



HAL
open science

Ajustement des procédés multivariés par contraction des limites de contrôle et en prenant en compte le coût de chaque paramètre de réglage

Eric Pairel

► **To cite this version:**

Eric Pairel. Ajustement des procédés multivariés par contraction des limites de contrôle et en prenant en compte le coût de chaque paramètre de réglage. 2020. hal-02963643

HAL Id: hal-02963643

<https://hal.science/hal-02963643>

Submitted on 11 Oct 2020

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.

Ajustement des procédés multivariés par contraction des limites de contrôle et en prenant en compte le coût de chaque paramètre de réglage

Traduction de l'article «Multivariate process adjustment by boundary contraction and taking the cost of each setting parameter into account», publié le 6/10/2020 dans «**The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**»
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05957-9>

Éric Pairel

Univ. Savoie Mont Blanc, SYMME, F-74000 Annecy, France
eric.pairel@univ-smb.fr
<https://orcid.org/0000-0002-3931-7238>
Tel. +33 (0)4 50 09 65 61
Fax +33 (0)4 50 09 65 43

Résumé :

Le problème de l'ajustement des paramètres d'un procédé, qui crée de la dispersion et de la dérive sur les caractéristiques de ses produits, est extrêmement courant en entreprise. Bien qu'ancien, il n'a pourtant encore aucune solution satisfaisante. Pour le résoudre, ce problème est d'abord formulé sur un modèle variationnel direct à constante de temps, qu'il est toujours possible d'établir pour un tel procédé. Des limites de contrôle et une cible sont à choisir pour chacune des caractéristiques-qualités du produit. Un ajustement est recherché si au moins une caractéristique du dernier produit, est en-dehors de ses limites. Il est calculé par optimisation d'un problème consistant à contracter les limites contenant les caractéristiques vers leurs cible. Appliqué à une production simulée de cent cinquante pièces, «l'ajustement par contraction des limites» aboutit à deux fois moins d'ajustements que la méthode des moindres carrés et permet surtout de maîtriser, automatiquement, la qualité de toutes les caractéristiques.

Mots clés : Maîtrise statistique des procédés (SPC) ; Ajustement statistique des procédés (SPA) ; Écart quadratique moyenne minimale (MMSE) ; Réglage ; Ajustement par contraction des limites (BCA)

1 Introduction

Le problème abordé dans cet article est celui du réglage des procédés de fabrication créant une dérive et une dispersion des caractéristiques de leurs produits. C'est évidemment un problème extrêmement courant dans les industries et qui pourtant n'est toujours pas résolu de façon satisfaisante d'un point de vue pratique et même d'un point de vue scientifique pour les procédés que nous considérons. Ces procédés ont les particularités assez fréquentes suivantes :

- Ils n'ont pas de dynamique, c'est-à-dire qu'une modification de leur réglage change aussitôt les caractéristiques de leurs produits.
- Ils créent une dérive progressive des

caractéristiques. C'est particulièrement le cas des procédés d'usinage dont les outils s'usent au cours de la production et donc font dériver les cotes.

– Ils sont réglés au regard des caractéristiques mesurées sur leurs produits.

– Les caractéristiques ont toutes une dispersion aléatoire instantanée créée par le procédé de fabrication mais aussi par le procédé de mesure si bien qu'on ne connaît pas précisément leurs tendances centrales qu'il faut pourtant corriger.

Actuellement, dans les entreprises, ces procédés sont la plupart du temps ajustés par des régleurs s'appuyant uniquement sur leur expérience. Ils sont parfois un peu aidés par la

mise en place de cartes de contrôle SPC qui leur permettent de savoir quand régler. Les cartes les plus couramment utilisées sont la carte de Shewhart [1] et la carte aux limites élargies[2].

La carte de Shewhart utilise des limites disposées symétriquement autour de la cible, en-dessous desquelles il a été montré, par Deming [3], qu'il ne fallait pas chercher à corriger la caractéristique car alors on augmentait sa dispersion. Ces limites sont calculées à partir du risque alpha d'avoir la caractéristique au-delà des limites de contrôle et alors que sa dispersion est parfaitement centrée sur la cible.

La carte aux limites élargies est une variante de la carte de Shewhart permettant d'accepter des écarts dépassant les limites alpha. Elle est utile lorsqu'on souhaite minimiser le nombre de corrections de la caractéristique notamment en raison du coût de chaque correction. Ces limites sont calculées à partir du risque bêta d'avoir l'écart de la caractéristique en-deçà des limites de contrôle et alors que la dispersion de cette dernière en est, en fait, au-delà et génère $p\%$ de valeurs hors tolérance (généralement $p = 10$).

Lorsque plusieurs caractéristiques sont surveillées, une carte multivariée est statistiquement plus efficace que plusieurs cartes de Shewhart. On pourra trouver une description des cartes multivariées dans [4] et [5]. La plus connue d'entre-elles a été inventée par Hotteling [6]. Néanmoins il semble que ces cartes multivariées ne puissent pas prendre en compte de limites élargies. De plus, comme toutes les cartes SPC, elles ne font que détecter une situation hors contrôle. Le problème du réglage n'est absolument pas abordé par le SPC.

D'autres propositions ont été faites pour apporter des solutions au problème de la correction d'une caractéristique dispersée. L'ensemble de ces techniques forme un autre champ disciplinaire, moins connu que le SPC, appelé le *réglage statistique des procédés* ou *Statistical Process Adjustment* (SPA) en anglais. Del Castillo en est le principal promoteur aujourd'hui. Il a notamment fait une synthèse de ces techniques en 2006 [7]. La très grande majorité des propositions concerne l'ajustement d'un seul paramètre agissant sur

une seule caractéristique.

