



HAL
open science

Détection du dérèglement le plus probable d'un processus d'usinage par outil coupant

Boukar Abdelhakim, Maurice Pillet, Eric Pairel

► **To cite this version:**

Boukar Abdelhakim, Maurice Pillet, Eric Pairel. Détection du dérèglement le plus probable d'un processus d'usinage par outil coupant. Conception & Production Intégrées, Oct 2013, Tlemcen, France. papier 297. hal-00926535

HAL Id: hal-00926535

<https://univ-smb.hal.science/hal-00926535v1>

Submitted on 9 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détection du dérèglement le plus probable d'un processus d'usinage par outil coupant

Boukar Abdelhakim, Maurice Pillet, Eric Pairel
Laboratoire SYMME - Université de Savoie
BP 80439, 74944 Annecy-le-Vieux Cedex, France

Résumé— L'usinage d'une pièce mécanique est caractérisé par le déplacement des outils pour générer les surfaces de la pièce. Ce déplacement répété des outils au contact des pièces successives génère de la variabilité sur les outils qui sont à l'origine des écarts sur les pièces. Il faut donc régulièrement mesurer la (les) dernière(s) pièce(s) produite(nt) et comparer la mesure à la géométrie cible pour corriger ces écarts. Un réglage initial des outils est également nécessaire avant le lancement de la série de pièces. De ce fait, on doit agir sur un certain nombre de paramètres réglables de la machine. Dans le cas d'usinage par machine-outil à commande numérique, on agit principalement sur les correcteurs d'outils. Dans un processus de fabrication, la pièce usinée est soumise à l'action de plusieurs outils de coupe auxquels on associe des correcteurs, pour corriger soit leur position, soit leur forme. Le choix du meilleur réglage possible est trivial si chaque caractéristique n'est impactée que par un seul correcteur. Le problème est différent et plus complexe lorsque chaque caractéristique est impactée par plusieurs correcteurs et qu'il existe par conséquent une structure d'interdépendance entre ces caractéristiques. Cet article présente une stratégie originale consistant à identifier la combinaison de réglage qui compense au mieux le décentrage global de la pièce sur l'ensemble de ses caractéristiques. On fait l'hypothèse que la situation mesurée est la résultante d'un décalage d'un nombre fini d'outils. Si on trouve une combinaison de réglage qui reproduit au mieux l'ensemble des dérèglements constatés, il est alors fort probable que ce soit la bonne combinaison de réglages à réaliser.

Mots-clés : Machine-outil, usinage, correcteur, pilotage, inertiel

I. INTRODUCTION

Le pilotage des usinages consiste à identifier les paramètres réglables de la machine permettant de compenser les écarts à la cible constatés sur la pièce usinée. Dans les processus de fabrication à commande numérique, la relation entre les caractéristiques et les correcteurs est complexe : plusieurs correcteurs agissent sur plusieurs caractéristiques. Le dérèglement simultané de plusieurs outils va avoir une incidence sur un groupe de caractéristiques. Trouver le réglage optimum consiste d'une part à identifier le groupe de correcteurs impliqués et d'autre part la valeur de la correction à effectuer sur chacun de ces correcteurs.

L'objectif de l'article consiste à proposer une approche originale permettant de déterminer, parmi l'ensemble des correcteurs du processus, le groupe de correcteurs responsables

du dérèglement global du processus observable sur l'ensemble des caractéristiques de la pièce (une caractéristique est toute grandeur quantifiable sur la pièce, à savoir les cotes usinées ou points palpés sur les surfaces de la pièce). La démarche proposée consiste à identifier si une action simultanée sur quelques correcteurs permettrait de reproduire au plus près l'ensemble des décentrages observés sur les caractéristiques. Ce groupe de correcteurs, et les corrections associées, constituerait la bonne action corrective permettant de recentrer la pièce sur sa cible. Nous l'appellerons « dérèglement le plus probable ».

