

Revue Polytechnique, Novembre 2005

Routes & Déroutes

Sur les traces d'un jeune ingénieur qui se lance dans la microtechnique

Fabien Bourgeois, Yuri L. de Meneses, Jacques Jacot

René Descartes est un jeune ingénieur en mécanique. Il vient de trouver un travail dans une PME de l'Arc jurassien, sous-traitant microtechnique. Le tout petit, c'est ça l'avenir, lui avait-on dit.

Petites séries, petits problèmes

Premier jour. L'ancien qui lui remet son poste est là, et lui transmet la pile de dossiers des clients. Le premier dossier attire son attention, il est marqué "URGENT" en rouge. Après quelques banalités, l'ancien l'avertit : *Fais attention, le premier dossier vient de notre plus gros client.* Sur le pas de la porte, il lui lance encore un *Bonne chance !* et s'en va en riant.

Le jeune René ouvre le dossier. Il lit : Délai... C'était hier, ça commence bien ! Il parcourt le dossier et constate qu'il s'agit d'un produit composé seulement de deux pièces à assembler. En y regardant de plus près, il constate que les pièces doivent avoir entre elles un jeu de six microns pour que le fonctionnement soit correct. C'est petit, il avait plutôt l'habitude d'une vingtaine de microns, lorsqu'il consultait les normes pour ses dessins. Et ce qu'il construisait fonctionnait toujours. Bien-sûr, il ne faisait que des prototypes, mais là, la série demandée -une série zéro- n'était que de vingt pièces ; il se dit que si nécessaire, le mécanicien pourrait bien ajuster les quelques assemblages récalcitrants. Après tout, il y a moins d'un ordre de grandeur de différence entre ce jeu et ceux qu'il mettait à l'école.

Le patron passe, lui souhaite la bienvenue, et d'une voix ferme lui demande que le dossier "URGENT" soit traité au plus vite, il rend visite au client le lendemain et doit lui amener les pièces. *Quitte à bloquer un mécanicien toute l'après-midi !* RD reprend les dessins sur son logiciel de conception 3D, il fixe les tolérances, six microns à répartir sur deux pièces, pas difficile, ça fera trois et trois, et dans tous les cas ça marche !

Paire ou impair ?

Avant midi, il s'en va d'un bon pas à l'atelier, souriant déjà à l'idée de classer l'affaire, mais néanmoins anxieux de devoir, lui le jeune débutant, imposer ce travail urgent dès son premier jour au plus ancien mécanicien. L'affaire est rondement menée et en fin d'après-midi, il reçoit ses pièces, court à l'atelier avant quatre heures pour demander à un opérateur de faire des heures supplémentaires pour effectuer le montage. Non sans heurt, il trouve un volontaire, promettant que le problème est très simple, qu'il sera vite réglé. Il a parlé trop tôt. Les trois premières pièces essayées ne rentrent pas, il n'y a pas de jeu ! Le temps presse, le mécanicien est déjà parti, donc impossible de reprendre les pièces. Il y en a peu, et ils décident de mesurer les axes et les trous ; les pièces sont toutes dans les tolérances, le mécanicien a bien travaillé, mais ils n'ont pas eu de chance en montant les premières pièces. Il décide simplement de mettre les grandes pièces ensemble. Bref, ils apparaissent. Il n'en avait jamais entendu parler à l'école, mais c'est la première idée qui lui est venue, cela devrait marcher, il faut parfois être pragmatique.

Grosses séries, gros problèmes

Troisième jour. Le patron revient avec le sourire : c'est bien René, ils en veulent dix mille. René se crispe, ça fait 500 fois plus que l'autre jour, et il avait passé une heure avec l'opérateur à appairer et ajuster ces pièces. Total : 1000 heures. Pas possible de s'y prendre de la même manière. Ah et c'est pour dans dix jours, ajoute-t-il en posant sa tasse de café.

