

OBJECTIF SMART TOLERANCING

Des méthodes de tolérancement
innovantes et efficaces
pour l'usine du futur



Industrie
4.0



SOMMAIRE

Introduction	p. 3
Tolérancement : un métier en mutation	p. 4
La nécessité de modèles prédictifs	p. 4
Les méthodes classiques d'analyse de tolérance	p. 6
Les méthodes "smart" d'analyse de tolérances	p. 10
Des représentations graphiques pour comparer	p. 15
Enjeux pour le pilotage des procédés	p. 16
Perspectives	p. 19

Références et documents d'intérêt	p. 20
--	-------

Témoignages

Christophe Aufrere
Chief Technology Officer, Group Strategy
(Faurecia)..... p. 21

Pr. Eric Arquis
Président de l'Association Française de Mécanique (AFM)..... p. 22

Laurent Gauvrit
Expert Simulations (Radiall)..... p. 23



Crédit photos : Adobe Stock
Nos remerciements à :
Jean-Marc Judic (Faurecia)
Laurent Leblond (Groupe PSA)
Nicolas Gayton (Ecole SIGMA Clermont)
Jean-Michel Pou (Deltamu)

INTRODUCTION

De l'inévitable besoin de tolérances

Il fut un temps où chaque produit était fabriqué sur mesure, chacun de ses composants étant ajusté pour que l'ensemble soit fonctionnel. Cette époque de la fabrication artisanale unitaire est révolue depuis bien longtemps...

Désormais, ce sont plusieurs usines souvent disséminées sur la planète qui œuvrent à la réalisation d'un produit final qui sera, une fois assemblé, commercialisé en masse. Dans ce cadre-là, pour que l'assemblage soit possible et fonctionnel, il est impératif de spécifier rigoureusement à chacun des fabricants de chacun des composants ce qu'il doit produire pour atteindre l'objectif.

Il serait tentant pour l'homme d'étude d'exiger que toutes les pièces soient réalisées au nominal, semblables à celles représentées sur son écran CAO. Cet homme d'études n'a en effet, de son point de vue, aucune bonne raison d'accepter que les pièces s'éloignent du dessin. Malheureusement, les procédés de fabrication et d'assemblage présentent inéluctablement de la variabilité, variabilité que l'homme de métier cherche à réduire, ou contenir, mais qui demeure en grande partie inhérente aux matières premières utilisées et technologies employées. Les moyens de fabrication sont le lieu de divers aléas, tels des jeux dans les guidages, des déformations sous les efforts mis en œuvre, des vibrations, des usures, des phénomènes thermiques... Il y a ensuite des aléas externes, tels que les variations des conditions climatiques, journalières ou saisonnières, des opérations de maintenance et des réglages plus ou moins opportuns, suite à des mesures plus ou moins justes.

La variabilité des procédés industriels est un fait, une réalité incontournable que les concepteurs doivent aujourd'hui intégrer comme une donnée d'entrée. Pour une technologie donnée, il est de bon augure de contenir cette variabilité, avec des coûts de contrôle et de pilotage associés, mais illusoire de vouloir descendre en dessous d'une certaine limite "technologique".

Les activités de tolérancement

Concevoir un produit industriel, c'est prendre conscience de cette réalité et anticiper les effets de cette variabilité des procédés pour assurer que les produits qui sortiront de l'usine d'assemblage offrent les performances attendues.

C'est ainsi que sont nées diverses activités que l'on regroupe sous le nom de "Tolérancement", organisées en amont de la fabrication, pour concevoir des produits aptes à accepter une variabilité "tolérée" des procédés tout en offrant le fonctionnement produit fini avec les performances attendues.

Trop souvent, on réduit ces activités de tolérancement à celle de "faire les chaînes de cotes" ou spécifier des tolérances géométriques sur les plans de définition... Trouver alors des candidats compétents et motivés pour ce genre d'activité devient difficile. Le champ d'action du tolérancement est en réalité beaucoup plus large, et réclame à la fois des compétences "Produit" et "Process" pour tisser un lien fonctionnel entre les attentes du client et les procédés des usines qui produisent les composants. Les spécialistes du tolérancement sont en réalité les tenants d'un métier essentiel : le Génie Industriel, et ce métier est un lieu d'innovations pouvant apporter des briques essentielles à l'industrie du futur.

“

Objectif : intégrer le plus tôt possible la vérité des procédés dans le processus de développement des produits.

”

LE TOLERANCEMENT : UN METIER EN MUTATION

Hier, les temps de développement étaient suffisamment longs, permettant d'entrevoir dans un premier temps une conception appelée "Produit", qui une fois validée permettait d'enclencher l'industrialisation : la conception des moyens de fabrication et le lancement de préséries.

Dans cette perspective, le bureau d'études Produit émettait des plans de définition destinés à spécifier le besoin au niveau des composants. Les services Méthodes se chargeaient alors de penser les procédés de fabrication pour satisfaire ce besoin. Des "chaines de cotes transferts" étaient réalisées pour démontrer que le procédé de fabrication retenu était en mesure de satisfaire le besoin fonctionnel et des plans de fabrication étaient alors émis.

La justification que le besoin spécifié par le bureau d'études était bien nécessaire et suffisant pour satisfaire l'exigence amont du client était le plus souvent inaccessible aux équipes d'industrialisation. Le bureau d'études se comportait généralement comme "le client" des équipes d'industrialisation, et pour se protéger d'aléas imprévus, pouvait très bien "prendre de la marge", en resserrant plus que nécessaire les tolérances, et "sécuriser" ainsi le résultat. Habitué à cette pratique, les services méthodes et d'industrialisations ne manquaient pas de venir négocier des élargissements de tolérances lorsque les capacités requises n'étaient pas au rendez-vous. Les discussions sur les tolérances entre bureau d'études et bureau des Méthodes étaient plus de la négociation que de l'ingénierie produit-process.

Désormais, sous la pression d'une concurrence mondialisée, où l'innovation peut venir de toute part pour bousculer les forces en place, le renouvellement des produits a été accéléré pour pouvoir se repositionner sans cesse dans la course, et les temps de développement doivent être réduits. Les schémas de développement d'hier sont caducs. Il faut identifier en amont les procédés de fabrication pertinents, à la hauteur des enjeux en termes de qualité et de coûts et mobilisables à temps pour être au rendez-vous. Il faut ensuite penser les produits en conséquence. Les coûts et temps de cycles deviennent des données d'entrée du design. Aux oubliettes les plans de fabrication, les plans qui sortent du bureau d'études vont directement dans l'usine et chez les fournisseurs. **La conception intégrée Produit-Process évoquée depuis si longtemps doit par la force des choses devenir réalité.**

Ne pas changer de façon de gérer les problèmes de tolérances, et laisser le bureau d'études "serrer ses tolérances" pour passer ses chaines de cotes au vert, c'est inévitablement prendre le risque de découvrir en phase de lancement des préséries que les procédés retenus ne sont pas capables. Il est alors trop tard pour réagir. On bascule alors dans un schéma de crise, avec dans le meilleur des cas, des murs de qualité et des rebuts rédhitoires, et dans le pire des scénarios, des retours de garantie, des clients mécontents, des rappels de parc... Dans tous les cas, l'erreur se paie cash avec des conséquences potentiellement catastrophiques en termes d'image.

Il devient aujourd'hui stratégique, d'intégrer le plus tôt possible la vérité des procédés dans le processus de développement produit-process.

LA NECESSITE DE MODELES PREDICTIFS

Un travail en amont doit être fait pour traduire les attentes ou exigences du client en exigences fonctionnelles, comprenant à la fois les "critères de performances", correspondant à ce que le client veut, et les conditions de fonctionnement en rapport avec les "modes de défaillance" identifiés en AMDEC : ce que le client ne veut pas. Ce travail d'identification des exigences et des défaillances potentielles est une tâche essentielle si l'on souhaite anticiper et prévenir des problèmes plutôt que de les subir.

“

Dans tous les cas,
l'erreur se paie cash
avec des
conséquences
potentiellement
catastrophiques.

”

Des équipes doivent être formées et mobilisées pour réaliser ce travail de manière méthodique et efficace.

Nous appellerons Y ces exigences en relation avec la satisfaction du client. Ils répondent à une définition simple : une non-conformité est un défaut pour le client. Les Y sont relatifs à des effets perçus par le client.

Nous appellerons ensuite X tous les paramètres influents, relatifs à des caractéristiques des composants ou d'éléments du procédé de fabrication. Les X sont des paramètres dont les valeurs cibles doivent être définies avec soin pour atteindre les performances attendues sur les Y, et dont les variations autour de cette cible doivent être contenues pour maîtriser la variabilité résultante sur les Y. Les X sont des causes, parfois appelés contributeurs.

La question clef qui se pose en tolérancement est celle de comprendre comment la variabilité des X se propage pour fabriquer celle sur les Y qui sera perçue par les clients. Il est alors essentiel de clarifier la relation cause-effet : $Y=F(X)$. La construction de ses modèles peut être entrevue de manière théorique, avec des modèles pouvant même préexister à la conception (Model Based Design), ou de manière expérimentale, basée sur des essais ou des plans d'expériences.

La nature de cette fonction dépend des phénomènes mis en jeu lors du fonctionnement et/ou la fabrication du produit. Lorsque les aspects géométriques priment sur d'autres phénomènes physiques, ces relations $Y=F(X)$ sont souvent appelés "chaines de cotes", mais il est en réalité bien rare que les performances attendues d'un produit soient de nature purement géométrique, et il est plus fréquent de rencontrer des exigences de puissance, de force, de vitesse, de masse ou de résistance. Pour ce qui concerne les modes de défaillance et les paramètres influents, les choses sont souvent encore plus complexes, généralement multi-physiques : il n'est pas rare de voir coexister et même interagir des phénomènes mécaniques, thermiques, électromagnétiques... A titre d'exemple, un simple axe d'une liaison pivot réclame la correcte polarisation du contact dans la direction de l'effort qu'il subit, ce qui suppose un modèle mécanique.

Ce sont donc les phénomènes physiques mis en jeu qui déterminent la nature du modèle qu'il faut construire pour établir la relation $Y=F(X)$. Une approche scientifique du tolérancement réclame donc un effort de modélisation pour identifier ces relations.

Il n'y a en réalité pas de frontière nette entre le domaine de la Fiabilité et celui du Tolérancement, la nuance repose principalement sur la nécessité pour le Fiabiliste de prendre le plus souvent en compte la variabilité des éléments extérieurs, sur lesquels le concepteur ne peut généralement rien, alors que le spécialiste du tolérancement se concentre sur la tâche de spécification des caractéristiques internes (les composants) sur lesquels une action de réduction ou de maîtrise de la variabilité est possible, et potentiellement nécessaire.

Ceci nous amène à distinguer deux types de X :

- Ceux sur lesquels on ne peut pas agir, et dont les variations sont subies
- Ceux sur lesquels on peut agir, par le biais de spécifications permettant d'ajuster la valeur cible et de contraindre la variabilité autour de cette cible.