L'action de chaque correcteur sur une ou plusieurs caractéristiques de la pièce peut avoir un impact positif ou négatif sur la qualité globale du processus. Pour déterminer l'action optimale de l'ensemble des variables de contrôle d'un processus sur les caractéristiques contrôlées, Del Castillo et al. [1] utilise la fonction désirabilité qui a pour objectif de transformer mathématiquement un problème multi-réponses en un problème à une seule réponse. Xu et al. [2] se base également sur la désirabilité pour minimiser la valeur de la distance maximale globale tout en respectant les exigences sur les caractéristiques cibles individuelles. Etant donné que la qualité du processus dépend du choix des variables de contrôle, Najafi et al. [3] propose de sélectionner les variables de contrôle du processus par estimation des variances des caractéristiques contrôlées. Tous ces auteurs se basent sur un modèle de polynôme du second degré pour relier les variables de contrôle du processus aux caractéristiques contrôlées.

Ribeiro et al. [4] s'appuie sur la fonction perte de Taguchi et, en tenant compte de la structure de corrélation entre les facteurs de réglage de processus, propose une approche qui permet de minimiser le coût de production d'un processus multi-varié. Sa démarche consiste à enlever par prédiction le coût lié à la mauvaise qualité du coût global de la fabrication du produit.

Plus récemment, Pillet et al. [5] a proposé une approche de réglage de machine permettant de prendre en compte l'information en colonne contenue dans la matrice d'incidence pour détecter la dérive d'outil afin de déterminer le réglage à effectuer sur l'outil décentré. L'idée étant de disposer d'une carte de contrôle multidimensionnelle par correcteur. Il se base sur la distance statistique T^2 de Hotelling [6] pour détecter la dérive d'outil. Cet article complète ces travaux en prenant en compte la totalité de l'information contenue dans la matrice d'incidence pour déterminer le groupe de correcteurs responsables du dérèglement global du processus.

L'approche sera présentée en se basant sur le Pilotage Inertiel Multicritères dont le principe consiste à minimiser l'inertie¹ sur l'ensemble des caractéristiques fabriquées. Nous retiendrons à titre d'illustration la pièce simple de tournage en figure 1 pour illustrer nos propos.

II. PROCESSUS DE FABRICATION

Le processus de fabrication est un processus d'usinage (de tournage) dans lequel il y a quatre outils (1 à 4) représenté sur la figure 1. Les trois premiers outils ont chacun un correcteur de translation suivant l'axe Z (correcteur T1z, T2z et T3z), l'outil 4 à deux correcteurs de translation en Z (T4aZ et T4bZ) puisqu'il usine sur ces deux faces. Pour l'illustration de nos propos, on se contentera de piloter l'axe z, la généralisation à un ensemble tridimensionnel est aisée. La figure 1 donne une représentation de la pièce avec les correcteurs associés à chaque outil.

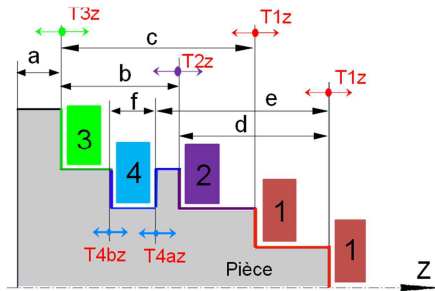


Figure 1. Pièce et processus de fabrication

III. LE PILOTAGE INERTIEL MULTICRITERES

A. Principe du Pilotage Inertiel Multicritères

Le Pilotage Inertiel Multicritères [7] [8] est une approche de pilotage des usinages qui consiste à minimiser l'inertie sur l'ensemble des caractéristiques de la pièce, en recherchant les actions optimales sur le vecteur de correcteurs.

Pour le cas d'usinage par outil coupant, on cherche à relier les écarts mesurés sur les cotes de la pièce aux décalages (d) sur les correcteurs d'outils grâce à la matrice d'incidence [a] (voir table I). L'équation 1 donne l'expression matricielle qui lie ces paramètres.

$$(\delta_{cotes}) = [a] \cdot (d_{correcteurs}) + \varepsilon \quad (1)$$

δ_{cotes} : vecteur d'écarts initiaux sur les cotes a, b, c, d, e et f

$d_{correcteurs}$: vecteur de décalages sur les correcteurs T1z, T2z, T3z, T4az et T4bz

ε : vecteur de résidus

B. Construction de la matrice d'incidence des correcteurs sur les cotes

La matrice d'incidence des correcteurs sur les cotes peut être obtenue par calcul de façon automatique ou manuelle. Dans cet article nous procédons par l'approche manuelle pour permettre au lecteur de comprendre comment elle est construite.