Il faut trouver une autre solution. On l'a prévenu que tout le monde est très chargé en ce moment, en particulier au fraisage. René décide de sous-traiter une des deux pièces. La pièce mâle sera décollée ici, et la pièce femelle sera fraisée à l'atelier mécanique voisin. RD retourne derrière son écran, il reprend le dessin de ses pièces. Il faut qu'ils puissent usiner plus vite et que l'assemblage soit le plus simple possible. *Design for manufacturing, design for assembly, design for X*, il

a vu toutes ces méthodes à l'Ecole d'ingénieurs, il s'agit de retrouver vite comment les mettre en pratique. Il saute de son bureau à l'atelier. Revient en courant, repart, toute la matinée. Comment répartir les tolérances ? La dernière fois, ils n'ont pas pu les tenir, enfin surtout au fraisage. Il en discutera avec son collègue du bureau de construction. Va voir le chef de l'atelier mécanique d'à côté, il a l'habitude de faire des pièces pour l'industrie automobile, il a de bons conseils !

Il jauge le p'tit jeune. C'est quoi ta valeur cible ? Depuis l'école de recrue, il n'avait plus entendu parler de cible. Il se demande ce que cela vient faire dans son problème de tolérance. Et quelle dispersion a la fraiseuse avec cet outil pour la passe de finition ? Non, il n'est pas peintre en bâtiment, le rapport entre la dispersion et son problème lui échappe. Mais l'oeil rieur du chef d'atelier, lui, ne lui échappe pas, et il accueille avec un grand soulagement le *Si vous avez encore des questions, n'hésitez pas !* qui clôture leur conversation. Il reviendra, c'est sûr, mais il ne faudrait pas être trop ridicule.

Probabilités et statistique, utiles uniquement pour la loterie ?

Retour, il se plonge dans ses vieux livres de cours. Dispersion, variabilité, c'est sigma (σ) ! Il n'avait jamais pensé que la statistique pourrait servir à la production. Il avait d'improbables souvenirs probabilistes, à peine suffisants pour comprendre qu'il ne devait pas jouer à la loterie. Il s'égaré dans un chapitre sur Six Sigma, découvre les indices de capabilités et repart à l'atelier.

L'auteur mettait en garde contre une utilisation imprudente des résultats de mesure. Il veut en avoir le coeur net. Il fait refaire un lot de vingt, et mesure. Plutôt deux fois qu'une. Il veut connaître la reproductibilité de son instrument. Il trouve $\sigma_{instrument} = 0,5 \mu m$. Sa tolérance IT étant de $6 \mu m$, il calcule son rapport précision sur tolérance $\frac{P}{IT} = \frac{6\sigma_{instrument}}{IT} = 0,5$. Il aurait bien voulu $1/10$ puisque le livre dit que l'instrument de mesure doit être dix fois plus précis que ce qu'il veut mesurer, ou à défaut se contenter de $1/4$, mais là, ça semble un peu juste.

Il soupçonne que son instrument de mesure lui biaise ses mesures. Mais de combien ? Instinct de survie ou don du ciel, à l'instant, il lui revient du cours de stat' que les variances s'additionnent, donc $\sigma_{mesure}^2 = \sigma_{reel}^2 + \sigma_{instrument}^2$. Sur ses vingt pièces, il mesure $\sigma_x = 2,5 \mu m$ pour les pièces fraisées et $\sigma_y = 1,5 \mu m$ pour les décolletées. Pour les décolletées, il trouve $\sigma_{reel} = 1,4 \mu m$, ouf, il respire, le biais dû à l'instrument de mesure n'est pas si grand. Il repart le soir en se demandant comment il pourrait prévoir le nombre d'assemblages conformes sur la série qu'il va lancer, en fait il souhaite savoir combien de pièces il doit lancer pour être sûr d'avoir le nombre d'assemblages demandé.

En manque de repères

Les lois normales. Cette fois il a eu la soirée pour feuilleter ses livres de cours. Deux pièces, les variances s'additionnent. Donc si son procédé d'assemblage est parfait, la variance de son assemblage doit furieusement ressembler à la somme de celles de ses composants. $\sigma_a^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 \Rightarrow \sigma_a = 2,9 \mu m$, il arrondit à $3 \mu m$. Que donne la capabilité s'il considère le 99% de ses pièces : $C_p = \frac{IT}{6\sigma} = 0,33$, mmmh pas bon.

