

# TOLERANCEMENT

## L'ILLUSION DE LA COTATION EN MECANIQUE

Dans le domaine de la « mécanique » on accorde une très grande importance à la conformité des produits par rapport aux plans effectués en bureaux d'études.

Le culte de la conformité aux tolérances est-il si pertinent qu'on le dit ? N'est-ce pas une illusion dont se bercent les ingénieurs et les techniciens pour éviter de se poser les bonnes questions ?

Est-ce la solution la plus pertinente et la plus économique ?

Nous tentons ici de fournir une approche vraiment industrielle des spécifications qui tourne quelque peu le dos au culte du tolérancement tel qu'il est pratiqué actuellement par certains orthodoxes.

### Domaine de validité.

Nous précisons tout d'abord que ce qui suit s'applique aux productions sérielles. En effet pour « l'artisan » qui produit à l'unité, les résultats obtenus le sont à partir de retouches successives permettant d'atteindre l'objectif visé. Le tolérancement classique est donc adapté à cette situation. Ce n'est plus le cas en production de série où chacune des unités du produit n'est pas contrôlée de façon exhaustive.

### La réalité des résultats en production.

En production sérielle, les résultats obtenus, concernant les dimensions des objets produits, peuvent être caractérisés par :

- une loi de distribution. Le plus souvent, cette loi de distribution est une loi normale ;
- une position sur l'échelle des mesures. On utilise le plus souvent la valeur moyenne pour la caractériser ;
- une dispersion qui permet de quantifier les variations. On utilise souvent l'écart-type pour la caractériser.

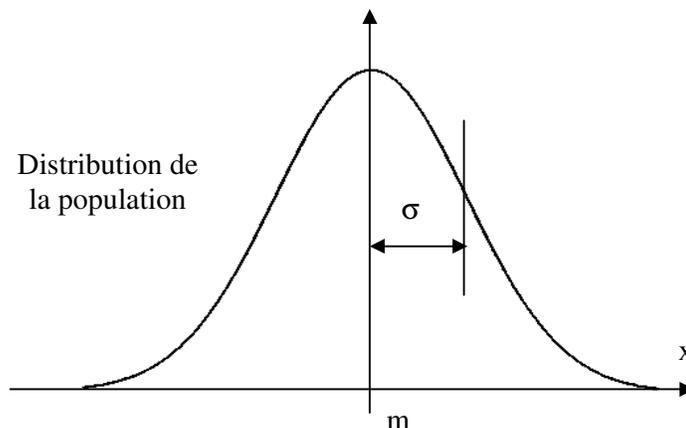


Figure N° 1. Loi normale de Laplace Gauss

Il est bon d'envisager deux cas de figure concernant le système de production des résultats ;

Soit le système est stable (Figure 2). Dans ce cas, les résultats chronologiques, portés sur un graphique de contrôle, sont répartis de façon aléatoire autour de la ligne centrale. Ils obéissent à des causes communes.

Soit le système est instable (figure 3). Les résultats sont perturbés par des causes spéciales qui n'ont rien d'aléatoire. Par exemple :

- fournisseurs de matière premières ou d'outillages différents ;
- réglages non pertinents ;
- incidents ;
- pratiques différentes selon les opérateurs ;
- ....