¹ L'inertie est un indicateur de qualité de produit défini par la norme française XP E04-008

Tout d'abord commençons par l'outil 1 (voir figure 1). Cet outil est corrigé suivant l'axe Z en agissant sur le correcteur T1z (translation suivant Z). Le décalage de T1z de +1 sur Z positif, va augmenter les cotes c, d et e de 1 (voir table I). Le décalage de T2z de +1 sur Z+ va augmenter la cote b de 1 et diminuer la cote d de 1. Il en va de même pour les autres correcteurs.

La table I donne la matrice d'incidence des correcteurs sur les cotes.

TABLE I. MATRICE D'INCIDENCE

Cote	Valeur cible (mm)	d_{T1z}	d_{T2z}	d_{T3z}	d_{T4az}	d_{T4bz}
δ_a	5	0	0	1	0	0
δ_b	15	0	1	-1	0	0
δ_c	25	1	0	-1	0	0
δ_d	20	1	-1	0	0	0
δ_e	23	1	0	0	-1	0
δ_f	6	0	0	0	1	-1

Cette matrice permet de calculer les valeurs de corrections connaissant les écarts sur les cotes. Le calcul de la correction se fait par la pseudo-inverse de Gauss de cette matrice [8]. L'équation 2 donne la relation qui permet de calculer les valeurs des décalages sur les correcteurs permettant de compenser les écarts constatés.

$$(d_{correcteurs}) = [a^t a]^{-1} a^t \cdot (\delta_{cotes}) \quad (2)$$

Avec $[a^t a]^{-1} a^t$: pseudo-inverse de Gauss appelé matrice de pilotage.

La table II donne la matrice de pilotage.

TABLE II. MATRICE DE PILOTAGE

	δ_a	δ_b	δ_c	δ_d	δ_e	δ_f
d_{T1z}	1	0.33	0.67	0.33	0	0
d_{T2z}	1	0.67	0.33	-0.33	0	0
d_{T3z}	1	0	0	0	0	0
d_{T4az}	1	0.33	0.67	0.33	-1	0
d_{T4bz}	1	0.33	0.67	0.33	-1	-1

Pour calculer les corrections obtenues avec k correcteurs ($1 \leq k \leq 5$ pour l'exemple), on ne retient que les colonnes des correcteurs concernés dans la matrice d'incidence de la table I. La Table III donne par exemple la matrice d'incidence pour les deux correcteurs T1z et T3z.

TABLE III. MATRICE D'INCIDENCE POUR 2 CORRECTEURS

Cote	Valeur cible (mm)	d_{T1z}	d_{T3z}
δ_a	5	0	1
δ_b	15	0	-1
δ_c	25	1	-1
δ_d	20	1	0
δ_e	23	1	0
δ_f	6	0	0

Ce qui donne la matrice pseudo-inverse donnée dans la table IV qui permet de calculer la correction obtenue pour ces deux correcteurs.

TABLE IV. MATRICE DE PILOTAGE POUR LES 2 CORRECTEURS

	δ_a	δ_b	δ_c	δ_d	δ_e	δ_f
d_{T1z}	0.125	-0.125	0.25	0.375	0.375	0
d_{T3z}	0.375	-0.375	-0.25	0.125	0.125	0

Si l'on considère la matrice d'incidence avec ces deux correcteurs, on remarque que la cote f de valeur cible 6 mm n'est pas modifiée par les correcteurs T1z et T3z car ils n'ont aucune incidence sur elle.

IV. DEFINITION DU CRITERE DE QUALITE DE LA PIECE

On définit la qualité d'une cote mesurée par la capacité inertielle qui compare l'inertie maximale tolérée à l'inertie mesurée:

$$Cpi = \frac{I_{max\ tolérée}}{I_{mesurée}} \quad (3)$$

Avec, dans le cas général d'un lot de pièces :

$$I_{mesurée} = \sqrt{\sigma^2 + \delta^2} \quad (4)$$

δ : décentrage par rapport à la cote cible

σ : écart-type de la population

Dans notre cas, une seule pièce est mesurée et l'inertie de sa cote est alors uniquement son écart à la cible :

$$I_{mesurée}^2 = \delta^2 \quad (5)$$

La capacité résiduelle est calculée à partir des écarts supposés après réglage qui se calcule par l'équation (6).

