

Optimisation de la performance d'un processus d'usinage à commande numérique

1 Exposé du problème à résoudre

L'exemple utilisé pour cette présentation a été présenté par NISSAN lors du « Symposium Taguchi » organisé en 1992 aux USA par l'American Supplier Institute ¹.

Il concerne l'usinage, sur une machine à commande numérique, des engrenages des boîtes de vitesses. Afin d'assurer la longévité du fonctionnement de ces engrenages, NISSAN effectuait, aussitôt après leur usinage, un traitement thermique conventionnel dont la durée était environ 10 heures.

L'introduction d'un nouveau traitement thermique par induction (à haute fréquence) permettait de réduire la durée de ce traitement à 1 minute, tout en garantissant la résistance mécanique et la durabilité requises. Mais, en contrepartie de ce gain de temps considérable, le traitement nécessitait un acier d'une dureté supérieure, d'au moins 30 unités Rockwell, par rapport au procédé antérieur. Il en résultait de plus grandes difficultés pour assurer correctement la précision de l'usinage des engrenages avant leur traitement thermique.

La variabilité des dimensions des engrenages usinés devenait un problème critique.

¹ Cet exemple est relaté dans l'ouvrage « Taguchi Methods for Robust Design » de Yuin WU et Alan WU, édité en 2000 par The American Society of Mechanical Engineers New York

La démarche classique d'optimisation d'un tel processus d'usinage, aurait consisté à :

- sélectionner, parmi tous les engrenages susceptibles d'être usinés sur le poste d'usinage à commande numérique concerné, celui jugé le plus représentatif, par ses caractéristiques dimensionnelles et fonctionnelles, ainsi que par son volume de production,
- définir les valeurs nominales des 5 ou 6 cotes essentielles à respecter.

Un plan d'expériences aurait ensuite été réalisé (selon l'approche Taguchi) afin de déterminer la configuration optimale des différents paramètres du processus d'usinage permettant de minimiser conjointement pour chacune d'elles :

- la dispersion des valeurs mesurées, par rapport à leur moyenne « y »
- et
- l'écart entre cette valeur moyenne « y » et la valeur cible à atteindre.

Dans l'hypothèse vraisemblable où la robustesse de la précision de l'usinage de cet engrenage aurait été significativement améliorée, il aurait ensuite été nécessaire de vérifier et/ou adapter les valeurs des différents paramètres du processus d'usinage pour chacune des autres références d'engrenages usinés sur cette machine.

Les ingénieurs de NISSAN choisirent une autre voie.

Ils considèrent la machine à commande numérique comme un *système dynamique* (cf. figure 1)

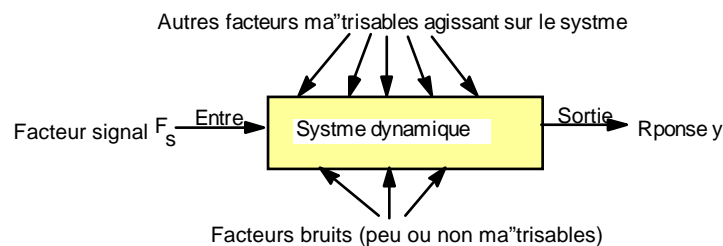


Figure 1

dans lequel :

- le *signal d'entrée* « F_s », est la dimension programmée sur la machine
- et
- la *réponse de sortie* « y », est la dimension réellement obtenue.

Il est évident que la relation idéale devant exister entre le signal d'entrée F_s et la réponse de sortie y , est :

$$y = F_s$$

Il est également évident que *cette relation doit être respectée pour chacune des configurations possibles des natures et des dimensions d'usinage susceptibles d'être effectuées sur ce type de machine.*

Dans cette optique, les ingénieurs NISAN inventorièrent toutes les opérations élémentaires d'usinage, relatives à l'ensemble des références d'engrenages des boîtes de vitesses, telles que :

- opération 1 : fraisage plan horizontal longueur x_1 largeur y_1
- opération 2 : fraisage plan vertical hauteur x_2 largeur y_2
- opération 3 : tournage extérieur diamètre x_3 longueur y_3
- opération 4 : alésage diamètre x_4 longueur y_4
- opération 5 : rainurage largeur x_5 profondeur y_5 longueur y_6 , etc. ...