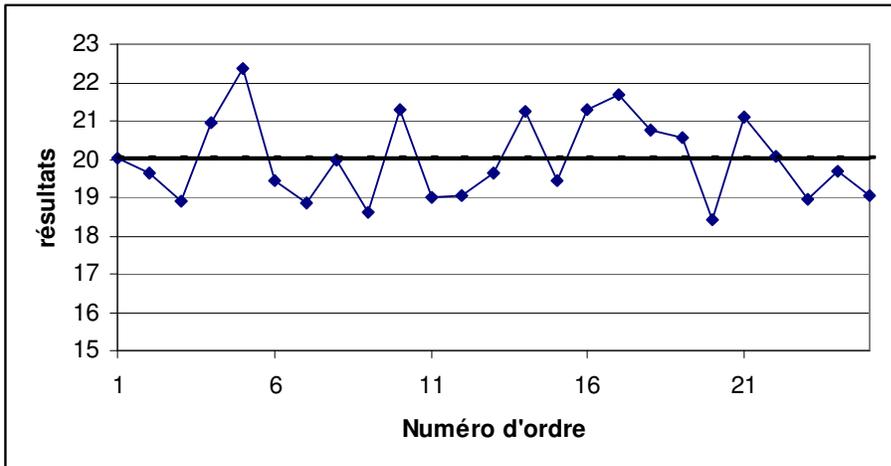


Figure N° 2. Résultats issus d'un système stable

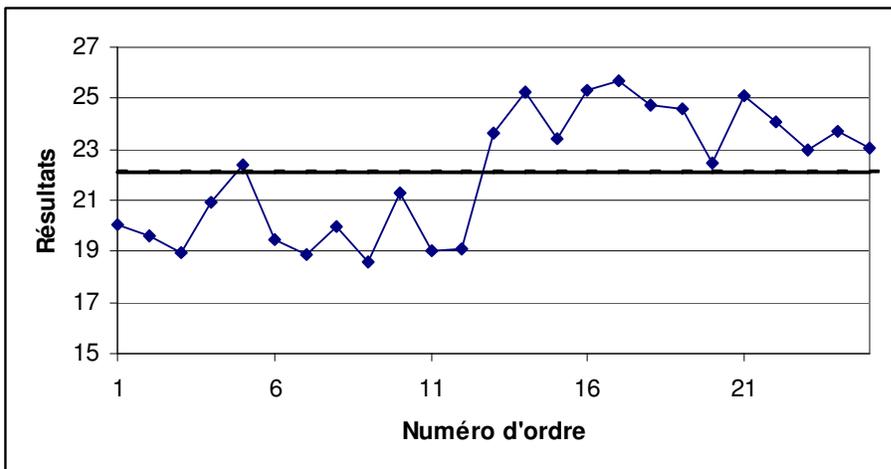


Figure N° 3. Résultats issus d'un système non stable

Il va de soi que la première tâche des « producteurs » est de tendre vers des systèmes stables afin de rendre les résultats prévisibles. Autant que faire se peut, toute cause spéciale doit être éliminée au préalable à l'exploitation d'un système de production.

***C'est seulement à partir de résultats obtenus sur des systèmes stables que l'on peut spécifier les produits.***

## **Les tolérances.**

Les ingénieurs et techniciens des bureaux d'études ont pour tâche de spécifier les produits (cotation).

Ils prétendent généralement que les limites de tolérances sont déterminées à partir des exigences fonctionnelles.

Il est de tradition de définir des limites de production appelées limites de tolérances. Dans le cas où deux limites sont prévues, la valeur médiane constitue, le plus souvent, mais pas toujours, la valeur nominale ou valeur cible. Ces limites s'appliquent à chaque unité produite.

De nombreuses normes françaises (NF) ou internationales (Iso) permettent aux concepteurs de rationaliser le tolérancement ou les définitions géométriques associées.

Nous remarquons pourtant que :

- a priori, on ne tient pas compte des moyens de production et de contrôle pour déterminer ces tolérances, puisque l'on prétend qu'elles sont seulement fonctionnelles ;
- l'aspect statistique des résultats en production est totalement occulté ;
- les moyens de contrôle pour vérifier la conformité sont rarement prévus dès la conception ;
- on fait une différence importante entre un produit dont la dimension est juste à l'intérieur d'une limite de tolérance et un autre dont la dimension est juste à l'extérieur. Pourtant, du point de vue du fonctionnement, la différence est quasiment nulle. Ces produits introduisent un coût pour le client en cas de commercialisation, qu'ils se situent juste à l'intérieur ou juste à l'extérieur de ces limites.

## **Le raccordement entre les résultats obtenus et les tolérances.**

Les producteurs sont censés réaliser des produits conformes aux tolérances prescrites en sachant que :

- En production de série, la courbe de répartition des résultats (gaussienne) ne s'arrête pas brutalement sur une limite arbitraire ;
- Tous les produits ne sont pas contrôlés (contrôle par échantillonnage) ;
- Tous les points des produits effectivement contrôlés ne seront pas vérifiés. Par exemple, on mesure une épaisseur sur un ou quelques points seulement (bipoint pour les spécialistes) ;
- des protocoles de contrôle différents peuvent conduire à des décisions différentes sur un même échantillon. Ce cas se rencontre très souvent lorsque le client et le fournisseur contrôlent en utilisant des moyens ou des procédures de contrôle qui ne sont pas parfaitement identiques.