Lorsque les paramètres X influents se trouvent contraints par la spécification de tolérances restreintes, l'approximation au premier ordre du modèle $Y=F(X)$ est alors souvent "raisonnable" et permet de prendre en compte l'essentiel. Ainsi, le plus souvent, pour traiter des problèmes d'analyse de tolérancement, on manipulera des modèles "linéarisés" de type :

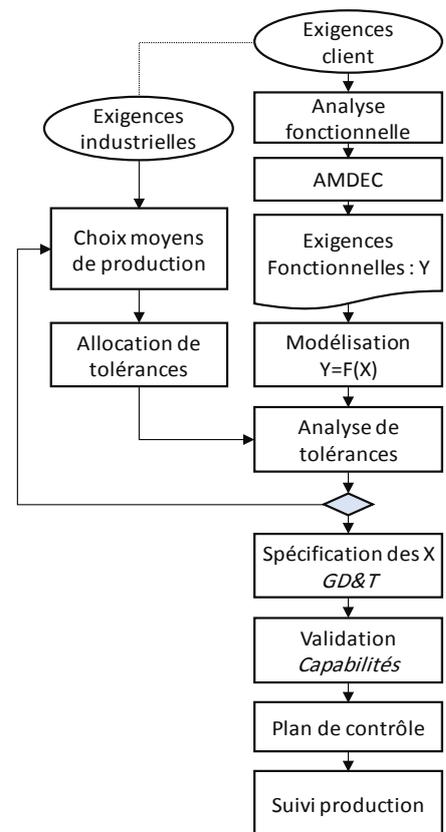


Figure 1 - Les Activités de Tolérancement, du cahier des charges à la production

$$\bar{Y} = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cdot X_i$$

N est le nombre de paramètres influents, et les coefficients a_i sont appelés "sensibilités"¹.

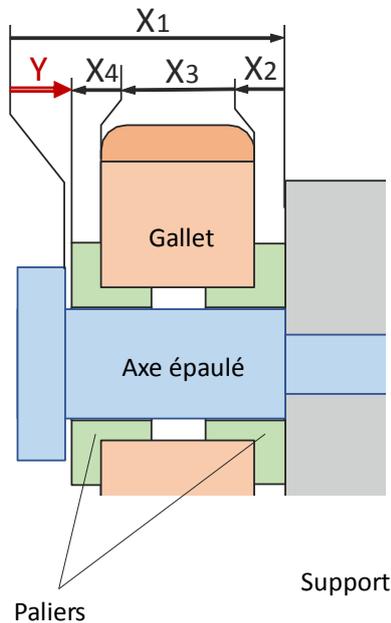


Figure 2 - Exemple "Fil rouge"
Cas d'un axe épaulé devant maintenir un galet et en permettre la rotation

Sur la figure 2 ci-contre, on trouve un exemple de chaîne de cote dite 1D. Le critère Y que nous proposons de considérer est le jeu sous tête de cette vis épaulée devant maintenir un galet centré sur deux paliers. On a, de manière évidente :

$$Y = X_1 - X_2 - X_3 - X_4$$

Ce jeu doit être positif pour permettre la mobilité en rotation du galet, mais doit aussi être contenu pour assurer un guidage précis. Ce sera l'exemple "fil rouge" utilisé par la suite.

Dans de nombreux cas qui semblent au départ plus complexes, et à juste titre qualifiés de "non linéaires", on considère trop rapidement que les techniques de calcul de tolérances du bureau d'études ne sont pas appropriées. Non-linéaire, ne veut pourtant pas dire "non linéarisable" pour l'analyse des variations. Il faut certes consentir un effort préalable pour obtenir l'approximation linéaire puis en vérifier la validité (part de variance expliquée), mais cet effort est vite rentabilisé.

Le chapitre suivant présente les différentes méthodes disponibles pour l'analyse et l'allocation des tolérances sur les paramètres X, composants ou process.

LES METHODES CLASSIQUES D'ANALYSE DE TOLERANCES

L'objectif : le nécessaire et le suffisant

Par souci d'efficacité économique, la qualité d'une pièce devrait être jugée par rapport à l'usage qui en sera fait, en tant que composant du produit livré, et non pas par rapport à un plan de définition qui peut contenir des exigences inutiles.

C'est l'occasion de préciser quelques définitions essentielles :

- Pièce conforme : pièce satisfaisant toutes ses spécifications (qu'elles soient suffisantes ou pas). Elle est acceptée par le contrôle.
- Pièce non conforme : pièce ne satisfaisant pas toutes ses spécifications, (qu'elles soient nécessaires ou pas). Elle est refusée par le contrôle.
- Pièce bonne (apte à l'emploi) : pièce-conforme ou non-permettant de satisfaire les exigences du client.
- Pièce mauvaise (inapte à l'emploi) : pièce-conforme ou non-ne permettant pas de satisfaire les exigences du client.

¹ Les sensibilités peuvent être déterminées de manière locale, par développement limité au 1er ordre en évaluant des dérivées partielles au point nominal par différences finies, mais l'usage d'une méthode globale, par ajustement sur un ensemble de points dans le domaine d'étude est préférable car elle permet d'évaluer l'erreur de linéarisation.

La recherche de l'efficacité conduit à produire un maximum de pièces bonnes (aptées à l'emploi), ce qui explique le nombre de demandes de dérogation en cas de non-conformité(s). Le travail de tolérancement et de spécification a ainsi un double objectif :

Objectif 1 : chercher à définir **"le juste suffisant"** pour rejeter efficacement les pièces mauvaises (inaptées à l'emploi) et que les pièces acceptées fonctionnent.

Objectif 2 : déterminer **"le juste nécessaire"** pour ne pas refuser de pièces bonnes (aptées à l'emploi).

Analysons dans cette optique les deux méthodes les plus utilisées dans l'industrie, le **tolérancement arithmétique** ou "au pire des cas", et le **tolérancement statistique quadratique**.

Le tolérancement arithmétique ou "pire des cas"

C'est la méthode la plus ancienne et sans doute encore la plus utilisée. C'est en effet la plus simple et les calculs peuvent souvent être faits "à la main".

Le tolérancement arithmétique s'appuie sur la formulation classique des spécifications sur les contributeurs X_i par des intervalles définissant la plage des caractéristiques individuelles dites conformes (pièces considérées unitairement), à l'aide généralement d'un nominal, d'une tolérance supérieure et d'une tolérance inférieure. Le critère résultant Y, quant à lui, est supposé être spécifié par ses bornes mini et maxi L_Y et U_Y (ou parfois une seule).

Pour conduire les calculs efficacement, il faut tout d'abord centrer les spécifications des contributeurs : $X_i \rightarrow V_{C_i} \pm \frac{IT_i}{2}$

Le calcul de la valeur cible et de la tolérance résultantes sur le Y sont alors simples :

$$V_{C_{Y,R}} = a_0 + \sum a_i \cdot V_{C_i} \quad \text{et} \quad IT_{Y,R} = \sum |a_i| \cdot IT_i$$

Mais vérifier que la largeur de l'intervalle résultant $IT_{Y,R}$ est bien inférieure ou égale à l'intervalle spécifié $IT_{Y,S}$ ne suffit pas. Pour assurer que les cibles et les tolérances sont convenablement allouées sur les X, il faut vérifier deux conditions :

$$\text{Condition 1 : } L_{Y,R} = V_{C_{Y,R}} - \frac{IT_{Y,R}}{2} \geq L_{Y,S}$$

$$\text{Condition 2 : } U_{Y,R} = V_{C_{Y,R}} + \frac{IT_{Y,R}}{2} \leq U_{Y,S}$$

Cette méthode est séduisante au premier abord car elle ne requiert aucune donnée statistique sur les composants, et ne fait aucune autre hypothèse que la conformité des composants pour assurer la conformité du critère résultant : **si les composants sont dans leurs tolérances, alors le résultat sera dans sa tolérance**. L'objectif n°1 est donc parfaitement rempli.

Deux remarques s'imposent cependant :

- Lorsque l'une des conditions précédentes n'est pas satisfaite, cette méthode n'offre aucun moyen pour estimer le risque pour le client. Il faut irrémédiablement ajuster les cibles, resserrer les tolérances.
- Cette méthode impose des tolérances restreintes sur les composants, avec des tolérances allouées inversement proportionnelles au nombre de contributeurs, et pour conséquence des mises au rebut très souvent inutiles.

Cette méthode est incapable d'évaluer le risque qu'elle s'évertue à éradiquer, et se fait

NOTATIONS :

Pour une exigence Y :

$L_{Y,S}$:	limite inférieure de spécification
$CpkL_{Y,S}$:	indice de capabilité inférieur spécifié
$U_{Y,S}$:	Limite supérieure de spécification
$CpkU_{Y,S}$:	indice de capabilité supérieur spécifié
$IT_{Y,S}$:	intervalle de tolérance spécifié
	$IT_{Y,S} = U_{Y,S} - L_{Y,S}$
$L_{Y,R}$:	limite inférieure résultante
$CpkL_{Y,R}$:	indice de capabilité inférieur résultant
$U_{Y,R}$:	limite supérieure de résultante
$CpkU_{Y,R}$:	indice de capabilité supérieur résultant
$IT_{Y,R}$:	intervalle de tolérance résultant
	$IT_{Y,R} = U_{Y,R} - L_{Y,R}$

Pour un paramètre X :

V_n :	valeur nominale, c'est la valeur de référence indiquée dans la spécification
T_L :	tolérance inférieure (écart toléré au nominal)
T_U :	tolérance supérieure
V_C :	valeur centrale
	$V_C = V_N + (T_L + T_U)/2$
IT :	intervalle de tolérance spécifié
	$IT = T_U - T_L$
μ :	moyenne du processus (d'une population)
δ :	écart entre la moyenne μ et la cible V_C
σ :	écart-type du processus (d'une population)
I :	inertie du processus (d'une population)

Les indices de Capabilité ont été inventés pour mesurer la capacité d'un processus à produire des produits qui satisfassent leurs spécifications.

Les normes ISO 22514 décrivent de façon détaillée comment se calculent ces indices, pour des distributions normales ou non, en articulant la distinction entre des indices de "capabilité" Cp, CpkL, CpkU, Cpk lorsque la stabilité du processus a été démontrée, et des indices de "performance" Pp, PpkL, PpkU, Ppk, lorsque cette stabilité n'est pas démontrée ou n'est pas acquise.

Pour simplifier notre présentation ici, nous nous placerons dans la situation où la stabilité est démontrée, ce qui permet alors au processus d'être prédictible, condition importante pour qu'un indice ait une utilité.

On note :

Cp = indice de potentiel d'aptitude

CpkL = indice de capabilité inférieure

CpkU = indice de capabilité supérieure

Cpk = indice de capabilité minimal

$X_{0.135\%}$ = quantile 0.135% de la distribution de la variable étudiée (pouvant aussi être un Y)

$X_{50\%}$ = quantile 50% ou médiane de la distribution

$X_{99.865\%}$ = quantile 99.865% de la distribution

Les formules selon la norme sont :

Indice	Distribution quelconque	Distribution normale
Cp	$\frac{U - L}{X_{99.865\%} - X_{0.135\%}}$	$\frac{U - L}{6 \cdot \sigma}$
CpkL	$\frac{X_{50\%} - L}{X_{50\%} - X_{0.135\%}}$	$\frac{\mu - L}{3 \cdot \sigma}$
CpkU	$\frac{U - X_{50\%}}{X_{99.865\%} - X_{50\%}}$	$\frac{U - \mu}{3 \cdot \sigma}$
Cpk	Min(CpkL, CpkU)	

Par construction, quel que soit le type de distribution considéré, un CpkL, ou un CpkU, de 1 correspond à un taux de non-conformité de 1350ppm par rapport à la limite de spécification L, ou U, associée.

Un Cpk de 1 signifie un taux de non-conformité pouvant aller de 1350ppm pour un processus très décentré et 2700ppm pour un processus parfaitement centré.