Le problème de l'ajustement de plusieurs paramètres agissant simultanément sur plusieurs caractéristiques dispersées est beaucoup moins abordé dans la littérature relative à l'ajustement statistique des procédés (SPA). Del Castillo *et al.* [8] et Liu *et al.* [9] proposent des méthodes pour l'ajustement d'un procédé multivarié initialement mal réglé mais qui ne dérive pas. Ce problème du SPA est connu sous le nom de *setup adjustment problem* ou *problème du réglage initial* en français. Pour les procédés qui dérivent, Tseng *et al.* [10] propose un contrôleur EWMA fondé sur un modèle direct linéaire d'influence des paramètres sur les caractéristiques et permettant de minimiser la moyenne des écarts quadratiques (MMSE) des caractéristiques par rapport à leurs cibles. Une proposition similaire a été faite par Del Castillo *et al.* [11] pour les procédés à dérive. Yang *et al.* [12] ajoute, au contrôleur EWMA, la détection par une carte multivarié : un réglage est calculé si la variable statistique de la carte, franchit une limite. Cette stratégie est également celle proposée par Runger *et al.* [13].

Govind *et al.* [14] s'interrogent sur la forme optimale du domaine limite à l'intérieur duquel il ne faut pas régler et étudient deux formes : ellipsoïdale correspondant à une limite sur l'écart quadratique moyen ; et parallélépipédique, correspondant à une ou deux limites sur chaque caractéristique.

C'est cette dernière stratégie que nous allons utiliser dans la méthode d'ajustement proposée dans cet article et qui laisse le choix du type de carte *mono-varié* sur chaque caractéristique. Cependant, pour calculer l'ajustement, nous n'utiliserons pas la minimisation de l'écart quadratique moyen, mais la minimisation du plus grand des écarts, ce qui revient, nous le verrons, à contracter de façon homothétique les limites de contrôle de toutes les caractéristiques. Nous avons donc baptisé cette méthode, l'*ajustement par contraction des limites* ou BCA pour *Boundary Contraction Adjustment* en anglais.

En outre nous considérons que le réglage du procédé ne modifie pas les dispersions des caractéristiques mais seulement leurs tendances centrales. Cette hypothèse est probablement vérifiée dans la plupart des cas

car les réglages effectués sont de faibles amplitudes. En effet, la décision de corriger est liée aux limites de contrôles qui, elles-mêmes, dépendent de la dispersion. Donc cette dernière ne doit pas être modifiée par l'ajustement.

Nous considérons aussi que le procédé de mesure n'introduit pas de biais lié par exemple à une mauvaise justesse.

Notons que si l'on utilise un domaine parallélépipédique, alors il ne faudrait pas utiliser l'écart quadratique moyen minimum pour calculer l'ajustement. En effet, ce critère peut conduire à des valeurs sur les caractéristiques à nouveau hors domaine.

La première partie de cet article (section 2) présente la forme générale du modèle variationnel direct nécessaire à l'ajustement par contraction des limites. La deuxième partie (section 3) présente les idées-forces et l'algorithme de cette méthode d'ajustement. La troisième partie (section 4) présente les résultats obtenus, par simulation d'une production de 150 pièces, sur les quatre caractéristiques qualité de la pièce, et les compare à ceux obtenus par l'ajustement systématique par la minimisation de l'écart quadratique moyen (MMSE). La Conclusion (dernière section) liste les nombreux avantages de la méthode BCA sur la méthode MMSE à commencer par la réduction très importante du nombre de réglages effectués pendant la production et la possibilité de prendre en compte des paramètres d'ajustement très coûteux.

2 Modèle variationnel direct du procédé physique à « piloter »

Il existe plusieurs méthodes permettant d'établir un modèle variationnel direct d'un procédé : une modélisation par les lois de la physique, de la géométrie, ou par une approche purement empirique, permet d'obtenir un

modèle mathématique. Qu'elle que soit la méthode, le modèle variationnel direct peut se mettre sous la forme donnée par l'équation (1), dans laquelle δy_i est la variation de la caractéristique i due aux variations δu_j des k paramètres d'ajustement du procédé.

$$\begin{aligned} \delta y_l &= f_l(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \\ \delta y_i &= f_i(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \\ \delta y_m &= f_m(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \end{aligned} \quad (1)$$

Pour les procédés discrets, notamment manufacturiers, le réglage, décidé à l'issue du mesurage d'un ou de quelques produits venant d'être fabriqués (n), ($n-1$)... ($n-p$), ne s'appliquera qu'à ceux en attente d'être fabriqués ($n+T$), ($n+T+1$)... (voir figure 1).

Il y a donc un décalage d'une période T , en nombre de pièces, entre la dernière pièce n , qui permet le calcul du réglage, et la première ($n+T$) qui sera effectivement corrigée. T est l'encours et donne le nombre de pièces qui peuvent être hors tolérance si la pièce n est hors tolérance. T doit donc être réduit autant que possible.

A partir du modèle variationnel direct, nous pouvons donc calculer les prochaines valeurs théoriques des caractéristiques du produit ($n+T$), connaissant celles du produit (n), ou des produits (n), ($n-1$)... ($n-p$) (voir équation (2)).

$$\begin{cases} y_l^{n+T} = y_l^n + \delta y_l \\ y_i^{n+T} = y_i^n + \delta y_i \\ y_m^{n+T} = y_m^n + \delta y_m \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} y_l^{n+T} = y_l^n + f_l(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \\ y_i^{n+T} = y_i^n + f_i(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \\ y_m^{n+T} = y_m^n + f_m(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \end{cases} \quad (2)$$

Dans cette équation équation (2), est la valeur de la caractéristique i de la pièce (n), si c'est la seule qui ait été mesurée, ou la moyenne des pièces (n), ($n-1$)...($n-p$), si p pièces ont été mesurées.