Ceux qui produisent savent toutes les difficultés qu'ils rencontrent pour résoudre les problèmes engendrés par les tolérances classiques du fait de leur nature non opérationnelle. En fait, ils n'y parviennent jamais de façon satisfaisante et les litiges sont nombreux, augmentant ainsi sensiblement les coûts.

Se pose alors la question de la pertinence des pratiques traditionnelles de tolérancement.

Comme il est impossible de supprimer la réalité des résultats de production, bien qu'on puisse toujours améliorer les résultats en visant la cible et en réduisant les dispersions, il faut bien conclure que c'est la spécification des produits qu'il faut faire évoluer.

En effet, le tolérancement classique résulte de l'illusion selon laquelle on peut fixer des objectifs chiffrés sans tenir compte de la réalité des systèmes mis en œuvre pour y parvenir. C'est une erreur fondamentale qui fait perdre beaucoup de temps et accroît considérablement les coûts.

Ce jugement pourrait paraître farfelu s'il ne s'appuyait sur des pratiques ancestrales et sur des démarches industrielles courantes en dehors du secteur de la mécanique.

En effet, de tout temps, on a d'abord fabriqué les produits que l'on savait faire. C'est l'évolution des techniques de production qui permet de faire évoluer les caractéristiques des produits. Les concepteurs ont toujours pris en compte ces évolutions pour concevoir de nouveaux produits.

Il est vain de vouloir spécifier ce que l'on ne sait pas faire. Certaines méthodes de conception qui préconisent de concevoir les produits sous le seul aspect « fonctionnel » sont inadaptées aux contraintes industrielles. Elles conduisent inexorablement à des surcoûts.

On remarque d'ailleurs que dans bon nombre d'industries, il n'existe pas de tolérancement au sens où on l'entend en mécanique.

C'est toujours le cas, pour des raisons évidentes, lorsque le contrôle est destructif.

Par exemple, le contrôle du remplissage des produits (sachets, flacons, etc...) se fait par échantillonnage. Les protocoles prévus par l'administration pour vérifier la quantité livrée prévoient un contrôle statistique où les limites sont des seuils statistiques de décision liés à l'échantillon prélevé. Ce ne sont pas des tolérances puisque ces contrôles visent le respect du nominal seulement<sup>1</sup>.

Nous précisons bien qu'il n'existe pas de limites de tolérances classique pour le remplissage et que des sanctions pénales sont encourues dans le cas de sous remplissage **moyen** sur les lots produits.

Autre exemple, la teneur en principe actif d'un médicament n'est pas tolérancée non plus. Ce sont des protocoles de contrôle en acceptation des lots qui permettent de vérifier et d'assurer la qualité requise<sup>2</sup>.

Nous remarquons également que la méthode Shainin se propose de résoudre des problèmes de qualité sans jamais envisager la conformité à des limites de tolérances. Elle se focalise sur la qualité pour le client qui peut parfois être atteinte avec des produits considérés comme étant non-conformes.

### **Où se trouve la solution ?**

Pour proposer une solution, nous faisons appel à deux références :

- le cercle de Shewhart ;
- la définition des spécifications par W.E. Deming.

### **Le cercle de Shewhart.**

C'est dans les années 30 que W.A. Shewhart a fourni une illustration du cycle de conception réalisation des produits. Ce cercle est à la source de la roue de Deming que certains connaissent maintenant.

Shewhart explique que, traditionnellement, les étapes de conception réalisation sont franchies de façon linéaire.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Voir savoir utiliser la statistique outil d'aide à la décision et à l'amélioration de la qualité par Pierre SOUVAY éditeur AFNOR 2002

<sup>2</sup> Id à 1

<sup>3</sup> Les fondements de la maîtrise de la qualité par W.A. Shewhart éditeur ECOMOMICA 1989 traduit de Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control, publié en 1939 aux Etats-Unis.



Figure N° 4. Déroulement linéaire d'un projet.

C'est ce schéma qu'emprunte la démarche classique du tolérancement puisque le concepteur définit des valeurs limites que le fabricant s'efforce ensuite de respecter et le contrôleur de vérifier.