Un Cp de 2 correspond à un procédé dont la dispersion ($D = X_{99.865\%} - X_{0.135\%}$) est égale à la moitié de l'intervalle de tolérance spécifié.

peur avec des événements si peu probables que le prix à payer est déraisonnable. En effet, si un paramètre X franchit son seuil de conformité, le risque pour l'assemblage (le Y) ne passe pas de 0% à 100% de manière brutale. Une incursion d'un paramètre X dans la tolérance cumulée des autres X crée un risque, certes, mais celui-ci est potentiellement très faible lorsque les "autres" paramètres sont nombreux, ou que la tolérance cumulée des "autres" est large.

C'est ce que nous allons illustrer dans notre exemple fil rouge. Nous avons identifié les paramètres influents et la fonction $Y = F(X) : Y = X_1 - X_2 - X_3 - X_4$

Supposons que les limites spécifiées soient

- Limite inférieure $L_{Y,S} = 0$: pour assurer la mobilité rotation du galet
- Limite supérieure $U_{Y,S} = 0.8$: pour limiter le jeu axial

Pour pouvoir allouer les tolérances les plus larges, les valeurs nominales doivent être optimisées pour viser la valeur centrale $(L_{Y,S} + U_{Y,S})/2 = 0.4mm$

Par exemple : $X_1=60.4, X_2=8, X_3=44, X_4=8$

Si on répartit également les tolérances sur les 4 contributeurs on obtient :

$$IT_X = \frac{IT_{Y,S}}{N} = \frac{0.8}{4} = 0.2$$

On remarque que le calcul arithmétique ne fait pas intervenir les indices de capabilité requis sur le critère Y (voir encadré). Il est pourtant usuel d'exiger sur les X le même niveau de capabilité que celui attendu sur le Y. On démontre en effet que le Cpk sur le critère résultant Y est, dans la pire des combinaisons, égal au Cpk le plus faible observé sur les paramètres X. Cette pire combinaison est obtenue lorsque (N-1) paramètres sont simultanément en limite de conformité et dans un sens défavorable, pour former ensemble un Go, ou un NoGo, pour le dernier paramètre, et en révéler ainsi les non-conformes. La décision de cascader sur les X l'exigence de capabilité du Y, qui découle de cette crainte, conduit cependant à des rejets déraisonnables.

Pour illustrer ce propos, reprenons notre exemple fil rouge en analysant une configuration de non-conformité d'un composant de nature à "stopper" la production. Considérons pour cela une situation où 3 composants sont décentrés de manière défavorable tout en restant conformes, (et capables) et où le dernier est totalement hors tolérance, avec un Cpk de -1, soit à peine plus d'une pièce sur mille dans la tolérance... Qui ne bloquerait pas la production dans un tel cas ?

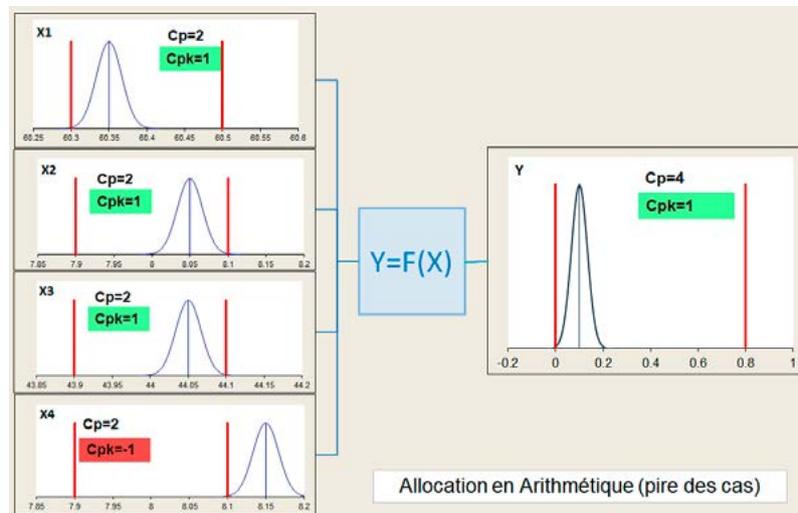


Figure 3 – Exemple de situation révélant le caractère trop restrictif du tolérancement arithmétique

Et pourtant, ça marche ! Le galet tourne. Un responsable de production d'expérience pourrait dire à son équipe : "On prend 30 pièces et on fait un montage à blanc. Si ça marche, on produit, et on demande une dérogation..."

On constate ici que le **tolérancement au pire des cas est très loin de satisfaire l'objectif n°2 du tolérancement** : "déterminer le juste nécessaire pour ne pas refuser de pièces bonnes (aptés à l'emploi)". C'est vraisemblablement la raison qui justifie le très grand nombre de demandes de dérogation que les bureaux d'études reçoivent des usines. Une question alors se pose : **comment faire pour que la décision "de déroger" ne soit pas une prise de risque déraisonnable, mais le résultat d'une réelle approche scientifique où les risques sont évalués ?**

La réponse est simple. Il faut faire des statistiques en prenant des mesures sur les composants dans les bacs, et refaire les calculs relativement simples réalisés pour obtenir la figure ci-dessus. Il est surprenant que le bureau d'études choisisse une méthode de tolérancement pour sa simplicité, car elle ne réclame aucune hypothèse, aucun calcul statistique, et que dans l'usine, pour se tirer des ornières que cette méthode exacerbe, les équipes de production doivent faire des statistiques... Ce paradoxe invite à rechercher d'autres pistes.

Le tolérancement Statistique Quadratique

Le tolérancement statistique Quadratique, appelé RSS dans les pays de langue anglo-saxonne (pour Root Sum Squares) repose sur l'idée simple que, dans le cas de paramètres indépendants, (ce que l'on est en droit de supposer lorsque les composants sont réalisés avec des moyens différents), ce ne sont pas les "étendues" qu'il convient d'additionner mais les "variances".

On obtient ainsi, pour notre critère $Y = a_0 + \sum a_i \cdot X_i$, et sous seule hypothèse d'indépendance des X_i : $Var(Y) = \sum a_i^2 \cdot Var(X_i)$. Et par suite :

$$\sigma_{Y,R} = \sqrt{\sum a_i^2 \cdot \sigma_i^2}$$

Cette formule est valable pour tout critère linéarisable sans aucune hypothèse de distribution sur les X_i , seule l'indépendance est exigée. Il faut par contre introduire plusieurs hypothèses de validité plus incertaine pour obtenir la formule, pourtant populaire, faisant intervenir les intervalles de tolérances :

$$IT_{Y,R} = \sqrt{\sum a_i^2 \cdot IT_i^2}$$

Pour être valide, cette formule exige en effet (en plus de l'indépendance des X_i) :

- que les paramètres X_i **soient tous centrés** sur leurs cibles respectives, et que ces cibles soient optimisées pour obtenir la cible optimale pour le critère Y.
- que les X_i et le Y présentent tous le **même facteur de proportionnalité** entre leur écart-type et leur intervalle de tolérance soit à réaliser $\frac{IT_{Y,R}}{\sigma_{Y,R}} = \frac{IT_i}{\sigma_i}$.

Cette deuxième condition est par exemple respectée quand les distributions sont normales et que les exigences de capabilité sur les X et sur le Y sont identiques.

La popularité du tolérancement quadratique vient du fait qu'il permet d'élargir les tolérances par un facteur \sqrt{N} par rapport au tolérancement arithmétique.

Dans notre exemple fil rouge cette méthode permet de doubler les tolérances dans le cas d'une allocation d'IT identique sur les X_i :

$$\sqrt{\sum a_i^2 \cdot IT_i^2} = \sqrt{N \cdot IT_X^2} = \sqrt{N} \cdot IT_X \quad \text{d'ou} \quad IT_X = \frac{IT_{Y,S}}{\sqrt{N}} = \frac{0.8}{2} = 0.4$$

ELÉMENTS POUR LA MISE EN PRATIQUE DU TOLÉRANCEMENT STATISTIQUE QUADRATIQUE EN ANALYSE DE TOLÉRANCES.

Etape 1 : détermination des écarts-types maximaux des X_i et des moyennes associées

Pour chaque X_i , en fonction de l'IT alloué X_i , de la distribution supposée et de l'indice de capabilité requis (qui peut être différents sur les différents X_i), on détermine un coefficient k_i représentant le nombre d'écart-types maximum compris dans l'intervalle de tolérance IT_i (situation acceptable lorsque la distribution est centrée sur sa cible optimale)

$$\sigma_{i,max} = \frac{IT_i}{k_i}$$

Rem : Dans le cas d'une distribution normale, on a bien sûr $k_i = 6 \cdot Cpk_{i,spec}$ et $\mu_i = VC_i$

Etape 2 : détermination de l'écart-type maximal pour le critère résultant Y

$$\sigma_{Y,max,R} = \sqrt{\sum a_i^2 \cdot \sigma_{i,max}^2}$$

Etape 3 : calcul de cible résultante

$$VC_{Y,R} = a_0 + \sum a_i \cdot VC_i$$

Etape 4 : vérification des 2 conditions

Condition 1 :

$$VC_{Y,R} - 3 \cdot Cpk_{LY,S} \cdot \sigma_{Y,max,R} \geq L_{Y,S}$$

Condition 2 :

$$VC_{Y,R} + 3 \cdot Cpk_{UY,S} \cdot \sigma_{Y,max,R} \leq U_{Y,S}$$

Rem : les cibles sur les X_i doivent préférablement être optimisées pour obtenir la cible optimale sur Y

$$T_{Y,opt} = \frac{L_{Y,S} \cdot Cpk_{UY,S} + U_{Y,S} \cdot Cpk_{LY,S}}{Cpk_{LY,S} + Cpk_{UY,S}}$$

Lorsque les exigences de capabilité sur le Y sont symétriques, on a évidemment

$$T_{Y,opt} = \frac{L_{Y,S} + U_{Y,S}}{2}$$

Cependant, cette méthode, économiquement intéressante en apparence, **n'est malheureusement fiable que si le centrage parfait du critère résultant est obtenu.** Ceci n'est assuré que si tous les X sont parfaitement centrés, ou si la moyenne de l'un des X peut être ajustée en fonction des moyennes des autres, ce qui est illusoire dans la majorité des contextes industriels actuels.

Le tolérancement statistique quadratique s'appuie donc sur des hypothèses hasardeuses, et se révèle potentiellement très dangereux lorsqu'elles ne sont pas satisfaites [1]. Illustrons ce qui peut se passer dans l'usine avec des paramètres X présentant des Cp de 3 et des Cpk de 1 conformes à l'exigence. Dans cette situation qui généralement n'effraie personne, on obtient sur l'assemblage, un Cpk négatif de -1, soit 99.865% de défaut avec des composants "capables"².

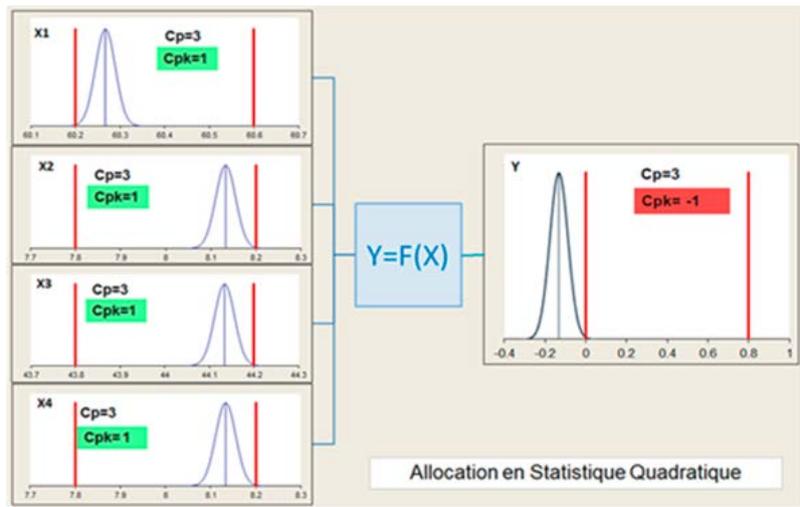


Figure 4 – Exemple de situation catastrophique autorisée par le tolérancement statistique quadratique

Ce résultat démontre que **la méthode Quadratique ne permet pas de satisfaire l'objectif n°1 du tolérancement** : des lots entiers de pièces inaptes à l'emploi mais conformes à l'exigence peuvent être acceptés. Et filtrer les composants en Go/Nogo ne changerait ici rien au problème puisque le taux de non-conformes des composants est de 1/1000 : on ne rejetterait donc qu'une part infime des composants non aptes, sans améliorer notablement le taux de défaut sur l'assemblage.