$$(\delta_{après}) = (\delta_{avant}) + [a] \cdot (d_{correcteurs}) \quad (6)$$

La qualité globale de la pièce dépend de la qualité de chacune de ses cotes. Une configuration de correcteurs peut améliorer les capacités sur une partie des cotes et dégrader les capacités sur d'autres. Comparons deux situations de réglage qui améliorent les cotes à différentes échelles de capacité. Une des situations permet d'avoir des capacités favorables sur une partie des cotes et défavorables sur une autre partie, l'autre situation permet d'avoir le contraire de la situation précédente, il est difficile de déduire directement la meilleure entre les deux situations. Il faut donc définir un critère de choix qui puisse prendre en compte l'ensemble des capacités sur les cotes afin d'identifier la correction permettant d'obtenir la meilleure qualité sur la pièce. Del Castillo et al. [1], Xu et al. [2], Kim and Lin [9] ou Stueur [10] ont montré, dans leurs publications respectives, que pour des processus sur lesquelles on agit sur plusieurs variables d'entrée pour obtenir des réponses sur plusieurs variables de sortie, la fonction désirabilité, permet, à partir d'une seule valeur, de déterminer l'ensemble de valeurs de variables d'entrée qui permettent d'optimiser les réponses en sortie. Cet ensemble ainsi déterminé permet de maximiser la désirabilité.

La désirabilité est fondée sur la moyenne géométrique des variables standardisées (ratio entre le décentrage et la dispersion compris entre 0 et 1) à optimiser. Xu et al. [2] fait une liste de variables standardisées à optimiser des différentes

approches proposées dans la littérature. Dans notre cas, nous avons choisi comme variable à optimiser, la capacité inertielle (ratio entre l'inertie maximale tolérée et l'inertie mesurée) des caractéristiques fabriquées. La capacité étant déjà une variable standardisée, il n'est pas nécessaire d'utiliser la désirabilité (variable entre 0 et 1) et l'optimisation sera réalisée en recherchant la meilleure moyenne géométrique des capacités. La moyenne géométrique, contrairement à la moyenne arithmétique, privilégie les situations de compromis. L'équation 7 donne la moyenne géométrique des capacités élémentaires sur les cotes.

$$\mu = (Cp1xCp2x \dots xCpn)^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Cpi} \quad (7)$$

1) Définition de la limite maximale de Cpi

L'objectif de la moyenne géométrique est de trouver un équilibre de compromis entre les écarts de plusieurs cotes. La question est la suivante : à partir de quand l'amélioration sur une cote n'est plus intéressante du point de vue de la qualité ?

L'utilisation de la moyenne géométrique brute (sans limite maximale sur la valeur des capacités) ne donne pas le meilleur compromis de la correction en termes des capacités. Prenons l'exemple d'un correcteur qui agit sur deux cotes. La première correction possible est excellente sur la première cote (exemple $Cpi = 100$) mais mauvaise sur la seconde (exemple $Cpi = 0.2$). Une seconde correction possible donnerait une correction très correcte sur la première cote ($Cpi = 2.9$) et un Cpi moyen sur la seconde ($Cpi = 1$). La moyenne géométrique donnerait respectivement (4.47 et 1.7) pour les deux corrections. On conçoit aisément que la seconde correction donne le meilleur compromis car les capacités obtenues sont proches de la valeur standard de la capacité dans les entreprises, pourtant la première correction donne une moyenne géométrique brute supérieure par rapport à la seconde. Il convient donc de modifier la relation (7) :

$$\mu = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \min(Cpi, Cpi_{optimal})} \quad (8)$$

Il faut donc trouver la valeur $Cpi_{optimal}$. A long terme on vise une inertie sur la cote telle que $Cpi > 1.33$ (Standard arbitraire actuel des entreprises). Pour cela on sait que l'inertie court terme nécessaire est telle que $Cpi > 2$. Après réglage il est nécessaire de viser un $Cpi > 2$.

Si on prend un $Cpi_{optimal}$ trop grand, le compromis va privilégier des améliorations de capacité inutiles sur certaines cotes au détriment d'améliorations utiles sur d'autres.

Si on prend un $Cpi_{optimal}$ trop petit, on atteindra vite une situation où tous les Cpi seront écrêtés, et on ne saura pas faire la différence entre deux réglages différents.

Tenant compte de ces remarques, on a pris de façon arbitraire un Cpi de 3 pour définir cette limite.