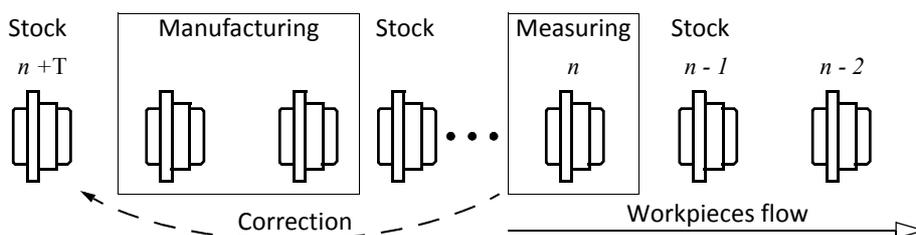


Fig. 1 Période T des réglages

Le problème du réglage consiste alors à trouver une variation des paramètres δu_j permettant d'annuler, ou au moins de réduire, les écarts des prochaines caractéristiques par rapport à leurs cibles. Selon notamment le nombre de caractéristiques et le nombre de paramètres, ce système d'équations équation (2) peut avoir : une infinité de solutions ; une solution unique ; ou aucune solution. Dans ce dernier cas la méthode très généralement utilisée consiste à rechercher la solution qui minimise la somme des carrés des écarts sur les prochaines caractéristiques, ou, ce qui équivalent, la moyenne des carrés des écarts (méthode MMSE). En particulier, si le modèle variationnel direct est linéaire, alors il peut être mis sous forme matricielle et pseudo-inversé (voir section 4.3). Il suffit alors ensuite de multiplier la matrice-colonne des écarts par cette pseudo-inverse pour obtenir le réglage des paramètres. C'est aux résultats de cette méthode que nous comparerons les résultats obtenus par ajustement par contraction des limites sur un exemple industriel à la section 4.

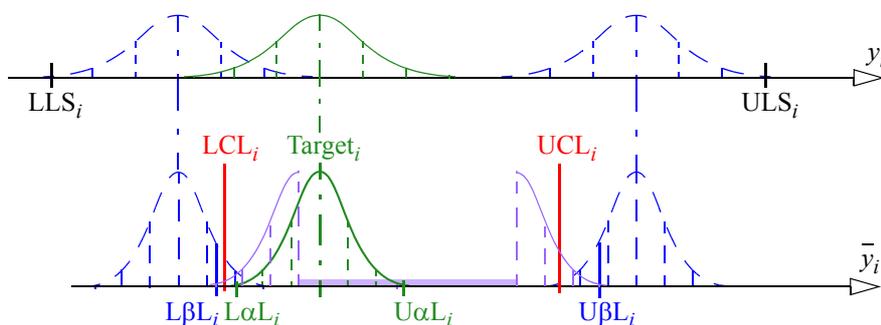
3 Méthode d'ajustement par contraction des limites (BCA method)

3.1 Cible et limites de contrôle des caractéristiques

Pour ajuster un procédé il faut avoir une cible à viser sur chaque caractéristique. Avec une carte de contrôle de Shewhart, la cible est souvent placée au milieu de l'intervalle de

tolérance afin maximiser la probabilité que chaque pièce produite soit à l'intérieur de cet intervalle. Cependant, il arrive assez souvent que la tendance centrale de la dispersion des pièces dérive progressivement au cours du temps. C'est notamment le cas en usinage à cause de l'usure des outils de coupe. De ce fait, certains régleurs préfèrent viser une cible décalée à contre-sens de la dérive afin de repousser, au plus tard, le prochain réglage. Malheureusement, ils ne le font qu'en tenant rarement compte des contraintes imposées par les limites alpha et bêta. En effet les limites alpha, qui doivent rester symétriques par rapport à la cible, ne doivent pas franchir les limites bêta, qui, elles, sont liées aux limites de tolérance. Par conséquent le domaine dans lequel peut être choisie la Cible est beaucoup plus petit que l'intervalle de tolérance. Il est représenté par un trait vert épais sur la figure 2 qui donne aussi un choix possible de cible dans ce domaine.

Des limites de contrôle doivent aussi être choisies, de part et d'autre de la cible choisie, afin de déclencher la correction de la caractéristique. Ces limites de contrôle sont nécessairement entre les limites alpha et les limites bêta. Là encore si l'on souhaite réduire la fréquence des réglages, il est préférable de placer les limites de contrôle, vers les limites bêta (voir un exemple de choix sur la figure 2). Sinon, on peut les placer vers les limites alpha.



LLS_i: Lower Limit of Specification (on y_i) ULS_i: Upper Limit of Specification (on y_i)
LβL_i: Lower Beta Limit (on \bar{y}_i) UβL_i: Upper Beta Limit (on \bar{y}_i)
LCL_i: Lower Control Limit (on \bar{y}_i) UCL_i: Upper Control Limit (on \bar{y}_i)
LαL_i: Lower Control Limit (on \bar{y}_i) UαL_i: Upper Control Limit (on \bar{y}_i)

Fig. 2 Exemple de choix de la cible et des limites de contrôle

3.2 Formulation du problème d'optimisation

L'idée-force fondamentale de l'ajustement par contraction des limites est de chercher une solution de réglage qui suffit à remettre les caractéristiques dans leurs limites de contrôle et non forcément sur leurs cibles. C'est donc une utilisation originale des limites de contrôle qui ne servent plus seulement à détecter un dérèglement mais aussi au réglage. Mathématiquement cela consiste à écrire que les prochaines valeurs des caractéristiques y_i^{n+T} devront être dans leurs limites de contrôle (voir équation (3) dans laquelle, chacune des inéquations est volontairement écrite avec une limite de contrôle inférieure LCL_i et/ou une limite de contrôle supérieure UCL_i).