Ils définirent ainsi 66 opérations élémentaires d'usinage.

Pour assurer la précision des cotes de l'ensemble des engrenages usinés sur la machine à commande numérique, *il fallait donc optimiser conjointement 66 relations « $y = F_s$ » différentes !*

Pour réduire l'ampleur du travail à réaliser, les ingénieurs NISSAN eurent l'astuce de concevoir une « éprouvette » regroupant les 66 configurations inventoriées.

Le dessin réel de cette éprouvette n'a pas été divulgué, mais la figure 2 permet d'en comprendre le principe.

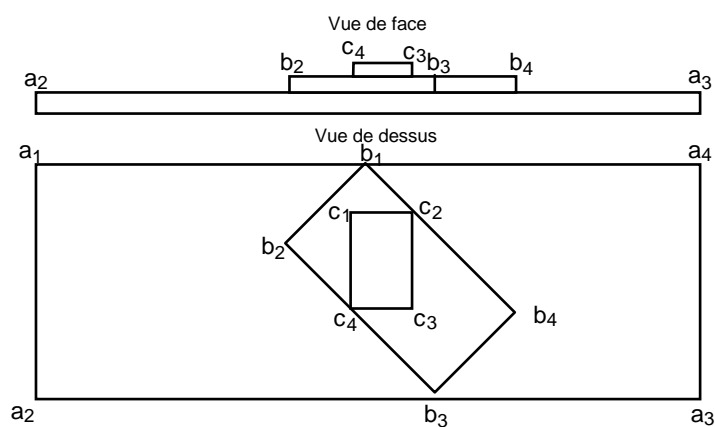


Figure 2

A partir des distances entre 2 points de référence $a_1, a_2, \dots, c_3, c_4$, les 66 valeurs à donner au facteur signal, c'est-à-dire *les valeurs qui seront à programmer sur la machine* pour l'usinage d'une éprouvette, sont :

- m_1 = distance entre a_1 et a_2
- m_2 = distance entre a_1 et a_4
- m_3 = distance entre a_1 et a_3
- m_4 = distance entre a_1 et b_4
- m_5 = distance entre a_1 et b_1
- " " " " " "
- m_{66} = distance entre c_3 et c_4

Ces valeurs sont récapitulées sur la courbe de la figure 3.

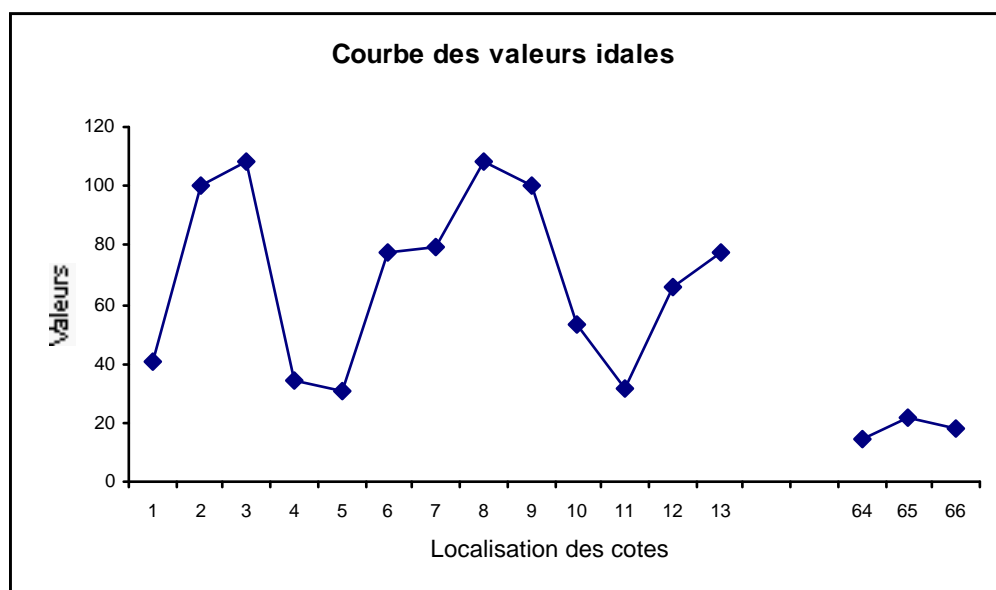


Figure 3

La forme de cette courbe continue, est absolument quelconque. Elle dépend de l'ordre de classement des 66 configurations inventoriées et de leurs valeurs individuelles respectives.