Shewhart préconise le schéma suivant :

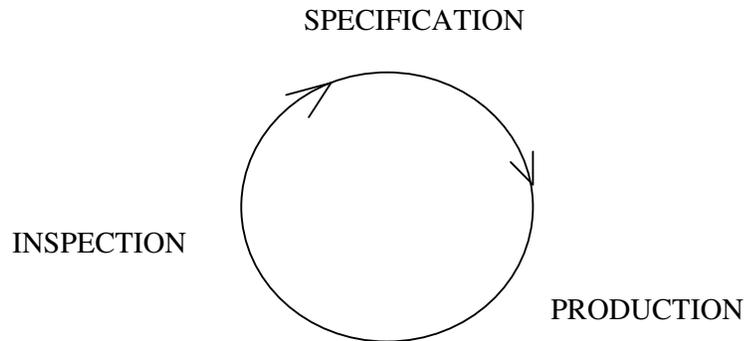


Figure N° 5. Déroulement en boucle d'un projet.

La conséquence évidente de ce cycle est que la conception doit tenir compte de la réalité de la production et de celle du contrôle pour définir le produit.

Bien entendu, nombreux sont ceux qui appliquent partiellement ce cycle, dans le cadre d'une collaboration entre les services.

En mécanique, il est pourtant plus rare que les protocoles de contrôles soient définis dans le cadre de la conception, sous forme statistique et non pas sous la forme de simples limites. C'est pourtant là que le bât blesse puisqu'en production sérielle, le contrôle ne peut être réalisé que par échantillonnage. Il est donc obligatoirement statistique.

Pour que les choses se déroulent de façon harmonieuse et au moindre coût, il faut donc que la conception s'intègre dans ce cycle en évitant le tolérancement classique qui ne tient pas compte des réalités de la production et de celles du contrôle. De plus, il faut admettre qu'une conception peut toujours être remise en cause pour des raisons de contrôle et de production. Le cycle est continu jusqu'à atteindre un équilibre économique qui peut toujours être amélioré par la suite. C'est le principe même de l'amélioration continue ; facteur de progrès.

### **Les spécifications selon W.E. Deming.**

C'est en s'inspirant des principes de Deming que Jean-Marie Gogue énonce les 5 principes d'une spécification<sup>4</sup>.

« Dans une spécification élémentaire, il faut distinguer :

<sup>4</sup> Le paradigme de la qualité par Jean-Marie Gogue éditeur ECONOMICA 1997 repris par Savoir utiliser la statistique outil d'aide à la décision par Pierre Souvay éditeur AFNOR 2002

1. La méthode de mesure (ou d'observation) d'une caractéristique. Par exemple, on vérifie une longueur avec un micromètre ;
2. Le nombre d'opérations à répéter dans les mêmes conditions. Par exemple, l'effectif d'un échantillon lors de chacune des opérations de vérification ;
3. La désignation des personnes qui feront les mesures. Par exemple, contrôle en réception ou en cours de production (les objectifs sont radicalement différents) ;
4. La méthode d'analyse des répétitions. Par exemple, calcul d'une moyenne ou construction d'un graphique de contrôle ;
5. Les limites entre lesquelles les résultats doivent se trouver. Par exemple, c'est le cas des deux limites définies autour de la valeur cible et dépendant de l'effectif de l'échantillon. Les limites de contrôle sur une carte SPC en sont un autre exemple.»

Ces 5 points permettent de construire une spécification par la définition du protocole de contrôle et donc d'une définition opérationnelle du contrôle.

Même si le produit est défini par des tolérances classiques qui ne satisfont que le premier point ci-dessus, il est nécessaire ensuite de définir les quatre autres points.

On note d'ailleurs que le tolérancement classique ne constitue pas une définition univoque des produits puisqu'en l'absence de définitions opérationnelles du contrôle, on s'expose à des conclusions d'acceptation différentes selon le protocole de vérification utilisé.

### **Comment faire ?**

Nombreux pourtant sont ceux qui par souci d'efficacité et donc de réduction des coûts, tout en assurant une qualité maximale respectent le cycle préconisé par Shewhart.

Concernant les spécifications ils procèdent de la façon suivante :

1. Les concepteurs définissent le produit en précisant des cibles (valeurs idéales à atteindre). C'est de la responsabilité des bureaux d'études ;
2. Les solutions sont validées par la construction de prototypes ou maquettes qui permettent des essais en fonctionnement et la validation en clientèle y compris pour l'aspect de la fiabilité ;
3. Des échantillons en préséries permettent de stabiliser les moyens de production envisagés et d'obtenir des produits dont les caractéristiques sont affectées par la seule variabilité naturelle de ces moyens ;
4. Les produits sont vérifiés à l'aide des protocoles de contrôle définis ;
5. La conception est validée pour vérifier si les variations induites par le système de production et de contrôle permettent d'atteindre la qualité souhaitée en clientèle et d'évaluer les risques induits. C'est de la responsabilité des bureaux d'études ;
6. Les moyens de production et de contrôle sont figés. Leurs caractéristiques font partie intégrante de la définition des produits ;
7. Des améliorations des moyens de production et de contrôle sont toujours possibles. Ces améliorations conduisent à modifier les conditions de production ou les spécifications opérationnelles de contrôle, comme le suggère le cercle de Shewhart. Ces modifications se font dans le cadre d'une collaboration étroite entre les études, la production et le contrôle.