Ainsi, alors qu'il est possible qu'aucune solution sur les paramètres ne permette de remettre théoriquement les caractéristiques sur leurs cibles, l'ajustement par contraction des limites définit un domaine solution. Dès lors il devient possible d'essayer de trouver une solution sur un sous-ensemble des paramètres de réglage. C'est là la deuxième idée-force de l'ajustement par contraction des limites : permettre de définir des préférences sur les paramètres pour que l'ajustement par contraction des limites recherche d'abord une solution de réglage sur les paramètres préférés. Nous détaillerons cette idée plus bas.

$$\begin{cases} LCL_1 \leq y_1^{n+T} \leq UCL_1 \\ LCL_i \leq y_i^{n+T} \\ y_m^{n+T} \leq UCL_m \end{cases} \quad (3)$$

Enfin la troisième idée-force de ajustement par contraction des limites est de chercher un réglage qui minimise les écarts des prochaines valeurs de façon proportionnelle aux limites de contrôle. Pour cela, on rend variables les limites de contrôle avec un paramètre d (voir équation (4) et figure 3) :

$$\begin{aligned} LCL_i &= Target_i - Ld_i \times d \\ UCL_i &= Target_i + Ud_i \times d \end{aligned} \quad (4)$$

with $Ld_i = Target_i - LCL_i$ and $Ud_i = UCL_i - Target_i$

et on contraint la prochaine valeur à rester à l'intérieur de ces limites paramétrées :

$$Target_i - Ld_i \times d \leq y_i^{n+T} \leq Target_i + Ud_i \times d \quad (5)$$

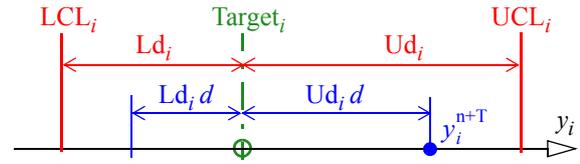


Fig. 3 Limites de contrôle paramétrées par la distance réduite d

La minimisation de d contraint la prochaine valeur y_i^{n+T} à se rapprocher de sa cible. Si d est inférieur à 1, cela signifie qu'elle est à l'intérieur de ses limites ; sinon cela signifie qu'elle en est à l'extérieur.

En rendant commune la distance réduite d à toutes les caractéristiques, on obtient donc finalement un problème d'optimisation sous contraintes qui, en reprenant l'équation (3), prend la forme générale suivante :

Minimise d under :

$$\begin{cases} Target_1 - Ld_1 \times d \leq y_1^{n+T} \leq Target_1 + Ud_1 \times d \\ Target_i - Ld_i \times d \leq y_i^{n+T} \\ y_m^{n+T} \leq Target_m + Ud_m \times d \end{cases} \quad (6)$$

Soit, en utilisant le modèle variationnel direct :

Minimise d under :

$$\begin{cases} Target_1 - Ld_1 \times d \leq y_1^n + f_1(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \leq Target_1 + Ud_1 \times d \\ Target_i - Ld_i \times d \leq y_i^n + f_i(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \\ y_m^n + f_m(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \leq Target_m + Ud_m \times d \end{cases} \quad (7)$$

ou encore, sous forme canonique :

Minimise d under :

$$\begin{cases} Ld_1 \times d + f_1(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \geq (Target_1 - y_1^n) \\ Ud_1 \times d - f_1(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \geq (-Target_1 + y_1^n) \\ Ld_i \times d + f_i(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \geq (Target_i - y_i^n) \\ Ud_m \times d - f_m(\delta u_1, \delta u_j, \delta u_k) \geq (-Target_m + y_m^n) \end{cases} \quad (8)$$

Ce problème d'optimisation a toujours une solution, puisque d peut être augmenté à l'infini. C'est là un avantage à la fois pour le développement informatique et pour l'information sur le résultat : si d est plus grand que 1 cela signifie, qu'avec les paramètres de

réglages utilisés, il est impossible de ramener toutes les caractéristiques dans leurs limites de contrôle ; la valeur de d donnant alors le dépassement de ces limites : $d = 1.2$ signifie qu'au moins une caractéristique dépasse de 20% une de ses limites.

Il existe de nombreux codes d'optimisation sous contraintes. Dans la version actuelle du logiciel d'ajustement par contraction des limites (nommé provisoirement logiciel BCA), le modèle variationnel direct est forcément linéaire et nous utilisons l'algorithme d'optimisation linéaire de Dantzig bien plus efficace qu'un algorithme général dans ce cas.

3.3 Prise en compte du classement des paramètres de réglage

La deuxième idée-force de ajustement par contraction des limites, qui en a même motivé la mise au point, est de permettre à l'utilisateur de définir un ordre préférentiel d'utilisation des paramètres de réglage du procédé, cela afin, par exemple, d'utiliser en priorité les paramètres les plus faciles à régler et n'utiliser les autres, que si c'est absolument nécessaire pour remettre toutes les caractéristiques dans leurs limites de contrôle.

Pour cela les paramètres sont classés dans des groupes numérotés. Ainsi le groupe 1 est celui des paramètres à utiliser prioritairement. S'ils ne permettent pas de remettre les caractéristiques dans leur limites de contrôle, c'est-à-dire si la résolution du problème d'optimisation donne une distance réduite d supérieure à 1, alors un nouveau problème d'optimisation est formé avec les paramètres du groupe 1 et ceux du groupe 2. Ainsi de suite jusqu'à ce qu'une solution de réglage soit trouvée ou bien que cet algorithme itératif ait épuisé tous les groupes et donc tous les paramètres.

Bien que cela ne devrait pratiquement pas se produire, il se peut que même l'ensemble des paramètres ne permettent pas de remettre toutes les caractéristiques dans leurs limites de contrôle. Dans ce cas, le résultat de la dernière optimisation donne une valeur d supérieure à 1, ce qui signifie qu'au moins une caractéristique sera théoriquement en-dehors de ses limites de contrôle après le réglage. Cependant, ce réglage minimise le dépassement des limites, ce qui peut suffire.