2 Modalités pratiques d'optimisation du processus d'usinage

Rappel préalable sur la mesure de la performance d'un système dynamique

Dans la machine à commande numérique, considérée comme un système dynamique (cf. figure 1), la relation idéale devant exister entre chacune des valeurs F_s programmées (le facteur signal d'entrée) et la dimension y réellement obtenue correspondante (la réponse de sortie), est : $y_i = F_{si}$

Toutefois, dans la réalité, divers autres facteurs facilement maîtrisables (tels que les paramètres d'affûtage et les matériaux des outils, la profondeur de passe, la vitesse de coupe, etc...) agissent également sur le système et peuvent influencer qualitativement et quantitativement sur cette relation. De plus, des facteurs parasites peu ou non maîtrisables (telles que les variations chimiques et structurales de l'acier usiné, les variations de la tension d'alimentation électrique de la machine, etc.), peuvent la perturber de façon sporadique.

Pour une configuration donnée de ces deux types de facteurs, la performance réelle résultante du système est quantifiée, de façon synthétique, par un ratio dénommé « Signal/Bruit » prenant simultanément en compte :

- les écarts constatés entre les valeurs idéales et les valeurs moyennes réelles obtenues correspondantes,
- les dispersions, par rapport à leurs moyennes respectives, des valeurs individuelles (mesurées sur les éprouvettes usinées), qui traduisent la sensibilité du système aux facteurs bruits qu'il subit.

La formule de calcul du ratio Signal/Bruit² est telle que, *plus la valeur globale de ces 2 causes de variabilité est faible, plus sa valeur algébrique est grande, et meilleure est la performance du système.*

Grâce à l'éprouvette regroupant les 66 configurations d'usinage exécutables sur la machine à commande numérique, *l'optimisation de son fonctionnement se limite donc à fiabiliser l'usinage de cette éprouvette.*

Pour améliorer sa performance, la démarche est logiquement :

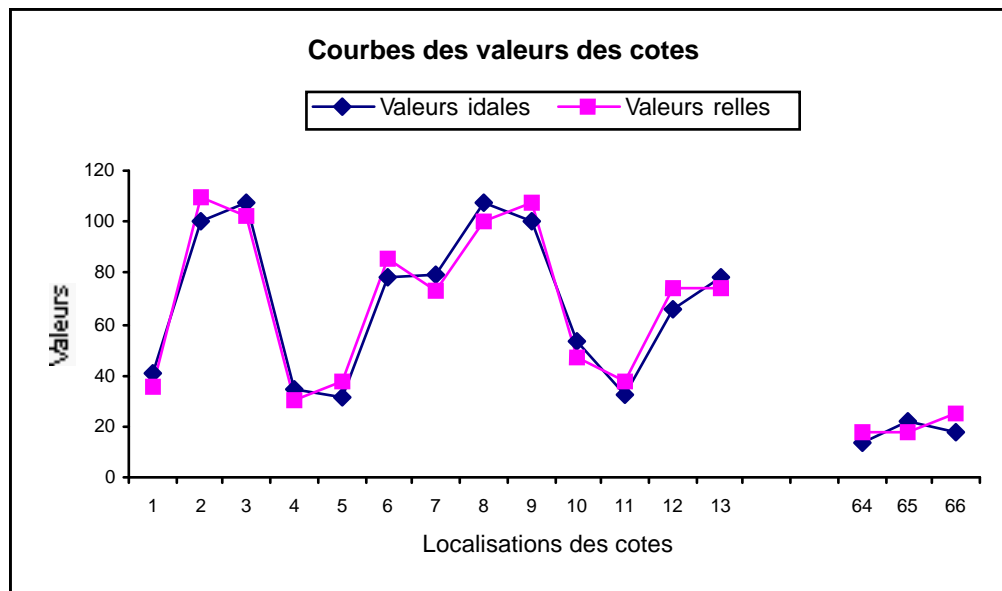
- 1 - Définir la relation idéale devant exister entre le signal d'entrée et la réponse de sortie.
Elle est matérialisée par la courbe de la figure 3 ci-dessus.
- 2 - Déterminer la relation existant réellement.
Pour une configuration bien définie des paramètres de réglage de la machine, on mesurera sur chacune des éprouvettes qui seront usinées à partir des 66 valeurs programmées ci-dessus, les 66 valeurs correspondantes réellement obtenues. En récapitulant leurs moyennes respectives sur une courbe, il sera aisé de les comparer à leurs valeurs idéales correspondantes (cf. figure 4).
- 3 - Calculer, à l'aide du ratio Signal/Bruit, la valeur synthétisant la performance correspondante du système.
(Voir ci-dessus les commentaires relatifs à cet indicateur de performance)
- 4 - Conduire un plan d'expériences pour trouver la combinaison des bonnes valeurs des facteurs maîtrisables testés, qui maximisera la valeur du ratio Signal/Bruit.

