....	190
2.2. Estimation du biais .....	193
2.3. Estimation du $C_{pc_i}$ .....	195
3. Calcul du $nd_{c_i}$ , nombre de catégories distinctes inertiel .....	196
 <b>ANNEXE – Tables et résumés</b> .....	 <b>201</b>
Bibliographie .....	215
Index .....	218



# Introduction

## De l'interchangeabilité à Six Sigma

Si nous étions dans un mode sans variabilité, la vie serait sans doute bien triste mais les produits industriels seraient plus faciles à réaliser ! La variabilité, c'est ce que l'on aime dans la nature, dans le travail de l'artiste, voire dans le travail de l'artisan. Mais en matière de produits industriels, la variabilité est souvent l'ennemi.

La qualité d'un produit industriel est le résultat de deux éléments complémentaires : la qualité de la conception et la variabilité de la production. Suivant les fonctions attendues du produit, les choix de conception, ses conditions d'utilisation, on pourra accepter plus ou moins de variations lors de la réalisation au voisinage de la cible idéale ; celle-ci étant souvent le résultat d'un certain nombre de compromis. Par exemple, dans le cas d'un axe qui doit coulisser librement dans un alésage, l'exigence de guidage parfait conduirait à mettre un minimum de jeu fonctionnel, mais l'exigence de liberté de mouvement associée aux variabilités attendues en forme, position, état de surface... pousserait plutôt à élargir ce jeu fonctionnel. Le jeu cible serait donc celui qui donne le meilleur compromis entre toutes ces contraintes.

Pour limiter la variabilité de production, il est d'usage dans le monde industriel de tolérer les caractéristiques élémentaires par un intervalle dans lequel doit se situer la caractéristique (Figure 1). Cette pratique étant tellement ancrée dans les habitudes, il ne vient à personne l'idée de la remettre en cause. Une tolérance s'exprime par un intervalle [Min, Max] ; c'est simple, les normes sont écrites sur cette hypothèse et on ne voit pas pourquoi on remettrait en cause cette si bonne habitude. Et pourtant, après plusieurs années passées à tenter de maîtriser la variabilité dans les ateliers de production de

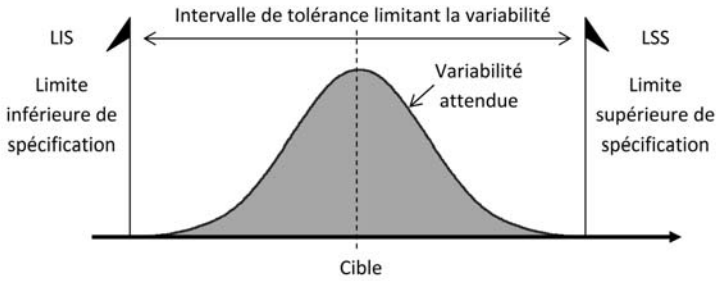


Figure 1 – Le tolérancement traditionnel

très nombreux secteurs industriels, j'ai acquis la conviction profonde que cette pratique de l'intervalle de tolérance était contraire au but recherché de réduction de la variabilité.

Nous aurons à revenir à plusieurs reprises sur ce point dans cet ouvrage, mais auparavant prenons un peu de recul et regardons de façon macroscopique (ou provocatrice diront certains) les pratiques de chacun. Le concepteur de bureau d'études qui, toute la semaine, n'imagine pas pouvoir mettre une cote sur un plan sans lui adjoindre une tolérance, a pourtant un tout autre comportement le week-end. En effet, s'il doit réaliser des étagères pour son appartement, il va mesurer l'emplacement (par exemple 20 x 120) et noter les cotes sur un papier avant d'aller au magasin de bricolage se faire découper une planche aux bonnes dimensions. Sur son papier, notre concepteur a écrit 20 x 120 ; il a précisé les cotes cibles mais ne se sent pas l'obligation de tolérer les cotes. Ce n'est pas pour autant que le magasin de bricolage va réaliser n'importe quoi. Le vendeur va scier la planche en réglant la machine au mieux de la cible, et notre concepteur sera satisfait. Mais le lundi matin, notre concepteur reprendra vite ses habitudes, pour à nouveau tolérer toutes les caractéristiques ! Pourquoi ce qui marche avec le magasin de bricolage ne pourrait pas marcher dans l'industrie ?