Avec cette limite, les moyennes géométriques du petit exemple précédent deviennent respectivement (0.77, 1.7) la seconde solution ressort facilement comme la meilleure.

V. METHODE DE SELECTION DE LA MEILLEURE CONFIGURATION DE REGLAGE

On fait l'hypothèse que le décentrage observé est le résultat du dérèglement d'un nombre q de correcteurs parmi les n possibles. Le calcul de la correction consiste donc à calculer l'exhaustivité des combinaisons possibles sur n correcteurs (dans la méthode appelée Forward) ou une sélection de combinaisons (méthode appelée Backward) pour trouver la combinaison qui compense mieux le décentrage observé (critère de maximisation de la désirabilité).

La méthode Forward a pour principe de rechercher la meilleure configuration de correcteurs en comparant, pour un nombre n fini de correcteurs, toutes les configurations de q correcteurs ($0 \leq q \leq n$). Le nombre de combinaisons de correcteurs (NC) réalisées est calculé par l'équation 9 :

- n : nombre total de correcteurs
- q : nombre de correcteurs sélectionnés pour corriger

La méthode Forward demande un temps de calcul qui croit très rapidement avec n .

Pour réduire le temps de calcul, qui est une contrainte imposée par la méthode Forward, nous avons mis en place la méthode Backward qui consiste à partir du calcul du meilleur réglage possible (minimisation des inerties) en réglant tous les correcteurs, puis à diminuer progressivement le nombre de correcteurs en enlevant le correcteur qui apporte le moins en termes de qualité sur la pièce, pour ainsi trouver la meilleure configuration de n correcteurs sur n , $n-1$ sur n , ... 1 sur n . La meilleure configuration sera déterminée lorsqu'une cassure apparaît sur la courbe de la moyenne géométrique des capacités.

La figure 2 donne une indication du dérèglement le plus probable sur un exemple de processus à n correcteurs.

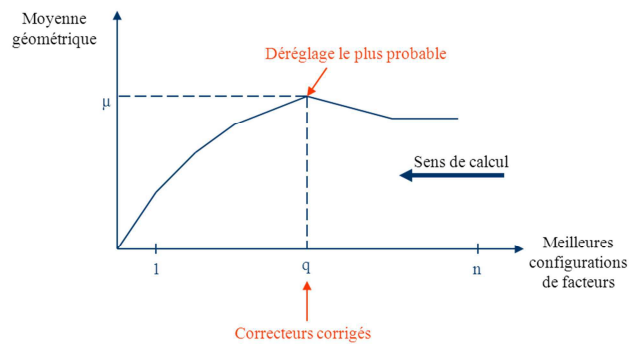


Figure 2. Indication du dérèglement le plus probable

Nous avons constaté que les deux solutions Backward et Forward conduisaient à des solutions de réglage identique. La méthode Forward étant moins gourmande en temps de calcul (résultat immédiat quel que soit le nombre de correcteurs), c'est la solution que nous avons retenue.

Un second indicateur qui peut compléter ce premier indicateur est le Cpi mini atteint sur l'ensemble des caractéristiques. Entre deux situations qui auraient des moyennes géométriques proches, il est préférable de prendre la situation maximisant le Cpi le plus petit. Nous avons donc deux indicateurs à optimiser : d'une part la moyenne géométrique qui doit être la plus grande possible et d'autre part maximiser le plus petit Cpi. Pour faire ce compromis, nous aurons recours une seconde fois à la moyenne géométrique entre la moyenne géométrique des Cpi et le Cpi le plus faible.

VI. SIMULATION DE REGLAGE ET DISCUSSIONS

Afin d'illustrer la méthode proposée, nous simulons le réglage sur une pièce à partir des écarts sur les cotes reportés dans la table V. Nous allons ensuite déterminer le meilleur réglage pour l'ensemble de ces cotes et montrer l'importance de filtrage par la limite maximale de capacité optimale sur le choix de la meilleure configuration de réglage.