Toutes les 66 valeurs du facteur signal étant regroupées sur une seule éprouvette, les répliques de chacun des essais du plan d'expériences sont limitées aux seules combinaisons des valeurs des facteurs bruits éventuellement testés³.

Cette approche, récemment développée et promue par G. Taguchi, permet d'assurer globalement la robustesse qualitative de toute une famille de produits, et de réduire considérablement leurs cycles de développement technologique et d'industrialisation.

² La formule du ratio Signal/Bruit relatif à une relation continue non linéaire, est explicitée § 7.2.2 du chapitre « Mesure de la performance d'un système dynamique » du livre « Pratique industrielle des plans d'expériences Taguchi - La qualité au moindre coût » édité chez AFNOR.

³ Ce traitement particulier est effectué pour étudier la sensibilité du système à des facteurs bruits bien identifiés (cf. § 8.2.2 du livre cité ci-dessus).



(Pour une meilleure lisibilité des 2 courbes, tous les écarts ont été volontairement très amplifiés)

Figure 4

Remarques

1 - Dans l'approche dynamique « classique » :

- chacun des essais du plan d'expériences est répliqué pour chacune des valeurs données au facteur signal,
- si l'expérimentation comporte également le test de facteurs bruits, chacune des répliques précédentes est elle-même répétée pour chacune des combinaisons de valeurs de ces facteurs bruits.

Pour que le nombre total d'essais à réaliser ne soit pas prohibitif, le nombre des valeurs données au facteur signal est généralement inférieur à 10.

Dans le cas de l'exemple NISSAN, il faut saisir pour chacun des essais du plan d'expériences, les 66 valeurs mesurées sur les éprouvettes usinées, correspondant aux 66 valeurs du facteur signal programmées sur la machine à commande numérique. Pour que la saisie puis l'exploitation des résultats soient simples et fiables, il faut pouvoir disposer d'un logiciel spécialement adapté⁴.

En dehors de cette particularité "matérielle", la suite du traitement des résultats du plan d'expériences est strictement classique.

2 - L'optimisation globale des performances de la machine à commande numérique pourrait aussi être traitée selon les modalités propres aux systèmes statiques.

Il suffirait de faire la somme arithmétique des valeurs absolues des 66 écarts constatés entre les valeurs idéales programmées et celles réellement mesurées sur les éprouvettes usinées. Cette somme, qui représente la synthèse des écarts, serait alors considérée comme un *critère à minimiser*.

Cette solution est beaucoup plus simple à exploiter, car on ne prend en compte qu'un seul critère intégrateur : la somme des valeurs absolues de tous les écarts individuels.

Mais, du fait de la proportionnalité existant généralement entre la valeur d'un écart et la valeur nominale correspondante, cette solution présente l'inconvénient de minimiser l'impact des écarts relatifs aux cotes de valeurs nominales les plus faibles. Cet inconvénient peut toutefois être atténué en pondérant, plus ou moins arbitrairement, chacun des écarts par un coefficient destiné à tous les mettre sur un pied d'égalité⁵

⁴ Le logiciel KitTag vient d'être doté d'un nouveau module permettant de saisir et exploiter jusqu'à 100 valeurs individuelles.

⁵ Cette solution a été utilisée avec succès dans l'exemple d'optimisation d'un revêtement carbone de très faible épaisseur, traité page 175 du livre précédemment cité.