Il faut que la dispersion de ses pièces soit au moins inférieure à l'intervalle de tolérance. Il manque de repères. Comment se fait-il qu'à l'école tout fonctionnait sans problème, il contrôlait seulement s'il avait mis une tolérance d'usinage assez serrée. Ah mais oui, il avait alors des plages fonctionnelles de vingt microns : $C_p = 1,11$, qu'il aurait eu. Il comprend que tant que sa capabilité ne vaudra pas au moins un, il s'exposera à des problèmes en fin d'après-midi...

Un problème d'intégration

Simplement resserrer les tolérances, il risque le goudron et les plumes, le mécanicien lui a bien dit qu'il était aux limites de la décolleteuse et de la fraiseuse. Comment obtenir que toutes les pièces donnent des assemblages conformes ? Le rendement de son assemblage l'obsède. Il regarde une courbe droit dans les yeux, il la dévisage, elle est normale, eureka, il a trouvé, il l'intégrera, non sans lui avoir fixé des limites.

Mais alors son rendement ? $\mathcal{Y} = 68\%$! Déprimant. Il ne peut pas espérer mieux que deux tiers d'assemblages conformes. Comment est-ce possible ? Il reprend son point de comparaison : et s'il avait une plage fonctionnelle de vingt microns ? $\mathcal{Y} = 99,9\%$! Ben si c'est ça la microtechnique...

Montre-moi ton autre chemin !

Le jour d'après, il repasse à l'atelier mécanique voisin, pour discuter avec le gars qui fait des pièces pour l'automobile. Le p'tit jeune lui a mis des cotes cibles et des écart-types. Le regard bon enfant du voisin devient admiratif. René lui explique

que si l'écart-type n'est pas le même, c'est qu'il sera plus difficile à tenir pour vous au fraisage que pour eux au décolletage.

Ben il a simplement fait des pièces et mesuré ce qu'il produisait. Il aurait voulu mettre une dispersion plus faible, mais son mécanicien lui a dit que ce n'était pas possible, qu'il était aux limites des machines. René doit encore vérifier, mais il suppose que la dispersion dépend du procédé d'usinage, de la matière et de l'habileté de l'opérateur. Il a dû remettre tellement de choses en question depuis son premier jour.

Par exemple, il a dû changer sa méthode de conception. A l'école, il partait de sa plage fonctionnelle pour fixer les spécifications sur les composants. Ensuite, il élargissait éventuellement les tolérances si possible. Il avait vu suite à sa première série que ce n'était pas applicable dans ces dimensions. Il aurait pu jeter presque toutes les pièces, ou ajuster tous les assemblages.

Alors il est parti des variabilités des machines pour établir les spécifications, et le rendement n'est même pas garanti. D'ailleurs avec les spécifications qu'il a mises, $\sigma_x = 2,5 \mu m$, $\sigma_y = 1,5 \mu m$, un tiers des assemblages ne se fera pas du premier coup ! Ensuite il appairera... Le voisin se demande si le jeune lui jette de la poudre aux yeux ou s'il faut le croire. Mi-amusé, il lui glisse qu'il tire toujours au même endroit, mais pas forcément au centre de la cible.

Une dérive cauchemardesque

Ça, René Descartes n'y avait pas pensé. Pour lui, c'était évident qu'il fallait toujours viser le centre de la cible. Il consulte son propre mécanicien qui lui dit très sérieusement qu'il règle généralement sa machine sur la borne supérieure de la tolérance, comme ça il peut aller travailler plus longtemps sur d'autres machines avant que les pièces ne soient sous la borne inférieure de la tolérances.

Il n'en croit pas ses oreilles. Si la lente dérive d'Heyerdahl vers les Polynésiennes l'avait fait rêver, celle de son mécanicien le fait cauchemarder. RD se rend alors compte qu'il a parcouru beaucoup de chemin en une semaine. Que le chemin à venir ne sera pas moins long, et surtout qu'il ne peut pas le faire seul.