Certes l'exemple est caricatural, il n'empêche que de nombreuses professions ont travaillé sans tolérance. De même, les entreprises asiatiques, japonaises notamment, n'ont pas de problème à avoir une caractéristique non tolérancée. Ce n'est toutefois pas parce la cote n'est pas tolérancée que l'on va faire n'importe quoi. On va rechercher à viser la cible, et l'ensemble de la production aura une variabi-



lité centrée autour de cette valeur cible. Si la variabilité du processus est faible par rapport à ce que l'on peut accepter, pourquoi donc se « casser la tête » à mettre une tolérance ?

Avant d'aller plus loin, il est utile de rappeler l'histoire de la maîtrise de la variabilité pour l'interchangeabilité qui a été relatée par Jean-Louis Paucelle (Peaucelle 2005). L'idée a commencé à germer dans l'esprit d'un Français au début du XVII<sup>e</sup> siècle pour la fabrication des fusils. L'objectif était alors d'être capable de changer une pièce sans avoir à la retoucher à la lime ou, encore mieux, d'assembler les différentes pièces d'une platine de fusil sans avoir à l'ajuster. Après plusieurs tentatives avortées en France, il a fallu attendre la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, avec la mécanisation des machines-outils, pour arriver à produire le premier lot de fusils selon le principe d'interchangeabilité... mais ce fut aux États-Unis que cette expérience réussie fut lancée à grande échelle. Cette idée a été introduite en Europe au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, et le standard du tolérancement par intervalle [Min Max] s'est alors imposé pour être normalisé dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

L'idée du tolérancement par zone [Min, Max] a donc abouti grâce aux avancées technologiques des machines-outils et des moyens de contrôle. En effet, si l'idée était bien là, les moyens pour la réaliser étaient insuffisamment développés. Aujourd'hui, c'est l'inverse qui se passe : les moyens ont considérablement évolué mais ce sont les méthodes qui restent identiques !

Voilà donc près de deux siècles que le tolérancement par intervalle associé à une normalisation adaptée a apporté une avancée significative dans la qualité des produits et la maîtrise de la variabilité. Est-ce pour autant que nous avons là l'approche idéale ?

Notre conviction est, au contraire, que si ce système de tolérancement a été une étape dans la vie industrielle, il introduit aujourd'hui un certain nombre de biais et d'incohérences qui nous empêchent de faire le saut vers la qualité du XXI<sup>e</sup> siècle. Il est temps de faire évoluer cette notion, pour permettre une nouvelle avancée significative dans la qualité des produits. Le tolérancement inertiel a cette ambition d'introduire un nouveau paradigme du tolérancement. L'objectif n'est plus de placer les caractéristiques dans un intervalle, mais de limiter la variabilité autour de la cible. On ne se pose plus cette question : cette caractéristique est-elle bonne ? On se pose celle-ci : cette caracté-

téristique me permet-elle de satisfaire le client qui va utiliser le produit réalisé avec cette pièce ?

La différence de point de vue entre le tolérancement inertiel et le tolérancement par zone est fondamentale. Si on s'intéresse au produit final, cela implique de considérer la combinatoire des caractéristiques entre elles. Il faut donc un raisonnement statistique. On sait que deux éléments s'additionnent dans une relation linéaire ; ce sont les moyennes des distributions et les variances. Jamais les proportions de non-conformes ne s'additionnent et pourtant, aujourd'hui, ce sont sur ces proportions de non-conformes que l'on porte toute notre attention.

### L'objectif Six Sigma

La complexification croissante des produits industriels, alliée à une exigence de qualité toujours plus importante des consommateurs, a été de pair avec l'accroissement des exigences de capabilité.