4 Simulation du pilotage par contraction des limites

4.1 Présentation du procédé industriel et de son modèle variationnel direct

Nous reprenons l'exemple industriel introduit dans (Pairel *et al*, 2011). Il s'agit d'une pièce usinée en décolletage. Seuls les outils de finition sont représentés sur la figure 4. Ce sont des outils de fonçage, c'est-à-dire qu'ils usinent la pièce en se déplaçant radialement par rapport à elle. Ils sont numérotés dans l'ordre chronologique de leurs interventions :

- T1 finit la face numérotée (5) ;
- T2 finit les faces (3) et (4) ;
- T3 finit (2) ;
- et T4 tronçonne la pièce de la barre et finit la face (1).

Les caractéristiques y_i du produit sont les cotes et sont nommées par leurs valeurs nominales : 15.3, 10.28, 6.36 et 5.5.

Les paramètres u_j du procédé sont les correcteurs d'outils. Les correcteurs de position, notés δT_{iz} , sont représentés sur le dessin de la pièce dans le sens de leur déplacement positif. Pour l'outil T2, qui réalise deux faces, le correcteur de position a été « posé » sur la face (4). L'outil T2 possède aussi une cote-outil δT_{2c1} qui peut être réglée par affûtage. T2c1 est donc aussi un correcteur même s'il beaucoup plus difficile à modifier que les autres.

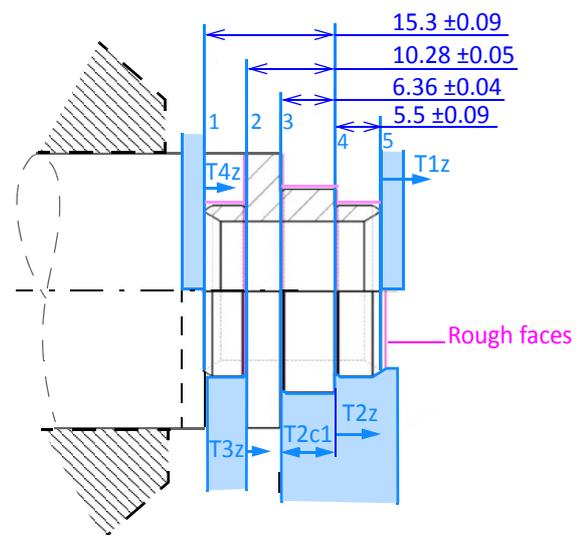


Fig. 4 Exemple industriel de décolletage : cotes finies et outils de finition

Cette représentation permet d'établir les relations géométriques entre ces correcteurs et les cotes et donc le modèle variationnel de ce procédé.

Ainsi, le dessin permet de voir qu'un déplacement de position δT_{2z} de T2 va augmenter de la même quantité les cotes 15.3 et 10.28 et diminuer la cote 5.5. La cote de 6.36 est insensible à ce déplacement. Le modèle obtenu est un donc modèle linéaire qui peut donc être représenté sous la forme matricielle suivante :

$$[\delta y] = [E] \cdot [\delta u] \quad (9)$$

avec [E], la matrice d'incidence des paramètres sur les caractéristiques donnée dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 Matrice d'incidence [E] des correcteurs sur les cotes finies

Dim.	T1z	T2z	T3z	T2c1	T4z
15.3	0	1	0	0	-1
10.28	0	1	-1	0	0
6.36	0	0	0	1	0
5.5	1	-1	0	0	0

Cette matrice d'incidence n'est ni inversible ni pseudo-inversible puisque qu'il y a davantage de correcteurs que de caractéristiques à corriger. Cela signifie qu'il existe une infinité de solutions de réglage pour corriger les écarts sur les cotes. Cela serait plutôt un avantage sur la plupart des procédés mais en usinage cela peut conduire à un déplacement de l'ensemble des outils vers la

gauche, c'est-à-dire vers la mandrin en rotation et donc à la collision de l'outil de tronçonnage avec celui-ci. C'est pour cette raison qu'en pratique les régleurs ne modifient pas le réglage de l'outil de tronçonnage mais seulement ceux des autres outils. Nous figurons donc le correcteur T4z pour deux pilotages (MMSE et contraction des limites).

4.2 Mise en place de la simulation

Le simulateur de production a été réalisé avec Excel®. Nous avons simulé une usure des outils ainsi qu'une dispersion aléatoire instantanée des cotes. Le tableau 2 donne la dérive imposée à chaque outil, par pièce. T1 est la butée escamotable : elle n'a évidemment pas de dérive par usure. Par ailleurs, nous avons fixé à 1 micron (0,001 mm) l'écart-type de dispersion aléatoire de chaque cote.

Tableau 2 Loïs d'usure des outils

Tool Corrector	Drift / part (mm)
T1z	0
T2z	0.1
T3z	0.6
T2c1	-0.4
T4z	0.4

Avec ces paramètres, les figures suivantes montrent la dérive des cotes lorsqu'aucun réglage des outils n'est réalisé ; d'abord sur les 30 premières pièces (figure 5) ; puis sur les 150 dont elles font parties (figure 6).