TABLE V. CARACTERISTIQUES DE LA PIECE AVANT REGLAGE

Cote cible	Ecart mesuré (δ)	Inertie maximal tolérée	Inertie mesurée
a	-0.2	0.25	0.2
b	-0.5	0.25	0.5
c	0.9	0.25	0.9
d	0.7	0.25	0.7
e	0.2	0.25	0.2
f	0.25	0.25	0.25

L'action des correcteurs permet de calculer l'inertie probable après réglage. Après réglage, l'inertie sur chaque cote peut être calculée prévisionnellement par l'équation 10 :

$$I^2_{\text{après réglage}} = \delta^2_{\text{après}} + \sigma^2 \quad (10)$$

Qui s'écrit lorsque le réglage se fait sur une pièce :

$$I^2_{\text{après réglage}} = \delta^2_{\text{après}} \quad (11)$$

$\delta_{\text{après}}$ est calculé par l'équation 6.

Cette inertie permet de calculer les moyennes géométriques et les plus petites capacités inertielles sur les cotes qu'on obtient après réglage. La table VI donne la moyenne géométrique et la plus petite capacité inertielle pour les meilleurs réglages en utilisant un correcteur, deux correcteurs, etc. pour une limite maximale de $C_{pi_{\text{optimal}}}=3$.

TABLE VI. CARACTERISTIQUES DE LA PIECE APRES REGLAGE

Action de réglage sur :	Moyenne géométrique	Plus petite Capacité	Correcteurs corrigés				
			T1z	T2z	T3z	T4az	T4bz
1 correcteur	0.97	0.50	√	x	x	x	x
2 correcteurs	1.44	0.50	√	x	x	√	x
3 correcteurs	1.56	0.87	√	√	x	√	x
4 correcteurs	1.793	1.06	√	√	√	√	x
5 correcteurs	1.793	1.07	√	√	√	√	√

La croix dans la cellule montre que le correcteur sur la ligne n'est pas corrigé. La figure 3 donne l'évolution des deux indicateurs suivis : la moyenne géométrique et la plus petite capacité.

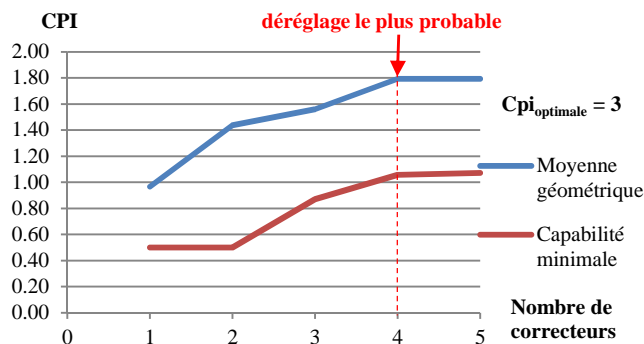


Figure 3. Evolution de la moyenne géométrique et de la plus petite capacité en fonction des meilleures configurations des facteurs

La figure 3 montre que l'augmentation du nombre de correcteurs jusqu'à 4 apporte un gain à la fois sur la moyenne géométrique et sur la plus petite capacité. Entre 4 et 5 on note un palier. Le déréglage simultanée des quatre correcteurs T1z, T2z, T3z, et T4az donne une signature de déréglage proche du déréglage observé. On dira que ce déréglage est le déréglage le plus probable. C'est donc ces correcteurs qui seront corrigés pour rapprocher la pièce usinée de sa cible.

Le calcul précédent a été fait avec le choix arbitraire d'une coupure du Cpi à 3. L'augmentation de cette valeur de coupure n'aurait pas d'incidence sur le résultat dans le cas présenté. Cependant pour d'autre cas, comme nous l'avons discuté précédemment, cela privilégie dans la moyenne géométrique des améliorations de capacité sur certaines cotes inutiles.

Une valeur de coupure plus faible aurait une influence dans la recherche du déréglage le plus probable. Plus la valeur de coupure est faible, moins on va donner d'importance à la moyenne géométrique des capacités, l'optimisation se fera

alors uniquement sur la valeur du Cpi le plus faible. La figure suivante donne un exemple avec un Cpi de coupure de 0.6.