L'approche Six Sigma<sup>1</sup> est, sans aucun doute, la démarche la plus aboutie pour réduire la variabilité des processus. Son objectif est d'atteindre SUR LE PRODUIT LIVRÉ AU CLIENT un niveau de qualité tel que le taux de défaillance soit de moins de 3,4 produits défectueux par million. Cet objectif a été très mal compris par la majorité des entreprises, même expertes en Six Sigma, qui pensent qu'il suffit de décliner ce même objectif sur toutes les caractéristiques pour atteindre ce résultat. C'est faux, inutile ou insuffisant dans la plupart des cas. Les proportions de produits hors spécification ne se combinent pas. La seule façon d'atteindre l'objectif Six Sigma est de travailler sur la variabilité des processus, et nous verrons dans cet ouvrage que ce n'est pas la même chose que mettre toutes les spécifications à un niveau Six Sigma.

Si une entreprise se satisfait du simple respect des tolérances pour assurer la qualité des produits livrés à ses clients à un niveau de Six Sigma, la seule solution pour elle consiste à se placer dans le pire des cas. Les coûts de production sont tellement importants que :

- soit cette entreprise a sans doute de grandes difficultés à maîtriser ses coûts ;

1. Le lecteur pourra se reporter à mon ouvrage *Six Sigma. Comment l'appliquer*, Éditions d'Organisation, 2003.

- soit elle est partie dans un soi-disant *eldorado* de la délocalisation où elle peut faire du contrôle à bas coût, mais comme le contrôle ne garantit pas la qualité son avenir n'est pas assuré...
- soit elle est dans un secteur où les marges sont importantes. En travaillant de la sorte, elle se prive d'innovations dans la conception de ces produits qui lui semblent irréalisables tant les tolérances sont serrées avec le mode de calcul qu'elle utilise. Et demain, elle sera donc dépassée par ses concurrents.

Beaucoup d'entreprises ont compris que mettre des spécifications au pire des cas était une situation intenable, et élargissent de ce fait les tolérances soit par calcul, soit par empirisme... Et là, on ne sait plus trop ce que l'on fait. Notre tradition de compter les proportions hors tolérances nous amène à penser que l'assemblage et la combinaison de produits conformes conduiront à un produit final conforme, mais ce n'est plus vrai dans ces conditions. Il faut bien se rendre à l'évidence : on ne sait pas prévoir la proportion de produits non conformes livrés aux clients à partir des proportions de caractéristiques élémentaires non conformes.

Faut-il faire du Six Sigma dans ces conditions, puisque l'objectif de 3,4 produits par million sur une caractéristique élémentaire n'a pas de sens ? Bien sûr, mais pas avec cet objectif sur la caractéristique élémentaire. Le Six Sigma porte uniquement sur la caractéristique vendue au client final. Il a pour aboutissement la réduction de la variabilité sur les caractéristiques élémentaires pour atteindre cet objectif sur le produit livré au client.

Mais alors, quel doit être l'objectif sur ces caractéristiques élémentaires ? C'est tout le problème actuel, et c'est aussi l'objet de ce livre. Le tolérancement inertiel permet d'avoir une cohérence sur l'ensemble de la chaîne logistique, sur l'ensemble des caractéristiques pour donner un objectif mesurable à chaque maillon de cette chaîne afin de garantir l'objectif Six Sigma sur le produit final. On ne sait pas combiner des proportions hors tolérances mais on sait combiner des inerties pour atteindre l'objectif fixé. Nous montrerons dans cet ouvrage que l'on sait calculer l'inertie maximale à respecter sur chaque caractéristique pour garantir un objectif en pour-cent, en pièce par million, en pièce par milliard... sur l'exigence fonctionnelle.

On peut enfin connaître le juste nécessaire au niveau de chaque caractéristique, et ainsi imaginer des produits, des fonctions que l'on ne pensait pas pouvoir fabriquer. « Fabriquer », le mot est important ; en effet, un tolérancement n'a de sens que s'il donne lieu à un objet fabriqué ! Lorsqu'on voit la complexité croissante de l'expression des tolérances sur un plan mécanique, on se pose la question de la relation entre ces spécifications et les problèmes de fabrication. Nous pensons que le tolérancement ne doit pas se contenter de définir une conformité ; il doit être aussi en cohérence avec les moyens mis en œuvre pour satisfaire cette spécification.