Le tolérancement Statistique Quadratique ne permet pas de garantir l'exigence de capabilité sur les critères résultants. Cette méthode n'est pas fiable, et doit être proscrite dans toutes les industries où le centrage des composants n'est pas assuré. Mais cela ne signifie pas qu'il faille abandonner les statistiques, car aujourd'hui des méthodes alternatives **efficaces** existent, assurant des exigences suffisantes sur les paramètres pour satisfaire les exigences sur les critères clients, et se rapprochant du juste nécessaire.

LES METHODES "SMART" D'ANALYSE DE TOLERANCES

Partant du constat que ce qui fait faillir le tolérancement statistique quadratique est le décentrage des composants, dès lors que celui-ci n'est ni anticipé, ni contenu, les deux méthodes alternatives présentées ci-après présentent trois points communs essentiels :

- Elles remplacent l'hypothèse de procédés centrés sur les composants par une hypothèse de décentrage potentiel autour d'une cible

² La même situation catastrophique peut être obtenue avec des exigences de capabilité de 1.67 respectées, et des valeurs de Cp de 4.33.

- Elles tirent profit des spécifications de population introduites par la Norme ISO 18391 pour contraindre dispersions et décentrages autour de cette cible.
- Elles permettent de garantir le respect des exigences de capabilité Cpk formulées sur le critère résultant Y lorsque les spécifications de population exprimées sur les X sont respectées.

La pertinence de ces méthodes repose, d'une part, sur l'introduction de méthodes de calcul nouvelles, mais aussi et surtout sur l'introduction d'exigences de population permettant de faire converger les hypothèses de calcul avec la réalité.

Le tolérancement inertiel

Pour apporter une solution au problème de décentrage, cette méthode introduit un nouveau critère, appelé "Inertie", comme moyen d'attraction vers la valeur cible. Pour un lot de pièces (ou une population) dont la moyenne serait μ , et l'écart-type σ , V_c étant la valeur cible, l'inertie est définie par

$$I = \sqrt{\delta^2 + \sigma^2}, \text{ avec } \delta = \mu - V_c, \text{ le décentrage.}$$

Le tolérancement inertiel repose sur la spécification d'une inertie maximale, autour d'une cible définie, pour tous les paramètres influents [2].

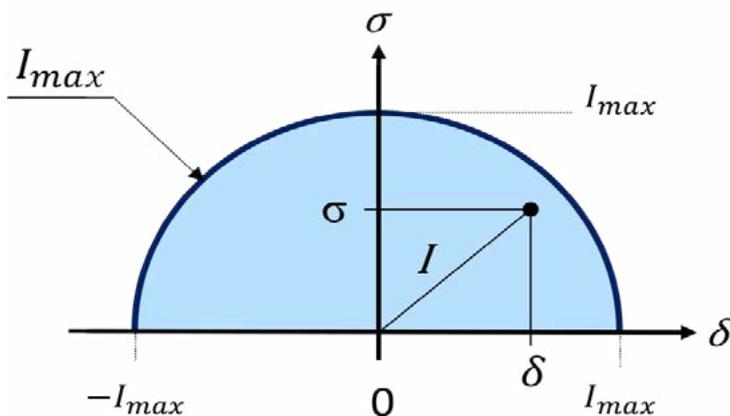


Figure 5 - Domaine des procédés acceptables en tolérancement inertiel

Si les N paramètres X_i influents d'un critère résultant Y respectent chacun leur exigence d'inertie maximale, et si les cibles de ces X_i sont convenablement ajustées pour obtenir la cible optimale sur le Y , on démontre que le Cpk du critère résultant Y présente une valeur minimale [3] :

$$Cpk_{Y_MIN} = \sqrt{\left(\frac{IT_{Y_S}}{6 \cdot \sigma_{Y_max_R}}\right)^2 - \frac{N}{9}} \text{ avec } \sigma_{Y_max_R} = \sqrt{\sum a_i^2 \cdot I_{max_i}^2}$$

Cette formule est valide lorsque les inerties sont suffisamment réduites pour assurer que

$$\sigma_{Y_max_R} \leq \frac{IT_{Y_S}}{2 \cdot \sqrt{N}} \text{ (dans le cas contraire un } Cpk_Y \text{ négatif est possible).}$$

Il devient alors possible d'allouer les inerties I_i sur les paramètres X_i de manière à garantir le Cpk spécifié sur le critère résultant Y [3]. Il suffit pour cela d'assurer :

$$\sigma_{Y_max_R} \leq \frac{IT_{Y_S}}{6 \cdot \sqrt{Cpk_{Y_S}^2 + \frac{N}{9}}}$$

“

La pertinence de ces méthodes repose, d'une part sur l'introduction de méthodes de calcul nouvelles, mais aussi et surtout sur l'introduction d'exigences de population permettant de faire converger les hypothèses de calcul avec la réalité.

”

Dans notre exemple fil rouge, les inerties maximales, considérées égales, pouvant être allouées sur les 4 composants sont de $I_{max} = 0.0555$.

Pour comparaison, l'IT associé, dit de conformité sur des caractéristiques individuelles, est de $IT_x = 0.333$, un résultat intermédiaire entre les méthodes Arithmétique et Quadratique.

Ce qui rend fiable le tolérancement inertiel n'est pas simplement la formule de calcul, mais surtout le remplacement de l'exigence de capabilité habituellement cascadée sur les paramètres X_i par un nouveau critère : l'inertie.

Pour élargir les tolérances allouées en tolérancement arithmétique sans tomber dans les risques du tolérancement quadratique, il a fallu abandonner le point de vue ancien de la conformité, appliqué sur les paramètres X_i pour des pièces considérées individuellement, et le remplacer par une conformité jugée sur des grandeurs statistiques évaluées pour des populations de pièces, et permettant de contenir les décentrages. Ce point de vue est aujourd'hui encadré par la nouvelle norme ISO 18391, qui propose d'indiquer, à droite un symbole ST, placé dans un hexagone après l'IT classique «de conformité pour des caractéristiques individuelles», une exigence relative à des statistiques de population, telle une inertie maximale pour le tolérancement inertiel :

$$10 \pm 0.15 \text{ } \langle \text{ST} \rangle \text{ I } 0.05$$

Le «Process Tolerancing», une méthode Semi-Quadratique orientée procédés

Le tolérancement inertiel est efficace lorsque les décentrages des paramètres X peuvent être maintenus aux alentours de 1 à 2σ . Cependant, pour de nombreux procédés industriels, comme le moulage de plastiques, le découpage fin, l'emboutissage, la frappe à froid et de forgeage, mettant en œuvre des outillages lourds non réglables quotidiennement, l'écart-type court terme σ peut être très faible, et la variation de la moyenne autour de la cible, entre différents lots successifs, être beaucoup plus importante, pouvant dépasser $\pm 3\sigma$ ou $\pm 5\sigma$. Dans de tels cas, le tolérancement inertiel est moins bien adapté que la méthode appelée «Process Tolerancing», car il rejette des processus pourtant acceptables.

Le Process Tolerancing repose sur le découplage définitif entre l'allocation en décentrage et l'allocation de dispersion, et permet de calibrer de manière souple les allocations en fonction des procédés utilisés. Un même produit peut en effet être l'assemblage de composants pour lesquels un centrage relativement précis pourra être assuré, et présentant ainsi plutôt des dispersions importantes, et d'autres composants présentant des dispersions court terme étroites mais avec une variabilité de moyenne dans le temps plus conséquente.

Le Process Tolerancing est une évolution des méthodes dites «Semi-Quadratiques» [4],[5],[6] mais en diffère sur un point essentiel : la décision de ne plus faire la somme arithmétique d'un IT de variation de la moyenne sur le long terme et d'un IT de dispersion autour de la moyenne court-terme, mais le choix de considérer de manière séparée [7] :

- Une distribution de la moyenne du Y , provenant d'incertitudes d'outillages, principalement des causes spéciales qu'il faut contenir, mais ne représentant pas systématiquement une variabilité s'exprimant sur le long terme,
- Une dispersion court terme du Y autour de sa moyenne court-terme, provenant de causes communes, technologiques, qu'il faut stabiliser, mais avec lesquelles il faut vivre.

Cette méthode est conceptuellement différente de la méthode inertielle qui agrège en une seule variable, l'inertie, ces deux composantes bien différentes, tant par leurs causes que par leurs conséquences, que sont les centrages et les dispersions.

Pour les contributeurs X, ce ne sont pas les bornes de l'intervalle de tolérance qui importent, ni la largeur de cet intervalle, mais les grandeurs statistiques des populations de pièces que l'on est censé accepter. La méthode «Process Tolerancing» propose de s'affranchir de toute référence à des intervalles de conformité sur des caractéristiques individuelles, pour spécifier sans ambiguïté et de manière séparée, pour les lots de pièces une exigence de centrage et une exigence de dispersions [8].

En «Process Tolerancing», la spécification des paramètres X_i est ainsi définie par :

- une cible V_{c_i}
- un décentrage maxi δ_{max_i}
- un écart-type court terme maxi σ_{max_i}

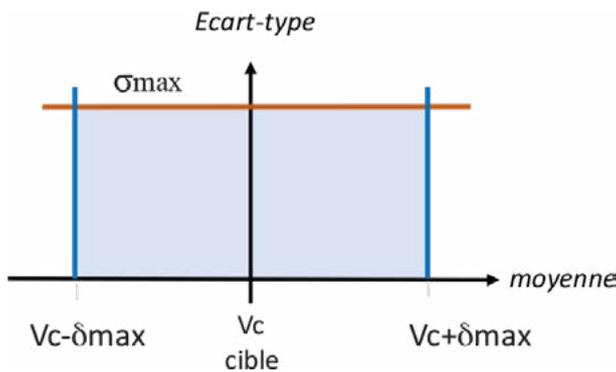


Figure 6 - Zone des procédés acceptables selon le Process Tolerancing

Selon la Norme ISO 18391 une spécification «Process Tolerancing» peut prendre la forme suivante :

$$10 \pm 0.3 \text{ (ST)} \quad \mu=10 \pm 0.15; \sigma \leq 0.05 \quad \text{ou bien} \quad 10 \pm 0.3 \text{ (ST)} \quad \delta 0.15; \sigma 0.05$$

On retrouve devant le symbole ST un intervalle de tolérance classique pour des caractéristiques considérées individuellement, pouvant être un IT restreint, alloué par exemple en arithmétique, et après ce symbole ST, la spécification de population associée au «Process Tolerancing», permettant de qualifier des lots.