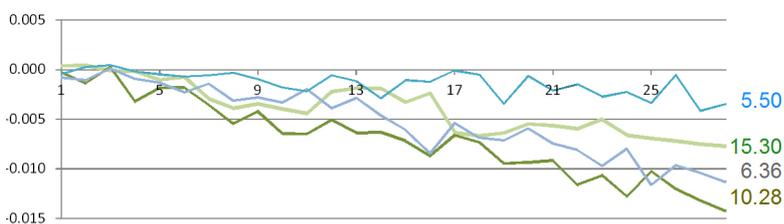


Fig. 5 Variations des cotes sur les 30 premières pièces

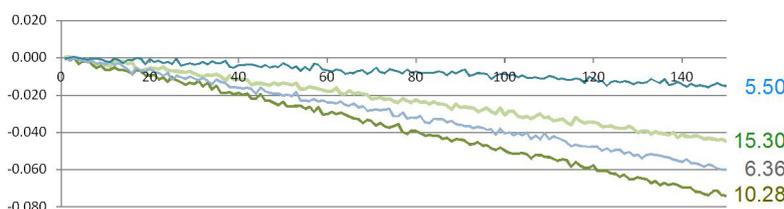


Fig. 6 Variations des cotes sur les 150 pièces

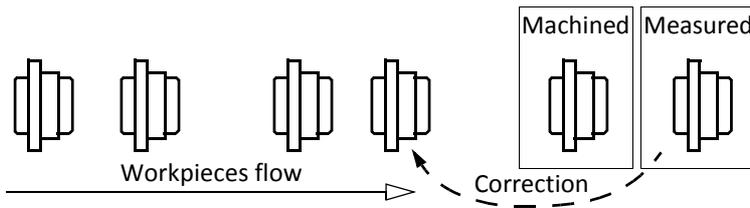


Fig. 7 Période de deux, utilisée pour la simulation

A partir de la 101^e pièce, la cote de 6.36 sort de ses limites de tolérance qui sont de $\pm 0,040$ mm. Les autres sont encore dans leurs limites de tolérance mais en sortiront, les unes après les autres, à partir de 180^e pièce environ.

Nous supposons que le mesurage d'une pièce se fait pendant que la suivante est en train d'être usinée. Le réglage des outils ne pourra donc s'appliquer que sur la troisième pièce. La période de réglage est donc de 2 (voir figure 7).

En pratique c'est une période minimale car le transport entre la machine-outil et l'équipement mesure peut contenir d'autres pièces, ce qui allonge encore la période (voir figure 1). Il faut, bien entendu, essayer d'avoir la période la plus petite pour pouvoir compenser au plus vite la dérive des cotes. Sur le simulateur, nous allons donc produire par paquets de deux et mesurer, sur chacun, la première produite pour en déduire le réglage éventuel qui s'appliquera au paquet suivant.

4.3 Pilotage par le modèle pseudo-inverse (MMSE)

Il est économiquement inenvisageable de ré-affûter ou de changer l'outil de forme T2 toute les deux pièces. C'est pourquoi le pilotage par la pseudo-inverse (MMSE), qui

ajuste tous les correcteurs, interdit de pouvoir prendre en compte le correcteur $\delta T2c1$. Avec le correcteur de position T4z, également figé, la matrice d'incidence n'a alors plus que trois colonnes pour quatre lignes dont une nulle (voir tableau 3). En effet la cote de 6.36 ne dépend que de T4z qui a supprimée. On ne pourra donc pas la corriger et elle va dériver (voir figure 9). En pratique il faudra donc prévoir une procédure de surveillance et de correction complémentaire qui, quelle qu'elle soit, alourdira le travail des opérateurs. Cela ne sera pas le cas avec l'ajustement par contraction de limites.

Les figures 8 et 9 montrent que les corrections ont permis de supprimer la dérive des cotes 15.3, 10.28 et 5.5. Seule la cote de 6.36, qui ne peut pas être corrigée, dérive.

Tableau 3 Sous-matrice d'incidence permettant d'établir le modèle MMSE

Dim.	T1z	T2z	T3z
15.3	0	1	0
10.28	0	1	-1
6.36	0	0	0
5.5	1	-1	0

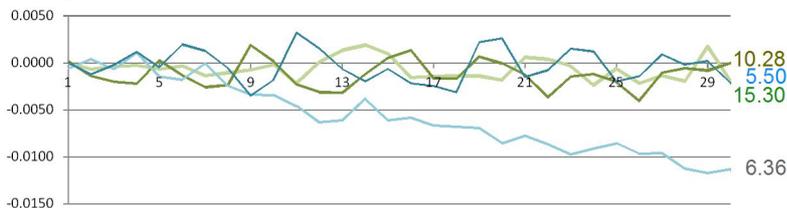


Fig. 8 Résultat des réglages par le pilotage MMSE sur les 30 premières pièces

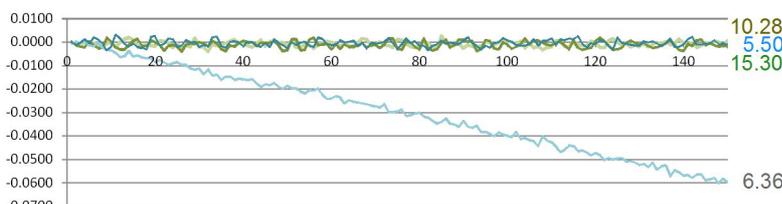


Fig. 9 Résultat des réglages le pilotage MMSE sur les 150 pièces

4.4 Pilotage par contraction des limites

Comme pour le pilotage par pseudo-inverse (MMSE), le correcteur de l'outil de tronçonnage T4z va être figé. Cela se fait en le classant dans le groupe 0 (voir tableau 4). Le correcteur de forme T2c1 a été classé dans un groupe 2 pour n'être utilisé que si les correcteurs de position du groupe 1 ne suffisent pas à remettre toutes les cotes dans leurs limites de contrôle. Pour retarder le plus possible le réglage de T2c1, les limites de contrôle de la cote 6.36, qu'il génère, ont été élargies le plus possible en tenant compte de sa dispersion aléatoire. Elles sont à $\pm 35 \mu\text{m}$ alors que celles des autres cotes sont à $\pm 3 \mu\text{m}$ (3 fois l'écart-type d'un micron ; voir tableau 5).