Ainsi, le tolérancement inertiel qui est présenté ici a l'ambition de réconcilier la production avec les spécifications. Et nous aborderons autant les problèmes de spécification que les problèmes de production. Le tolérancement inertiel dit ce que doit être la conformité ; la maîtrise inertielle des processus dit comment y parvenir. Les deux approches sont totalement combinées et cohérentes.

Cet ouvrage présente dans un premier chapitre ce que nous avons appelé « les trois incohérences majeures du tolérancement par intervalle ». La comparaison avec le tolérancement inertiel montre bien comment on peut corriger ces incohérences.

Le deuxième chapitre expose en détail le tolérancement inertiel : sa représentation, les indicateurs de capacité qui sont associés et la notion de conformité qui se rapporte à ce nouveau type de tolérancement.

Le troisième chapitre explique comment calculer une tolérance inertielle sur une caractéristique élémentaire pour garantir la conformité d'une exigence fonctionnelle.

L'ouvrage traite ensuite des aspects de production associés au tolérancement inertiel au travers de la maîtrise inertielle des processus. Finalement, ce qui fait la qualité des produits, c'est d'abord la maîtrise de la variabilité. Il est donc tout à fait possible d'appliquer les concepts de maîtrise inertielle des processus même si les plans sont, à l'origine, en tolérancement traditionnel.

Le quatrième chapitre aborde les concepts de pilotage inertiel en proposant de nouvelles cartes de contrôle qui permettent de garantir l'inertie d'une caractéristique. Les principes qui y sont développés

doivent être utilisés en tolérancement inertiel bien sûr, mais également dans tous les cas où un tolérancement statistique est utilisé pour garantir l'hypothèse de centrage sur la cible.

Le cinquième chapitre présente le concept de tolérancement inertiel multicritère. Pour viser la cible sur un ensemble de caractéristiques d'un produit, il ne faut pas piloter individuellement chaque caractéristique mais les piloter globalement. Nous proposons une nouvelle façon de faire de la Maîtrise inertielle des processus multicritères.

Le sixième chapitre est une projection vers le futur du tolérancement inertiel. Nous exposons le concept de tolérancement inertiel total, qui est une vraie rupture dans la conception du tolérancement d'une pièce mécanique. Nous montrons comment, avec ce concept, on peut considérablement simplifier la façon de tolérer des pièces complexes en 3D. Enfin, nous abordons le pilotage inertiel total qui permet de piloter dans les trois dimensions les productions de pièces extrêmement complexes avec une facilité déroutante.

Le septième chapitre s'intéressera à la maîtrise des processus de mesure en tolérancement inertiel.

Le huitième chapitre, enfin, s'occupera de la validation d'un processus en mesure inertiel.



# Chapitre 1

## Du tolérancement traditionnel au tolérancement inertiel

### 1. LES TROIS INCOHÉRENCES DU TOLÉRANCEMENT TRADITIONNEL

Nous utilisons le système de tolérancement par intervalle depuis tant de temps que nous nous sommes habitués à vivre avec un certain nombre d'incohérences. Celles-ci sont si importantes qu'on peut se demander pourquoi elles ne sont pas plus dénoncées. Nous avons identifié trois incohérences majeures :

- une incohérence fonctionnelle ;
- une incohérence de conformité ;
- une incohérence économique.

Une fois ces incohérences révélées, le système de tolérancement classique montre ses limites. C'est parce que le système actuel est incohérent qu'il faut le faire évoluer !

#### 1.1. Incohérence fonctionnelle

Dans le cas général du tolérancement d'un assemblage, le problème consiste à déterminer les tolérances sur les caractéristiques élémentaires  $X_i$  pour obtenir une caractéristique finale  $Y$  satisfaisant le besoin des clients. Les deux approches les plus classiques actuelles sont les approches au pire des cas (tolérancement arithmétique) et statistique (tolérancement statistique quadratique). Le lecteur qui désire en connaître davantage sur ces tolérancements peut se reporter aux encadrés 1 et 2 que l'on trouvera respectivement en milieu et en fin de ce chapitre et qui décrivent ces deux approches traditionnelles du tolérancement d'une chaîne fonctionnelle. La norme XP E 04 008-2009 définit ces modes de tolérancement.