La mise en œuvre des calculs est ensuite simple, en réalisant :

- d'une part, «la chaîne de cote des décentrages» autour de la cible résultante, ceci pouvant être réalisé en arithmétique, ou bien de manière probabiliste, par convolution de distributions introduites en a priori sur les décentrages δ_i ,
- et d'autre part, la chaîne de cote «des dispersions court terme», réalisée naturellement en quadratique en utilisant la propriété de cumul des variances qui ne réclame que l'indépendance des paramètres.

On obtient :

- La cible résultante est : $V_{C_{Y,R}} = a_0 + \sum a_i \cdot V_{c_i}$
- Le décentrage résultant maximum : $\delta_{Y,max,R} = \sum |a_i| \cdot \delta_{max_i}$
- L'écart-type maximum : $\sigma_{Y,max,R} = \sqrt{\sum a_i^2 \sigma_{max_i}^2}$

MÉTHODE SIMPLIFIÉE POUR LE CALCUL DE LA DISTRIBUTION DU DÉCENTRAGE RÉSULTANT PAR APPROXIMATION PAR LOIS BETA.

Pour alléger les notations nous noterons ici

$$\delta_{max_i} = \Delta_i$$

$$\delta_{Y,max,R} = \sum |a_i| \cdot \delta_{max_i} = \Delta_Y$$

Pour chaque X_i , on introduit en a priori une loi Beta pour représenter la distribution du décentrage δ_i , avec pour paramètres $(\alpha_i, \beta_i, -\Delta_i, +\Delta_i)$. Ce choix est justifié par la souplesse de la distribution Beta qui peut évoluer d'une loi uniforme ("a priori neutre", pour $\alpha = \beta = 1$) vers des lois quasi normales (pour $\alpha = \beta > 6$) mais aussi donner des distributions avec une dissymétrie prononcée ($\alpha \neq \beta$)

Pour Y, la loi distribution du décentrage résultant est ensuite approchée par une loi Beta dont les paramètres $(\alpha_Y, \beta_Y, -\Delta_Y, +\Delta_Y)$ sont déterminés pour respecter les bornes et les 2 premiers moments. On obtient :

$$\alpha_Y = (\Delta_Y + m) \frac{\Delta_Y^2 - m^2 - V}{2 \cdot V \cdot \Delta_Y}$$

$$\beta_Y = (\Delta_Y - m) \frac{\Delta_Y^2 - m^2 - V}{2 \cdot V \cdot \Delta_Y}$$

Où $m = \sum a_i \cdot E_i$ et $V = \sum a_i^2 \cdot V_i$

Avec $E_i = \frac{\alpha_i - \beta_i}{\alpha_i + \beta_i} \Delta_i$ $V_i = \frac{4\alpha_i\beta_i}{(\alpha_i + \beta_i)^2 \cdot (1 + \alpha_i + \beta_i)} \Delta_i^2$

Il est alors possible de remplacer le décentrage maxi Δ_Y , issu d'un calcul arithmétique pessimiste, par les limites d'un intervalle de confiance obtenu pour un niveau de risque d'outillage accepté noté p% (unilatéral) :

$$\delta_Y(p\%) = \text{BetaInv}(p\%, \alpha_Y, \beta_Y, -\Delta_Y, +\Delta_Y)$$

$$\delta_Y(1 - p\%) = \text{BetaInv}(1 - p\%, \alpha_Y, \beta_Y, -\Delta_Y, +\Delta_Y)$$

Les conditions à vérifier pour valider les allocations de cibles, décentrage et dispersion sur les X_i sont alors :

$$1: V_{C_{Y,R}} - \delta_Y(p\%) - 3 \cdot Cpk_{L_{Y,S}} \cdot \sigma_{Y,max,R} \geq L_{Y,S}$$

$$2: V_{C_{Y,R}} + \delta_Y(1 - p\%) + 3 \cdot Cpk_{U_{Y,S}} \cdot \sigma_{Y,max,R} \leq U_{Y,S}$$

Pour une allocation donnée, il est aussi possible d'évaluer le risque de ne pas tenir les exigences de capacité sur le critère Y (client) en utilisant la fonction Répartition de la loi Beta identifiée pour δ_Y , en calculant préalablement les décentrages mini et maxi acceptables :

$$Risk_L = \text{BetaCDF}(\delta_{Y,1}, \alpha_Y, \beta_Y, -\Delta_Y, +\Delta_Y)$$

$$Risk_U = \text{BetaCDF}(\delta_{Y,2}, \alpha_Y, \beta_Y, -\Delta_Y, +\Delta_Y)$$

$$\text{Avec : } \delta_{Y,1} = L_{Y,S} + 3 \cdot Cpk_{L_{Y,S}} \cdot \sigma_{Y,max,R} - V_{C_{Y,R}}$$

$$\text{Et } \delta_{Y,2} = U_{Y,S} - 3 \cdot Cpk_{U_{Y,S}} \cdot \sigma_{Y,max,R} - V_{C_{Y,R}}$$

Rem : en prenant comme a priori des lois uniformes pour les décentrages des paramètres X_i , ($\alpha_i = \beta_i = 1$), on obtient pour le décentrage résultant une loi symétrique, et les calculs se simplifient. Dans le cas de 2 contributeurs, la distribution résultante est alors une loi trapézoïdale.

DES PISTES DE RECHERCHE POUR DEMAIN

La méthode APTA [10] peut être considérée comme une variante du Process Tolerancing introduisant une incertitude sur la connaissance des écarts-types des paramètres, alors que la méthode Process Tolerancing suppose ces écart-types stables et connus. Ces deux méthodes sont en effet unies par le même objectif : intégrer le plus tôt possible la vérité des procédés. L'identification de la distribution capable de représenter au mieux cet incertain de dispersion, qui peut d'ailleurs être soit une incertitude provenant du mesurage, ou bien réellement une variabilité des écarts-types dans le temps, n'est pas une chose aisée, mais cette méthode ouvre des perspectives potentiellement intéressantes d'acceptation de procédés présentant des instabilités, ou dont nous n'avons pas une entière connaissance.

L'autre différence avec le Process Tolerancing est que la méthode APTA, dans sa définition actuelle, réalise la convolution entre l'aléa de moyenne et l'aléa de dispersion, pour traiter finalement de la distribution long terme de la caractéristique étudiée. Ce que le process Tolerancing a choisi de ne pas faire en première instance pour bien séparer au niveau du critère résultant ce qui est risque de décentrage, lié à des causes spéciales, et ce qui est de la dispersion, lié à des causes communes. Souvent dans l'industrie, les décentrages (décalages de moyennes) des outillages ne sont pas toujours des dérives ou variabilité s'exprimant au fil du temps. La convolution est donc hasardeuse. Mais l'introduction d'un incertain de dispersion demeure un élément d'intérêt, c'est une dimension de la réalité qu'il faut intégrer, et la combinaison de ces deux méthodes s'annonce comme un axe d'investigation pertinent.

On le voit, le tolérancement n'est pas une discipline hermétique et figée, mais bien une discipline en mouvement, un espace de recherche et d'innovations au service de l'industrie.

La validation de l'allocation des cibles, des décentrages maxi et des écarts-types maxi sur les paramètres X_i est réalisée en vérifiant les deux conditions suivantes :

$$\text{Cond. 1 : } V_{C_{Y,R}} - \delta_{Y_{\max,R}} - 3 \cdot C_{pk} L_{Y,S} \cdot \sigma_{Y_{\max,R}} \geq L_{Y,S}$$

$$\text{Cond. 2 : } V_{C_{Y,R}} + \delta_{Y_{\max,R}} + 3 \cdot C_{pk} U_{Y,S} \cdot \sigma_{Y_{\max,R}} \leq U_{Y,S}$$

Dans ce premier mode de mise en œuvre, appelé «semi-quadratique», la chaîne de cote des décentrages est réalisée en arithmétique, ce qui est déraisonnablement pessimiste lorsque le nombre de paramètres X_i augmente.

En dissociant ce qui concerne les décentrages et ce qui concerne les dispersions, le Process Tolerancing permet d'introduire assez simplement un traitement «probabiliste» de la «chaîne de cotes des décentrages». Il est ainsi possible de considérer diverses distributions pour les décentrages des X_i et de les cumuler par convolution pour obtenir la distribution du décentrage résultant sur le critère Y étudié. Un mode de calcul simplifié de cette convolution, par approximation par loi Beta, est décrit dans l'encadré ci-contre [7]. Une fois la distribution du décentrage résultant obtenu, il est alors possible de déterminer un intervalle de confiance sur ce décentrage résultant, en introduisant un risque unilatéral noté p%, et appelé risque d'outillage (ou de moyenne). Pour un risque maîtrisé de mauvaise combinaison de moyennes, indépendant du nombre de paramètres, cette méthode offre un gain de tolérance appréciable lorsque le nombre de paramètres X_i augmente.

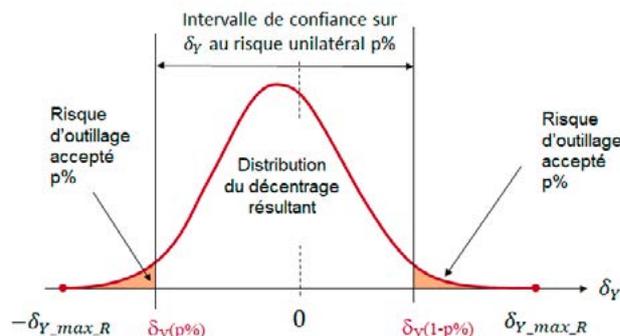


Figure 7 – Distribution du décentrage résultant et risque d'outillage

Il faut bien noter que le risque d'outillage p% n'est pas le taux de défaut Client, mais le risque d'obtenir un Cpk inférieur à l'exigence : c'est le risque d'une mauvaise combinaison des moyennes sur les maillons X_i , conduisant à un niveau de qualité sur le Y inférieur à ce qui est attendu, et réclamant alors un réglage. Régler un seul maillon X suffit pour recentrer le critère résultant Y et respecter le Cpk attendu. C'est le coût de ce réglage, d'un X choisi, qu'il convient de considérer pour fixer le seuil de risque d'outillage p% acceptable [7], [9].

Dans notre exemple fil rouge, avec p=0% (calcul dit semi-quadratique) et pour un décentrage $\delta_X = 3\sigma_X$ nous obtenons $\delta_X = 0.0667$ et $\sigma_X = 0.0222$, ce qui correspond à un $IT_X = 2 \cdot \delta_X + 6 \cdot \sigma_X = 0.267$, ce qui donne un léger avantage au tolérancement inertiel.

En introduisant un risque d'outillage même modéré, l'avantage tourne peu à peu au Process Tolerancing : avec p=0.1% (toujours pour $\delta_X = 3\sigma_X$), nous obtenons $\delta_X = 0.0786$ et $\sigma_X = 0.0262$, ce qui donne $IT_X = 0.314$. Avec p=1%, nous obtenons $\delta_X = 0.0882$ et $\sigma_X = 0.0294$, ce qui donne $IT_X = 0.353$.

Dans les calculs précédents, nous avons optimisé l'allocation en introduisant un rapport de proportionnalité entre le décentrage maxi et l'écart-type maxi alloué, rapport pris ici identique pour les paramètres X_i . Dans la réalité, ce ratio variera en fonction des procédés.

Cependant, dans la mise en pratique optimale du Process Tolerancing, l'allocation s'effectuera différemment. On déterminera dans un premier temps les écarts-types court termes σ_{max} , définis par les technologies choisies, partie considérée comme intrinsèque aux procédés, et sur laquelle le producteur ne peut rien d'autre qu'en assurer la stabilité, et vivre avec, et on optimisera ensuite les cibles V_c et les allocations de décentrage δ_{max} , pour assurer le respect des exigences de capabilité sur le critère résultant.