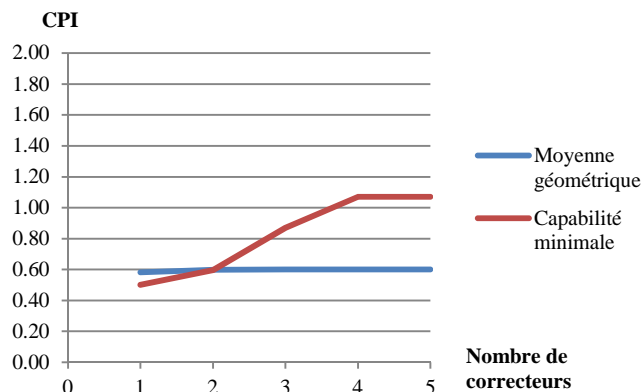


Figure 4. Evolution de la moyenne géométrique et de la plus petite capacité pour un Cpi optimale de 0.6

VII. CONCLUSION

L'approche présentée dans cet article que nous avons appelé « déréglage le plus probable » permet de détecter le déréglage globale de la pièce sur l'ensemble de ses cotes. Le groupe de correcteurs responsable du déréglage global de la pièce ainsi déterminé constitue avec une forte présomption l'ensemble des correcteurs à corriger pour recentrer le processus sur la cible. Cependant, nous avons vu avec la méthode Forward que le nombre de configurations de réglage parmi lesquelles on doit trouver le déréglage le plus probable peut atteindre le million qu'avec une vingtaine de correcteurs. Avec la méthode Backward, on cherche le déréglage le plus probable en diminuant progressivement le nombre de correcteurs. Dans tous les cas dans les deux méthodes on doit faire un choix judicieux parmi plusieurs configurations de réglage qui améliorent différemment les cotes de la pièce. Pour cela on doit tenir compte de deux critères d'optimisation sur l'ensemble des cotes. Le premier critère est la moyenne géométrique des capacités qui donne le meilleur compromis de réglage sur l'ensemble des cotes. Le second est la capacité minimale sur l'ensemble des cotes. En fixant la capacité de coupure pour ces deux critères, on détermine le meilleur réglage pour une combinaison de q correcteurs parmi n possibles. L'évolution de ces deux critères en fonction du nombre de correcteurs impliqués nous donne la combinaison la plus probable des correcteurs dérèglés. Le bon réglage de la machine consiste alors à réaliser la correction inverse de la « signature » des décentrages trouvés avec cette approche.

L'approche proposée a d'autant plus d'intérêt que le nombre de dépendances entre les cotes augmente. C'est le cas des productions actuelles. En effet les machines-outils modernes réalisent souvent les pièces en une seule phase ce qui augmente la dépendance entre les cotes.

REFERENCES

- [1] E. Del Castillo, D. C. Montgomery and D. R. McCarville, "Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization," Journal of Quality Technology, vol. 28, no. 3, July 1996
- [2] Kai Xu, D. K. J. Lin, L-C. Tang and M. Xie, "Multiresponse systems optimization using a goal attainment approach," IIE Transactions (2004),

- [3] S. Najafi, A. Salmasnia and R. B. Kazembadeth, "Optimization of Robust Design for Multiresponse Problem," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 9, pp. 1566-1577, 2011
- [4] Jose L. D. Ribeiro, F. S. Fogliato and Carla S. ten Caten, "Minimizing Manufacturing and Quality Costs in Multiresponse Optimization," *Journal: Quality Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 559-569, 2001, DOI: 10.1080/08982110108918686
- [5] M. Pillet, B. Abdelhakim, E. Pairel, B. Rizzon, N. Boudaoud and Z. Cherfi, "Multivariate SPC for Total Inertial Tolerancing," *Qualita 2013*, Compiègne, France
- [6] R. L. Mason and J. C. Young, "Multivariate Statistical Process Control with Industrial Application," *ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability*, Copiright© 2002 by the American Statistical Association and the Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN: 0-89871-496-6, 2002
- [7] M. Pillet, E. Pairel, J-L Maire et B. Abdelhakim, "Différentes stratégies de filtrage en Pilotage Inertiel Multicritères," *CPI'2011*, Oujda-Maroc
- [8] M. Pillet, "Améliorer la productivité, déploiement industriel du tolérancement inertiel," *EYROLLES, Editions d'Organisation* ISBN : 978-2-212-54754-2, 2010
- [9] K-J. Kim and D. J. J. Lin, "Simultaneous optimization of mechanical properties of steel by maximizing exponential desirability functions," *Appl. Statist.*, 2000, 49, part 3, pp. 311-325
- [10] D. Steuer, "Multi-Criteria –Optimisation and Desirability Indices," *Universtät Dortmund*, March 1999