Il va de soi que ce déroulement n'est pas linéaire. Des bouclages doivent être envisagés.

### **Et le tolérancement classique.**

Si l'on procède ainsi le tolérancement classique n'est plus utile. Bien au contraire, il perturbe le cycle puisqu'il introduit une confusion entre deux systèmes de définition des dimensions :

- l'un qui correspond à la réalité statistique des moyens de production et de ceux du contrôle ;
- l'autre qui fixe des objectifs chiffrés et ne tient pas compte de la réalité statistique des choses.

En cas de besoin et seulement si une autorité compétente, interne ou externe, le demande il est pourtant possible de définir un tolérancement classique. Les limites sont alors fixées à plus ou moins 6 écarts-types de part et d'autre de la valeur moyenne obtenue (en principe, la valeur cible définie par les études). Ces limites ne sont pas utilisées pour produire et contrôler les productions.

Il va de soi que ces limites ne sauraient se substituer aux limites de décision définies dans les protocoles de contrôle qui constituent les seules références à utiliser.

A noter qu'il est alors possible de définir une courbe d'efficacité pour chacun des contrôles prévus en rapport avec ces limites de tolérances<sup>5</sup> et que les limites à plus ou moins 6 écarts-types sont destinées à satisfaire une exigence éventuelle concernant une politique de qualité exprimée en PPM de défauts (méthode 6 sigmas).

### **Une anecdote.**

Il y a plus de 10 ans maintenant, l'anecdote suivante nous était contée :

Dans le cadre d'une éventuelle sous-traitance, une entreprise automobile nipponne avait fourni un dossier technique à une entreprise américaine.

Quelle ne fut pas la surprise des ingénieurs américains, lorsqu'ils ont consulté les plans de pièces mécaniques, seules les valeurs nominales y figuraient. Aucun tolérancement n'était prévu.

Bien entendu, on a demandé aux Japonais si leur dossier était complet.

Ces derniers ont répondu en expliquant que les propositions du client devaient comporter les prix proposés mais aussi les dispersions de leurs moyens de production. C'est à partir de ces éléments que le client prendrait sa décision.

Celui qui avait relaté ces faits voulait, tout simplement, illustrer une pratique courante au Japon qui consistait déjà à prendre en compte les moyens de production et ceux de contrôle pour définir un produit.

C'est ce que nous présentons ci-dessus.

### **Compléments.**

#### **Limites de tolérance et limites de décision.**

Attention à ne jamais confondre les limites de tolérances classiques avec les limites de décision en vue de l'acceptation ou du rejet d'un lot ou encore d'une décision d'intervention (réglage) sur les moyens de production.

En production sérielle, normalement les limites de décision sont totalement indépendantes des limites de tolérances (dans le cas où elles existent).

---

<sup>5</sup> Voir savoir utiliser la statistique outil d'aide à la décision et à l'amélioration de la qualité par Pierre SOUVAY éditeur AFNOR 2002

Les limites de décision contenues dans un plan statistique de contrôle correspondent à des données opérationnelles. Par contre, les limites de tolérances correspondent à des objectifs abstraits que l'on ne sait pas vraiment vérifier sur chacun des produits.

### **Les indicateurs de capacité.**

Ces indicateurs ( $C_p$ ,  $C_{pk}$ ,  $P_p$ ,  $P_{pk}$ ,...) ont été mis au point pour assurer la liaison entre les tolérances traditionnelles non statistiques et les résultats obtenus sur les moyens de production (résultats statistiques).

Ces indicateurs sont inutiles si l'on spécifie directement de façon opérationnelle comme indiquée plus haut.

### **Un changement de culture.**

Attention, établir des limites de tolérances relativement larges par rapport aux possibilités techniques et économiques des moyens de production ne signifie pas qu'on va utiliser cette plage de façon classique.