Le producteur peut en effet agir sur les décentrages, en réalisant des mises au point renforcées des outillages, en assurant une maintenance adaptée, et dans certains cas, en effectuant quand nécessaire les réglages opportuns.

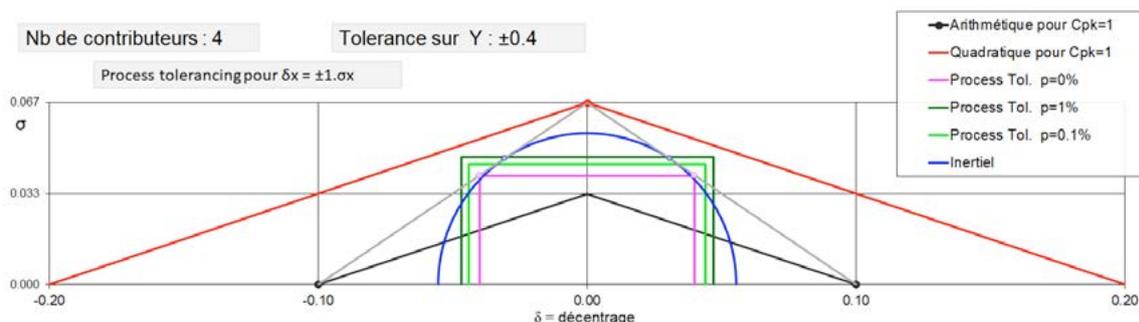
Ici encore, ce n'est pas la formule de calcul de tolérance qui apporte la fiabilité, mais l'exigence sur le terrain de contenir les dispersions et les décentrages en deçà des limites fixées explicitement.

DES REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES POUR COMPARER

Il est utile de comparer les différentes méthodes présentées ici autrement qu'en considérant uniquement la largeur des intervalles de tolérances de conformité pour des caractéristiques individuelles. En effet, le tolérancement Inertiel et le Process Tolerancing ne se satisfont pas d'une conformité individuelle des composants, mais introduisent des spécifications de populations : exigences sur des critères statistiques pour les lots de pièces. La méthode adaptée pour comparer les différentes méthodes consiste ainsi à analyser, pour les paramètres X_i , les domaines des procédés acceptés respectifs sur un diagramme (δ, σ) .

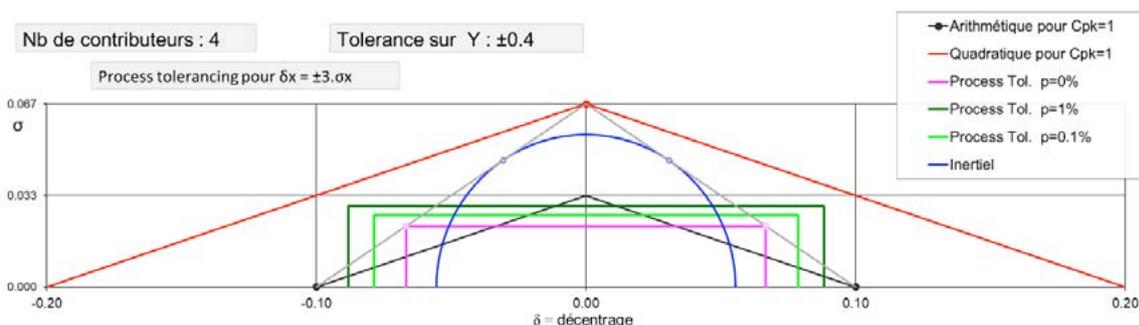
Pour N=4 contributeurs, correspondant à notre exemple fil rouge, on remarque l'écart considérable entre le domaine des procédés acceptés en Arithmétique et en Quadratique.

Figure 8 - 1^{ère} comparaison pour N=4 contributeurs et une allocation en décentrage restreinte en Process Tolerancing



Entre l'Inertiel et le Process Tolerancing calculé tout d'abord pour un ratio $\delta_x = 1. \sigma_x$, la nuance ne semble pas majeure, avec un léger avantage à l'Inertiel. Mais combien d'industries arrivent à contenir leur décentrage à une valeur inférieure à une fois l'écart-type. Ceci correspond en effet à un Cp inférieur à 1.33 lorsque le Cpk est de 1.

Figure 9 - 2^e comparaison pour N=4 contributeurs et une allocation en décentrage plus large



En considérant ensuite un ratio $\delta_x = 3 \cdot \sigma_x$, plus réaliste dans de nombreuses industries (correspondant à un Cp de 2 lorsque le Cpk vaut 1), le Process Tolerancing révèle sa meilleure aptitude à accepter des procédés à fort décentrage, au prix d'une contrainte plus forte en termes de dispersion.

Quand le nombre de contributeurs augmente l'intérêt du Process Tolerancing apparaît à condition de consentir un risque d'outillage, mais avec un niveau de risque modéré (entre 0.1% et 1%), le gain est vite appréciable.



ENJEUX POUR LE PILOTAGE DES PROCÉDES

Avec des méthodes fiables comme les méthodes inertielle et Process Tolerancing, la conformité des composants à leurs exigences (de population) assure la performance et le respect du Cpk attendu sur les critères «client» : l'usine est protégée par le calcul fait en amont au bureau d'études lorsque les contributeurs respectent leurs spécifications de population. Ce domaine de conformité des composants est la zone de confort qu'il faut viser, celle où l'on peut produire sans se poser de questions, avec des coûts de contrôle réduits.

Lorsqu'un ou des composants ne sont plus «à l'intérieur» de leurs spécifications, une incertitude apparaît : l'usine n'est plus protégée par le calcul amont du bureau d'études. Le pire n'est pas l'évènement le plus probable pour autant. La probabilité de défaillance ne va pas passer de 0% à 100% dès qu'un composant sort de sa spécification. Rejeter alors systématiquement des composants non conformes permet certes de protéger le client, mais comporte un risque potentiellement très grand, pour le fabricant, de mettre inutilement au rebut des composants qui auraient pu très bien fonctionner, et occasionne des surcoûts souvent aussi importants qu'inutiles.

Ce qui est étonnant, c'est que la décision de mettre au rebut des lots entiers de composants non conformes soit généralement prise sans évaluation préalable sérieuse du risque réel pour le client. Le problème pour le fabricant est en effet de traduire la non-conformité observée sur un composant, en probabilité de défaut pour le client. Cette traduction est impossible pour un fabricant qui ne reçoit que des plans où s'accumulent des exigences de conformité. Il ne dispose pas du moyen de passer de la caractéristique du composant, sur lequel il peut observer une réalité, au critère de performance du système pour lequel une décision doit être prise. Ce qui est étrange, c'est que la solution au problème semble compliquée, inaccessible, alors qu'elle est là, simple et disponible.

Avant de mettre toutes ces exigences sur le même plan, les ingénieurs du bureau d'études ont le plus souvent réalisés des modèles, ou des chaînes de cotes, permettant de faire le lien entre les exigences du client, ou conditions de fonctionnement, les Y, et les caractéristiques des composants ou des paramètres process, les X. Grâce à ces modèles $Y=F(X)$ ils ont établi, optimisé, validé les tolérances des composants pour assurer les performances attendues.

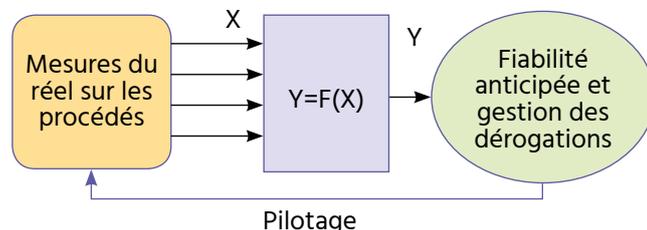


Figure 10 - Des modèles du Bureau d'Études au service du Pilotage en Usine

La brique manquante est là, ces modèles $Y=F(X)$ utilisés au bureau d'études pour la synthèse des tolérances sont la clef de voute du management des problèmes de tolérances du bureau d'étude jusque dans l'usine. Il suffit de les faire tourner avec les données pertinentes pour pouvoir prendre les bonnes décisions. Étrangement c'est en usine, où ils ne sont pas disponibles, que l'usage de ces modèles reposerait le moins sur des conjectures, mais sur des faits. Les concepteurs doivent introduire des

hypothèses pour transformer les spécifications portées au plan en hypothèses relatives aux moyennes et aux écarts-types des procédés, et injecter celles-ci dans leurs modèles $Y=F(X)$ pour prédire la performance sur les critères Y attendus par les clients. En usine, nul besoin d'hypothèses, on peut disposer des moyennes et des écarts-types réels à un moment donné, ou du moins en construire des estimateurs crédibles sur la base d'échantillons, et il n'y a qu'à injecter ces données statistiques dans les modèles préparés au bureau d'études pour prédire ce qui sortira dans quelques heures, ou dans quelques jours, des chaînes de montage.

Lorsqu'un paramètre sort des hypothèses initiales faites au bureau d'Études, l'usine n'est plus protégée par le calcul effectué en amont, et pour évaluer le risque encouru, il n'y a qu'une seule solution : refaire le calcul avec les données réelles du problème. La brique manquante existe, elle n'a seulement pas été mise à la disposition de ceux qui peuvent en tirer profit, en exploiter toute la valeur, pour une plus grande satisfaction des clients et une plus grande rentabilité de l'entreprise. Refuser aux fabricants l'accès à ces modèles c'est prendre délibérément la décision de les enfermer dans une logique de conformité des composants sans pouvoir envisager de manière rationnelle l'aptitude à l'emploi. L'objectif n°2 du tolérancement est-il oublié ?

Il ne s'agit pas ici de relâcher aveuglément les exigences sur les composants mais d'orchestrer un pilotage maîtrisé, intelligent, des paramètres disponibles, les X, au service de la satisfaction des exigences sur les critères clients, les Y. La clef pour ce pilotage est la mise à disposition des fonctions transfert $Y=F(X)$ aux services Qualité des usines. Si cette solution d'apparence simple n'est pas déjà effective dans les entreprises, c'est qu'il existe des freins qu'il convient d'identifier pour pouvoir les contourner ou les desserrer.

Le premier est peut-être inscrit dans la répartition des rôles et des pouvoirs que ces rôles procurent : le bureau d'études, en relation avec les clients sait ce qui est demandé : il traduit les attentes des clients en spécifications pour les composants. Chaque fabricant reçoit un plan et exécute ! Il réalise ses pièces selon les spécifications formulées. Ceci a sans doute été renforcé par l'un des dogmes de «la Qualité Totale» qui a généralisé le concept de relation client-fournisseur à tous les étages de l'entreprise. Nous serions ainsi tous fournisseur de quelqu'un, qui attendrait le résultat de notre travail, et le client de quelqu'un d'autre qui nous transmettrait le fruit du sien. Selon le deuxième postulat de la Qualité, si chacun dans l'entreprise fait son possible pour satisfaire son client, alors le client final, par voie de conséquence, serait satisfait. Dans ce jeu, le bureau d'études se positionne en client de l'usine, en lui envoyant des spécifications, comme il en reçoit lui-même, et considère que l'usine doit fournir des pièces conformes au plan, au même titre que l'entreprise doit finalement livrer des produits conformes au client final. L'idée opposée, que le bureau d'études serait en réalité le fournisseur de l'usine et devrait lui fournir tous les éléments, des plans, mais aussi des modèles, permettant de fabriquer de manière rentable des produits satisfaisant le client final, semble moins partagée, comme si un dogme nous dictait que le client est celui qui porte des spécifications au plan.