Tableau 4 Configuration du groupe de chaque correcteur

Corrector	T1z	T2z	T3z	T2c1	T4z
Group	1	1	1	2	0

Tableau 5 Configuration des limites de contrôle (LCL et UCL) de chaque dimension

Dim.	LLS	LCL	Target	UCL	USL
15.30	-0.090	-0.003	0.000	0.003	0.090
10.28	-0.050	-0.003	0.000	0.003	0.050
6.36	-0.040	-0.035	0.000	0.035	0.040
5.50	-0.090	-0.003	0.000	0.003	0.090

Les figures 10 et 11 donnent l'évolution des cotes sur les 30 premières pièces puis sur les 150. Les cotes de 15.3, 10.28 et 5.5 n'ont plus de dérive. Seule la cote de 6.36 dérive comme

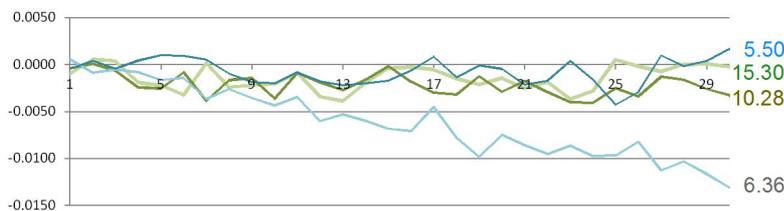


Fig. 11 Résultat des réglages par ajustement par contraction des limites sur les 30 premières pièces

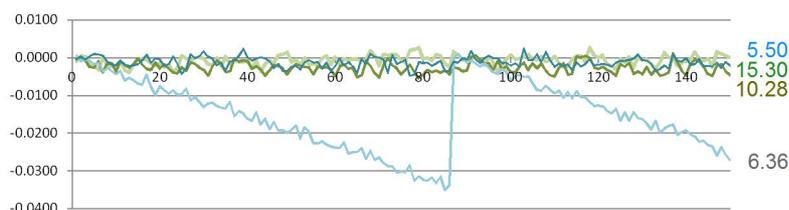


Fig. 12 Résultat des réglages par ajustement par contraction des limites sur les 150 premières pièces

souhaitée, mais elle est corrigée par réglage de T2c1 au bout de 85 pièces quand son écart est inférieur à sa limite de contrôle inférieure. On pourrait bien sûr allonger encore la période entre deux réglages de ce correcteur en visant une cible supérieure pour la cote de 6.36 ; par exemple +0.033 mm.

Fig. 10

4.5 Comparaison des performances des deux pilotages

L'ajustement par contraction des limites a déclenché trente réglages alors que la pseudo-inverse en a fait soixante-quinze. En effet, les quarante-cinq autres pièces mesurées avaient leurs cotes dans les limites de contrôle et n'ont donc pas déclenché de réglage par ajustement par contraction des limites. De plus, lors des réglages, certains correcteurs n'ont pas été modifiés. Cela peut être observé sur la figure 12, tout particulièrement pour le correcteur T3z. L'ajustement par contraction des limites peut donc être utilisé en réglage manuel ; alors que la pseudo-inverse ne le peut pas en pratique, surtout avec des périodes courtes.

Malgré un nombre de réglages plus de deux fois inférieur au nombre de réglages par la pseudo-inverse, les « qualités » des cotes « fabriquées » par ajustement par contraction des limites et par la pseudo-inverse sont très proches.

La comparaison des moyennes et des écart-types expérimentaux, dans le tableau 6 ci-

dessous, montre que ajustement par contraction des limites ne disperse pas plus que la pseudo-inverse, voire même moins (cote de 6.36) mais, par contre, peut décentrer davantage. C'est en particulier le cas pour la cote de 10.28. Ce n'est cependant pas rédhibitoire puisqu'il suffit de déplacer, à l'opposé de la moyenne obtenue, la cible de chaque cote pour que les prochaines productions soient centrées dans les intervalles

de tolérance, si c'est nécessaire.

Sur les histogrammes du tableau 6, les limites de contrôle ont été tracés en pointillés. Elles sont nettement en-deçà des limites de tolérance qui n'ont pas été tracés (sauf pour la cote de 6.36 qui a des limites de contrôle élargies). Aucune des 150 pièces n'est hors tolérance

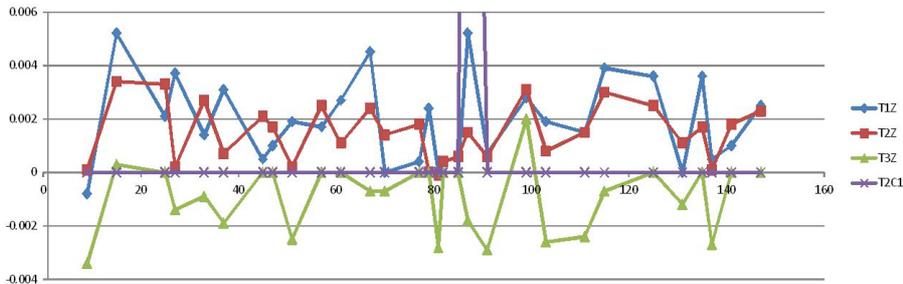
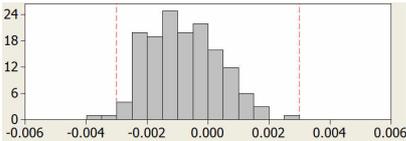
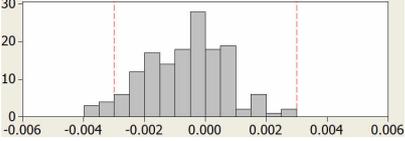
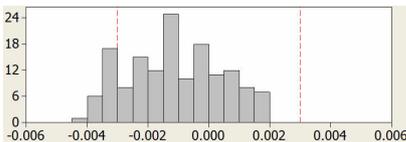
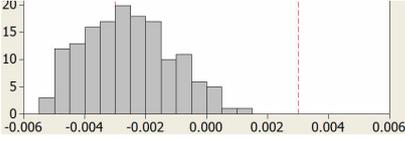
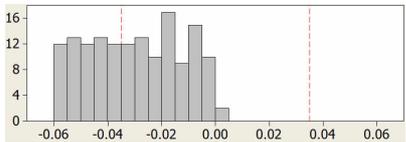
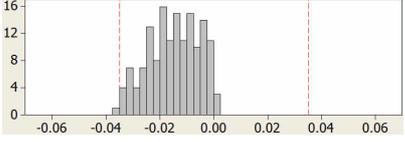
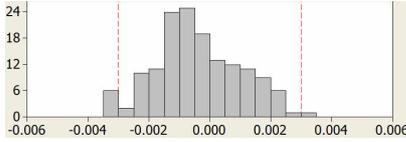
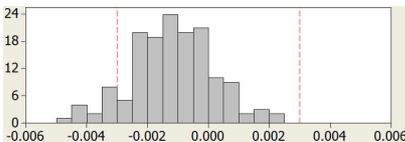