Un nouveau mode de tolérancement, l'inertiel

Cette fois, il dessine deux lois normales sur deux calques. Il les fait glisser horizontalement devant lui (figure 1). Et si elles étaient décentrées ? Mais si elles sont décentrées du même côté, rien ne change. Donc si le voisin tire à côté de sa cible pour la première pièce, il doit tirer dans la même direction pour la seconde et les assemblages resteront conformes. Et s'il tire du côté opposé, alors il n'y aura presque plus d'assemblages conformes.

Il calcule que si son voisin est de $2 \mu m$ à côté de la cible, il perd encore 10% d'assemblages conformes. Pour se faire une idée, il reprend son repère de $20 \mu m$. 0,1%. Il ne perdrait que 0,1% si son voisin décentrait de $2 \mu m$ dans ce cas. Cette fois, il y a deux ordres de grandeur de différence. Il constate que l'écart à la cible a dans certains cas des conséquences bien plus graves que l'augmentation de la dispersion. Donc il mettra une tolérance sur la variabilité et sur le décentrage. Ou les deux en même temps. Il se dit que si son écart-type est faible, il peut se permettre davantage de décentrage, et réciproquement. Il retombe sur la fonction de perte de Taguchi qu'il avait croisé dans un livre sur la qualité. Cette fois, il comprend, il fera du tolérancement inertiel.

La nécessité d'une nouvelle vision

Que d'aventures pour un assemblage de seulement deux composants. Auparavant, il s'imaginait concevoir des constructions gigantesques, comprenant de nombreuses pièces complexes. Il se prend maintenant à rêver de simplicité, de nouveaux moyens d'assemblage, où il pourrait mesurer la fonction pendant l'opération, avec des moyens d'ajuster cette fonction.

Le premier jour, il était arrivé en pensant appliquer ce qu'il avait appris à l'école, il ne se s'était pas douté des nouveaux chemins qu'il devrait emprunter. *L'usage du monde* de Nicolas Bouvier aurait dû lui mettre la puce à l'oreille : *On croit qu'on va faire un voyage, mais bientôt c'est le voyage qui vous fait, ou vous défait.*

Le Laboratoire de Production Microtechnique de l'EPFL (Prof. Jacot) travaille sur le développement et l'application du tolérancement inertiel en collaboration avec l'Université de Savoie (Prof. Pillet) et des industriels romands et savoyards, dans le cadre d'un projet franco-suisse Interreg "Tolérancement de systèmes assemblés".

Contact

Fabien Bourgeois
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Institut de Production et Robotique (IPR)
Laboratoire de Production Microtechnique (LPM)
EPFL-IPR-LPM ; Station 17
CH-1015 Lausanne

++41 21 693 59 57
fabien.bourgeois@a3.epfl.ch

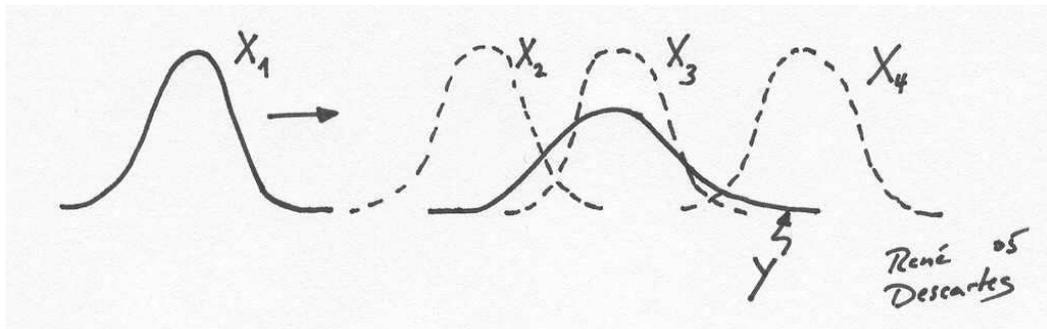


FIG. 1 – Les lois normales des composants X et Y. Celle de X qui glisse horizontalement est dessinée en quatre positions, X_1 , X_2 , X_3 et X_4 .