Un autre frein est l'éventuel intérêt des Bureaux d'Études à maintenir une certaine opacité sur les modèles qu'ils établissent pour construire leurs spécifications. La démonstration de la nécessité des exigences n'est pas toujours bien faite, il existe parfois des zones d'ombre, de belles réalisations scientifiques côtoient des empirismes plus ou moins valides. Rendre les modèles disponibles, c'est faire acte de transparence, c'est donner à voir la vérité, ce qui est bien fait, comme ce qui l'est moins.

Enfin, la distance à la fois géographique et culturelle entre les centres R&D et les Usines est aussi une barrière. Osons la caricature. En R&D, des ingénieurs diplômés, avec des logiciels sophistiqués et des ordinateurs connectés, ont accès à toutes les données, connaissent les clients et côtoient les décideurs... Dans les usines, les opérateurs n'ont ni le temps ni la mission de connecter des modèles et des données pour évaluer et gérer des risques. On ne leur a de toute manière pas donné les outils ni les formations pour cela. Mais ceci n'est pas ce que nous pouvons espérer pour l'Usine du futur, et nous devons



aller au-delà des clichés pour ouvrir des perspectives. Pour faire face à une concurrence mondiale, nos entreprises ont besoin d'usines agiles et véloces, intégrant les meilleures solutions pour accroître leur compétitivité.

Ce que nous proposons va dans ce sens :

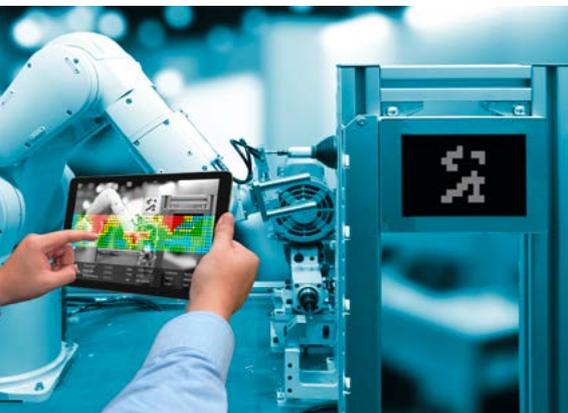
- Donner aux usines d'assemblage l'accès aux modèles $Y=F(X)$ pour leur permettre d'intégrer le lien entre les paramètres qu'ils peuvent piloter et les critères de jugement sur lesquels se joue la satisfaction des clients.
- Connecter les modèles $Y=F(X)$ utilisés en conception avec les données relevées en usine pour donner aux équipes R&D l'accès à la vérité des procédés et leur permettre de construire des prévisions consolidées dans leurs études futures.

La mise à disposition au Fabricant des modèles $Y=F(X)$ permet de ne plus subir un contrôle des X en boucle ouverte et d'anticiper, grâce à l'inférence rendue possible, les problèmes de qualité pour le client. La réalisation des modèles reste la mission et la responsabilité des équipes R&D et de Méthodes, mais la mise à disposition de ces modèles aux équipes opérationnelles et aux responsables qualité des usines permet d'évaluer des risques avant de les prendre, d'élaborer des décisions et de réaliser pleinement une mission essentielle de leur métier : le pilotage des procédés.

Pour effectuer ces tâches dans l'environnement qui est le leur, ils vont devoir être outillés convenablement, c'est-à-dire être connectés à des serveurs, disposer des logiciels adaptés à leur mission et leur environnement.

Les perspectives ouvertes par ce dispositif sont vastes :

- Aide à la mise au point en phase de lancement.
- Réduction des rebuts au niveau des composants : on ne jette pas des composants qui marchent !
- Réduction des rebuts au niveau des systèmes assemblés : on n'assemble plus des composants qui ne se marient pas !
- Réduction des coûts de contrôle fin de chaîne lorsque les prévisions sont au vert, réactivation du contrôle lorsque des risques sont détectés.
- Adaptation des fréquences d'échantillonnage en fonction des risques évalués.
- Management prédictif de la maintenance.
- Autonomie des usines d'assemblage dans la gestion des dérogations.



Il est bien sûr toujours préférable de maintenir une vision statistique sur tous les composants, par une mise en place de la SPC (Maîtrise Statistique des Procédés) pour disposer à chaque instant de données objectives, mais il est aussi possible d'éclairer des décisions dans des situations où des données manquent. L'usage des statistiques Bayésiennes permet en effet de prendre en compte les données disponibles incomplètes et de conserver pour les paramètres sur lesquels des données manquent, les hypothèses construites initialement en R&D en accord avec les «spécifications» établies. Nous avons aujourd'hui tous les ingrédients pour rendre cette aventure possible, les appareils de mesure sont connectés, les serveurs permettant le partage des modèles, des données et des résultats existent. Il manque peut-être quelques couches logicielles, quelques interfaces, mais **nous pouvons construire dans un avenir proche cette passerelle entre les centres R&D et les Usines, qui trop souvent s'affrontent sur le sujet des tolérances, pour faire coopérer ces 2 entités à un objectif commun : la satisfaction des clients et la rentabilité de l'activité productrice.**

Donner aux producteurs la visibilité sur les critères de satisfaction des clients et l'accès aux fonctions de transferts entre les paramètres pilotables et les critères de jugement **et ouvrir aux centres R&D la vision sur la réalité des procédés** est un chantier essentiel pour construire **l'Usine du Futur sur des fondations collaboratives nouvelles**.

PERSPECTIVES ...

Comme nous venons de le voir, l'allocation de tolérances, suivant la méthode utilisée, peut conduire à des valeurs allant du simple au double dans notre exemple fil rouge à 4 paramètres : 0,2 mm en tolérancement arithmétique, 0,4 mm en tolérancement statistique quadratique. Des tolérances allouées manifestement trop serrées dans le premier cas, avec des rebuts le plus souvent inutiles, et certainement trop larges dans le second cas, avec des situations potentiellement catastrophiques avec des composants jugés conformes, mais non fonctionnels lorsque l'hypothèse de centrage parfait ne peut être tenue.

Des méthodes alternatives fiables existent aujourd'hui. Elles s'appuient sur des spécifications «de population» en introduisant des exigences exprimées en termes statistiques pour les lots de pièces. Ces méthodes offrent de nouvelles perspectives pour intégrer la vérité des procédés, pour tirer profit de la connaissance «statistique» que l'on peut constituer par les mesures capturées sur le terrain³. Cette connaissance statistique des productions réelles permet de construire un point d'équilibre économiquement salubre entre le « trop » et le « pas assez » des méthodes classiques.

Ces méthodes, tolérancement Inertiel ou Process Tolerancing, ont fait leurs preuves. Elles ne demandent qu'à être déployées à plus grande échelle dans le souci d'améliorer la compétitivité des entreprises industrielles. Leur utilisation ne dépend pas d'investissements lourds et hasardeux, ni d'outils informatiques compliqués à implémenter. Le frein à leur utilisation est largement identifié : la résistance au changement justifiée par le trop classique « On a toujours fait comme ça, changer est trop risqué ! ». Oui, sauf que ...

Dans un monde qui comprend enfin que les années d'opulence sont derrière nous, que la compétition est désormais internationale, une forme de disruption s'impose.

Celle-ci ne coûte pas grand-chose et peut rapporter beaucoup, mais réclame des décisions. La balle est donc, maintenant, dans le camp de ceux dont le métier est de les prendre : celui des décideurs.

Dans un contexte où nous entendons parler tous les jours d'Entreprise Digitale, de Cloud, de Data Sharing, de Big Data, d'Intelligence Artificielle, nous prenons conscience que nos données contiennent de l'or. Exiger du bureau d'études qu'il fournisse ses modèles à l'usine pour piloter la réalisation des pièces qu'il a dessinées, et exiger que les usines de composants mettent les données de mesures captées sur les lots de pièces fabriquées, à l'usine d'assemblage semble, à l'homme du XXIème siècle, être une évidence qui n'a plus besoin d'être argumentée. Les solutions techniques pour connecter les données et les modèles sont à notre disposition, il ne manque plus que la volonté !

Il existe un autre levier de compétitivité non exploité dans ce livre blanc : l'indispensable collaboration de tous les acteurs qui concourent à la réalisation des Y. Pour réussir, la compétition doit être remplacée par la coopération. La concurrence, sur le marché, se fait au niveau des Y : le client achète un produit pour des raisons parfois subjectives mais aussi de performance, de qualité, de fiabilité et de coût que l'on peut

QUELQUES MOTS D'ENCOURAGEMENT DE MARIE-JOSÉ PRICAZ- BARBOT, DIRIGEANTE DE ZYLIA TECH,

entreprise de Haute-Savoie, qui développe et commercialise des solutions logicielles pour la Maitrise Statistique des Processus :

« Depuis 32 ans, Zylia Tech défend l'idée clef que l'essentiel n'est pas de stocker des informations de conformité, même si c'est souvent utile, mais au travers de toutes les données collectées, d'en extraire les informations pertinentes. Le pilotage des procédés doit satisfaire en priorité à la qualité vraie et donc à l'intérêt des clients au "juste coût".

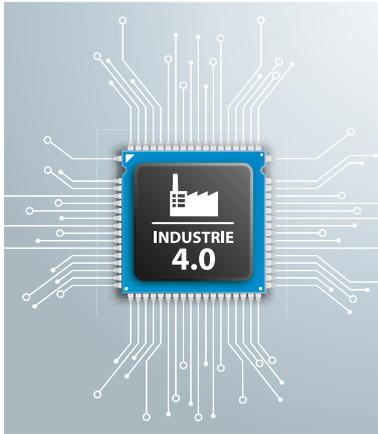
Il y a de l'or dans les données que nous captions tous les jours, et nous devons tous nous transformer en chercheurs d'or. La qualité se fabrique ! L'idée de tendre un fil afin de construire des modèles plus robustes et agir avec efficacité, simplement en partageant les données entre tous les services, depuis les bureaux d'études jusqu'aux Usines, est très prometteuse et correspond à nos convictions défendues depuis de nombreuses années.

Piloter ! Un acte fondamental pour les industries désirant améliorer leur compétitivité. En 2012, Zylia Tech a innové en lançant les premières études sur le Process Tolerancing et c'est avec la confiance de ses clients que l'entreprise va poursuivre ce défi déjà bien engagé sur cette piste prometteuse et innovante avec des partenaires ».

³ Sous réserve qu'elles soient suffisamment fiables, voir le livre blanc sur la métrologie : <http://www.manufacturing.fr/html/mags/livre-blanc-metrologie/content/livre-blanc-metrologie.pdf>

objectiver. Chaque acteur qui participe à la réalisation d'un ou quelques X d'un critère client Y a un intérêt à coopérer avec tous les autres acteurs réalisant les autres X de ce même Y pour gagner ensemble la compétition. Les succès et les échecs sont liés et par suite la rentabilité et la pérennité de chacun aussi.

Au-delà des méthodes objectives présentées ici pour augmenter de manière raisonnable les tolérances et réduire ainsi les coûts de production et de surveillance, il devient envisageable d'aller encore plus loin. En effet, la technologie actuelle permet d'imaginer un monde numérique, partagé au niveau de l'entreprise étendue, c'est-à-dire de « la somme des parties d'entreprises collaborantes » qui contribuent à la réalisation d'un même Y. Ce monde ouvre des possibilités nouvelles. Il est par exemple fréquent que des procédés de fabrication ne puissent pas être aisément réglés alors que d'autres le sont sur un simple changement de « *consignes outils* ». Que se passerait-il demain si le stylo pouvait dire au bouchon : « *Décale-toi un peu vers le haut, je suis un peu fort ce matin* »?