C'est un véritable changement de culture qu'il faut envisager. En effet, il est important de toujours chercher à respecter les valeurs cibles tout en dispersant le moins possible alors que le système classique incite à utiliser toute la plage de tolérance.

Pour y parvenir, on cherche tout d'abord à supprimer les causes spéciales. Ensuite, on s'efforce de réduire les dispersions naturelles des procédés afin d'obtenir des résultats individuels aussi proches que possible des valeurs cibles.

Des résultats dont la mesure est différente de la valeur cible ont toujours une incidence négative sur le comportement des produits en clientèle et sur les coûts en clientèle, c'est pourquoi, il faut toujours tendre vers la « perfection »<sup>6</sup>.

L'amélioration continue des moyens de production et de contrôle, pour assurer la qualité perçue par le client est un facteur d'efficacité et de « compétitivité des produits »<sup>7</sup>. Le concept de « juste nécessaire » qui conduit à exploiter complètement les plages de tolérances est une aberration économique. Il faut absolument lutter contre ce concept, facteur d'altération de la qualité et donc de mécontentement des clients.

### **Les spécifications et les principes de W.E. Deming<sup>8</sup>.**

W.E. Deming a énoncé 14 principes à destination des managers occidentaux.

Les 10<sup>ième</sup>, 11<sup>ième</sup> et 12<sup>ième</sup> principes mettent l'accent sur les dangers des objectifs chiffrés et leurs conséquences.

Il propose de préférer d'avoir recours à de meilleures qualités managériales et aux définitions opérationnelles.

La cotation traditionnelle entre dans le champ des recommandations de Deming. En effet, les tolérances classiques sont effectivement des objectifs chiffrés. Elles compliquent souvent les opérations puisque les limites ne sont pas toujours établies de façon rationnelle, tenant compte des réalités de la production. Leur présence nécessite des raccords difficiles entre deux concepts très différents.

---

<sup>6</sup> Voir la fonction perte de qualité de Taguchi.

<sup>7</sup> Au sens que certains utilisent sans doute encore, c'est-à-dire qu'on ne devrait pas fournir plus que les besoins exprimés par les clients.

<sup>8</sup> W.E. Deming est à l'origine de la qualité à la Japonaise que les constructeurs automobiles occidentaux s'efforcent de copier.

Nous ne croyons pas abuser de la pensée de Deming en écrivant que le système de tolérancement classique (les objectifs chiffrés) encourage à la médiocrité<sup>9</sup>. En tout état de cause, en fixant des limites, il freine l'amélioration continue, à la base de la compétitivité industrielle.

On note d'ailleurs que DEMING condamnait fermement toute direction par objectifs chiffrés ; en effet, la fixation de ces objectifs ne tient généralement pas compte des systèmes mis en œuvre :

- soit les objectifs sont trop faibles et on perd en efficacité puisque l'on s'arrête d'améliorer lorsque le niveau visé est atteint ;
- soit les objectifs sont trop ambitieux ou inadaptés et ils conduisent les responsables à tricher pour faire croire qu'ils les ont atteint (sinon ils seront punis).

Mieux vaut bien connaître les systèmes, et les améliorer de façon continue pour atteindre les meilleures performances.

**Il faut proscrire les objectifs chiffrés au bénéfice de la maîtrise et de l'amélioration des processus. C'est tout simplement une question d'efficacité et de performance<sup>10</sup>.**

**Pour conclure.**

Les concepts présentés peuvent perturber les certitudes acquises au fil des ans et remettre en cause certaines des pratiques en vigueur dans les programmes d'enseignement et celles de ceux qui s'en tiennent aux objectifs chiffrés pour définir les spécifications.

Loin de nous l'idée de contester à tout prix les méthodes classiques de tolérancement.

Pourtant notre expérience et nos observations nous conduisent à en saisir les limites.

Nous préconisons donc de faire en sorte que les étudiants adoptent, dès leur formation, des méthodes de conception efficaces qui prennent en compte les différentes étapes de l'industrialisation et l'aspect statistique des résultats.

Pierre SOUVAY professeur agrégé de génie mécanique  
[pierre.souvay@wanadoo.fr](mailto:pierre.souvay@wanadoo.fr)

---

<sup>9</sup> C'est d'ailleurs un principe général, valable dans tous les domaines.

<sup>10</sup> Voir le manuscrit de Jean-Marie GOGUE « la culture du résultat » : <http://www.fr-deming.org/CultResultat.pdf>