Nous l'avons écrit plus haut, **les données voyagent plus vite que les pièces** et sachant que l'objectif est d'avoir des bouchons qui ferment les stylos, ce petit message de l'un vers l'autre ne permettrait-il pas d'aller encore plus loin dans la gestion des problèmes de tolérances, donc dans la réduction des coûts ?

Le projet qui se dessine est ambitieux et requiert l'adhésion du management, car des changements profonds doivent être opérés, mais les perspectives ouvertes peuvent dès aujourd'hui en faire rêver certains. L'avenir est probablement à ceux qui oseront, et comme le dit un slogan bien connu : just do it ! Avec un peu de volonté, inutile d'ajouter : or die ... ■

Références

- [1] Bisgaard S & Graves S. "Quality Quandaries, A Negative Process Capability Index from Assembling Good Components. A Problem in Statistical Tolerancing". CQPI Report n°160 April 1997. In Quality Engineering, 1997-1998, Vol. 10, No. 2.
- [2] Pillet M. "Inertial tolerancing in the case of assembled products, recent advances". IDMME, pp.85-94, 2003
- [3] Adragna P-A., Pillet M., Samper S., Formosa F., "Inertial Tolerancing Guarantying a Cpk indice on the Final Characteristic in an Assembly Production", 6th International conference IDMME 2006
- [4] Mansoor E.M. "The Application of Probability to Tolerances Used in Engineering Designs". Proceeding of the institution of Mechanical Engineers, 178.1.1 p28-51, 1963
- [5] Greenwood W.H & Chase K.W. "A New Tolerance Analysis Method for Designers & Manufacturers". Transaction of the ASME, Journal of Engineering Industry n°109 p 112-116, 1987

[6] Scholz F.W. Tolerance stack analysis methods, a critical review. ISSTECH-95-021, Boeing Inf. & Support Services. November 1995

[7] Judic J-M. "Process Tolerancing: a new approach to better integrate the truth of the processes in tolerance analysis and synthesis". 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Procedia CIRP, 43, 244-249, 2016

[8] Taylor W.A. Process tolerancing: a solution to the dilemma of worst-case versus statistical tolerancing. Fall Technical Conf., 1995

[9] Van Hoecke A. "Tool risk setting in statistical tolerancing and its management in verification, in order to optimize customer's and supplier's risks". 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Procedia CIRP, 43, 250-255, 2016

[10] Gayton N., Beaucaire P., Bourinet J-M., Duc E., Lemaire M., Gauvrit L. "APTA: advanced probability-based tolerance analysis of products" Mécanique & Industries, 12 2, 71-85, 2011

Autres documents d'intérêt

ISO 18391, "Spécification géométrique des produits (GPS) - Spécification de population", 2016

ISO 22514-1, "Méthodes statistiques dans la gestion de processus - Aptitude et performance - Principes et concepts généraux", 2014

NF-E04-008 "Spécification géométrique des produits (GPS) - Calcul de tolérance, indications et critères d'acceptation - Méthodes arithmétique, statistique quadratique et statistique inertielle, 2013

K. W. Chase, A.R. Parkinson, "A Survey of Research in the Application of Tolerance Analysis to the Design of Mechanical Assemblies", ADCATS Report n°91-1, in Research in Engineering Design 3:23-37, 1991

Pillet M., Pairel E., Tichadou S. & Vincent R. "Tolérancement inertiel pour processus à dérive". Conference Qualita, 2015.



Chez Faurecia, et de manière sans doute encore plus évidente pour les sièges automobiles, où de nombreuses fonctions ont un lien fort avec la sécurité, les exigences en termes de fiabilité sont très élevées. La maîtrise de la variabilité et la gestion des problèmes de tolérances sont de fait des problématiques très importantes. Un mécanisme qui ne verrouille pas correctement, c'est un risque de rappel de parc. Sur les critères de sécurité, un taux de défaut de quelques ppm est déjà trop haut.

Aujourd'hui, avec des temps de développement toujours plus courts, les démarches empiriques sont trop souvent mises en échecs et on mesure pleinement l'intérêt de démarches proactives, pour anticiper les problèmes plutôt que les subir. La difficulté est de trouver le juste équilibre entre les approches Lean, qui recherchent l'efficacité et les approches plus lourdes et plus systématiques comme le DfSS (Design for Six Sigma) ou le DfR (Design for Reliability).

« L'OBJECTIF EST CLAIR : PRENDRE EN COMPTE LE PLUS TÔT POSSIBLE LA VÉRITÉ DES PROCÉDÉS, EN INTÉGRANT LA VARIABILITÉ RÉELLE ET LES RISQUES DE DÉCENTRAGE »

Ce qui est sûr, c'est que nous devons nous appuyer sur des approches scientifiques pour modéliser et prédire. En 2003, quand nous avons lancé un projet de « Tolerance Management », je savais que nous devions sortir du dilemme entre un « Worst-Case » trop pessimiste et coûteux et le « Quadratique » trop optimiste et dangereux, mais je ne savais pas où cela allait nous emmener. Avec le Process Tolerancing, ce qui est proposé, c'est d'arrêter de faire des chaînes de cotes passées vertes en serrant des IT que les procédés ne sauront pas tenir, avec le risque de s'en rendre compte trop tard. L'objectif est clair : prendre en compte le plus tôt possible la vérité des procédés, en intégrant la variabilité réelle et les risques de décentrage.

Un projet de déploiement du Process Tolerancing est en cours chez Faurecia, des outils ont été développés en interne, des formations ont été déployées... Des résistances au changement existent, mais dans la perspective « Industry 4.0 », l'idée de connecter les bureaux d'études aux usines, pour prédire les niveaux de qualité atteignables avec des données réalistes sur les procédés et de prendre en conséquence les décisions Produit ou Process qui conviennent, semble « inarrêtable ».

La nouvelle Norme ISO18391 en apportant la possibilité de spécifier en termes statistiques pour parler de conformité d'un lot (population) amène une clef essentielle : assurer la cohérence entre les hypothèses de calcul faites du bureau d'études et les critères d'acceptation des lots de pièces mis en œuvre dans l'usine.

La seconde idée très « Smart Industry » proposée dans ce livre blanc est la mise à disposition des modèles $Y=F(X)$ préparés au bureau d'études, aux équipes Manufacturing pour permettre un pilotage plus efficace des procédés en phase de production, par action sur les paramètres produit et process influents, les X, afin d'obtenir la performance attendue sur les critères de performances du client, les Y. Ceci ouvre la perspective de mises au point moins laborieuses, de résolution de problèmes plus rapides et plus efficaces, et offrira une autonomie plus grande aux usines par une gestion scientifique des demandes de dérogation, et des gains de rentabilité par réduction des rebus.

Ce deuxième volet réclamera sans doute du temps pour vaincre les résistances au changement. Il faudra aussi développer des solutions logicielles flexibles et efficaces. Mais le remplacement de la notion binaire classique de la conformité par une notion « objectivée » d'aptitude à l'emploi est une piste pertinente pour espérer approcher le juste nécessaire et atteindre l'efficacité industrielle recherchée."

Christophe Aufrere
Chief Technology Officer, Group Strategy (Faurecia)



Pour rester compétitives, nos entreprises doivent fabriquer au meilleur coût et avec le meilleur niveau de qualité possible. Ces deux objectifs sont très souvent antagonistes et c'est donc bien un compromis entre le coût et la qualité qu'il faut trouver.

Si ces dernières années, les efforts se sont focalisés sur l'optimisation de la conception nominale, il me semble capital maintenant d'intégrer les incertitudes de fabrication dans ce processus d'optimisation des coûts. Ce livre blanc démontre clairement que les outils sont opérationnels et qu'un changement culturel doit permettre de sortir de l'approche classique et coûteuse qu'est l'approche au pire des cas.

La gestion au plus juste des intervalles de tolérance en fabrication de grande série est un enjeu économique et écologique.

Des tolérances serrées vont bien évidemment dans le sens de la qualité du système mais engendrent des coûts importants (coût process, tri des pièces, rebus excessifs, gestion des dérogations, ...). Des tolérances larges permettent de diminuer les coûts de production mais doivent rester compatibles avec les niveaux de qualité exigés par le client.

« LA GESTION AU PLUS JUSTE DES INTERVALLES DE TOLÉRANCE EN FABRICATION DE GRANDE SÉRIE EST UN ENJEU ÉCONOMIQUE ET ÉCOLOGIQUE »

Les objectifs de l'Association Française de Mécanique (AFM) sont d'animer, de fédérer la communauté mécanicienne tant académique qu'industrielle, de promouvoir les activités et résultats de recherche et de formation mais aussi de faciliter la migration des concepts, méthodes récentes et efficaces, des laboratoires vers l'industrie. Je ne peux donc que me réjouir de l'existence de ce livre blanc spécifique qui propose des méthodes qui contribuent à l'augmentation de la performance industrielle, livre blanc complémentaire de celui, général de la « Mécani-Science », que l'AFM a élaboré en 2015 (voir site AFM ou <https://www.edp-open.org/images/stories/books/fullId/livre-blanc-de-la-recherche-en-mecanique.pdf>).

Pr. Eric Arquis
Président de l'Association Française de Mécanique (AFM)



Le process tolerancing développé dans cet article est utilisé depuis plusieurs années chez Radiall. Les premiers travaux internes portant sur ces chaînes de cotes probabilistes « modernes » datent de 2002. Nous avons développé notre méthode en nous appuyant sur le document « *Tolerance Stack Analysis Method* » de Fritz Scholtz de 1995 de la R&T de Boeing. En 2004, ce fut la première utilisation opérationnelle de notre méthode dans un nouveau projet qui visait à développer une nouvelle gamme de connecteur pour Boeing. Ce fut un succès. Depuis cette époque, notre méthodologie a évolué et les outils aussi. Au départ, les chaînes de cotes se faisaient en 1D.

Aujourd'hui, un outil de calcul de chaînes de cotes 2D « maison » vient compléter notre boîte à outils. Même si les outils évoluent régulièrement, les briques fondatrices de 2002-2004 sont toujours les mêmes : la connaissance des procédés.

« CETTE DÉMARCHE S'EST INSCRITE DANS LE LONG TERME. ELLE A ÉTÉ FASTIDIEUSE MAIS LE CONSTAT EST LÀ AUJOURD'HUI : LE BÉNÉFICE EST INDISPUTABLE »

Il a donc été nécessaire pour Radiall de mieux connaître ses procédés afin que le bureau d'études puisse réaliser ce type de chaînes de cotes. Les données étaient parfois disponibles mais noyées dans l'immensité des données enregistrées au quotidien. D'autres fois, les données n'existaient pas et il a alors fallu faire tomber des barrières pour lancer des campagnes de mesures afin de recueillir les bonnes informations. Cette démarche s'est inscrite sur le long terme. Elle a été fastidieuse mais le constat est là aujourd'hui : le bénéfice est indiscutable.

Même si des difficultés subsistent, cette approche a permis de renforcer les échanges entre le bureau d'études, l'industrialisation et la production et de mieux comprendre les difficultés et contraintes de chacun. Par conséquent, c'est le processus entier de développement des produits et procédés qui est amélioré."

**Laurent Gauvrit
Expert Simulations
(Radiall)**



Industrie 4.0



12, place Georges Pompidou 93167 Noisy-le-Grand cedex

Tél. : 01 45 92 96 96 – www.manufacturing.fr