Fig. 13 Les trente réglages des correcteurs par ajustement par contraction des limites

Tableau 6 Histogramme, écart-type expérimental s et moyenne m de chaque cote

Dim.	MMSE systematic adjustment	Boundary contraction adjustment
15.3		
s	0,0012	0,0013
m	-0,0008	-0,0006
10.28		
s	0,0015	0,0014
m	-0,0011	-0,0026
6.36		
s	0,0174	0,0093
m	-0,0299	-0,0149
5.5		
s	0,0014	0,0014
m	-0,0004	-0,0012

5 Conclusion

L'ajustement par contraction des limites apporte d'importants avantages sur les techniques existantes :

– Il utilise des cartes de contrôle mono-caractéristiques bien connues dans l'industrie contrairement aux cartes multi-caractéristiques.

– L'écart maximal de chaque caractéristique, après réglage, est maîtrisé alors qu'il ne l'est pas par le calcul d'un réglage par la méthode des moindres carrés.

– Les paramètres de réglage sont tous pris en compte, même les plus compliqués ou les plus coûteux, grâce au classement préférentiel. En pratique cet avantage est très important en usinage car il permet d'user au maximum les outils avant leur changement.

– Le modèle direct du procédé peut être de n'importe quelle forme puisque la méthode proposée ne repose pas sur une technique d'optimisation particulière. Il faut simplement utiliser l'algorithme adapté au modèle direct.

– Les performances en termes de dispersion globale et de moyennes sur les caractéristiques sont très similaires à celles obtenues par un ajustement systématique basé sur le critère de l'erreur quadratique moyenne minimale.

– Le nombre de réglages est beaucoup plus faible que la procédure systématique de réglage, ce qui, d'un point de vue pratique, permet d'utiliser cette méthode pour les réglages manuels.

– L'implémentation informatique est très simple si l'on dispose d'un algorithme d'optimisation.

Cette méthode de réglage a été implémenté dans un logiciel prototype qui peut être prêté gracieusement sur demande. Ce logiciel pourrait aussi être utilisé pour régler les paramètres de conception d'un produit puisqu'il suffit de disposer d'un modèle direct permettant de simuler celui-ci lorsque ces paramètres sont modifiés. Cette utilisation n'a pas encore été réalisée.

Remerciements

Je remercie mon collègue Maurice Pillet de m'avoir fourni un simulateur Excel©. Je dédie cet article à feu Fabrice Frelin, programmeur informatique au laboratoire SYMME, qui a développé le logiciel sur la base de mes algorithmes de calcul et d'optimisation.

Références

1. ISO 7870-2:2013. "Control charts — Part 2: Shewhart control charts"
2. ISO 7870-3:2012. "Control charts — Part 3: Acceptance control charts"
3. Deming W. E. (1982). *Out of the Crisis*. The MIT Press, 1982
4. Tiplica T. (2002). *Contributions à la maîtrise statistique des processus industriels multivariés*. Thèse de doctorat en Sciences et Technologies Industrielles. Université d'Angers
5. Bersimis S., Psarakis S., & Panaretos J. (2007). "Multivariate statistical process control charts: an overview". *Quality and Reliability Engineering International*, 23(5), 517–543. doi:10.1002/qre.829
6. Hotelling H., (1947). "Multivariate quality control—illustrated by the air testing of sample bombsights". *Techniques of Statistical Analysis*, Eisenhart C, Hastay MW, Wallis WA (eds.). McGraw-Hill: New York, 111–184
7. Del Castillo E., (2006). "Statistical process adjustment: a brief retrospective, current status, and some opportunities for further work". *Statistica Neerlandica*, 60 (3), 309–326
8. Del Castillo E., Pan R., & Colosimo B. M. (2003). "A unifying view of some process adjustment methods". *Journal of Quality Technology*, 35(3), 286–293
9. Liu L., Ma Y., & Tu Y. (2013). "Multivariate setup adjustment with fixed adjustment cost". *International Journal of Production Research*, 51(5), 1392–1404. doi:10.1080/00207543.2012.693640
10. Tseng S.-T., Chou R.-J., & Lee S.-P. (2002). "A study on a multivariate EWMA controller". *IIE Transactions*, 34, 541–549
11. Del Castillo E., & Rajagopal R. (2002). "A multivariate double EWMA process adjustment scheme for drifting processes". *IIE Transactions*, 34, 1055–1068
12. Yang L., & Sheu S.-H. (2005). "Integrating multivariate engineering process control and multivariate statistical process control". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(1-2), 129–136. doi:10.1007/s00170-004-2494-8
13. Runger G., Lian Z., & Del Castillo E. (2010). "Optimal multivariate bounded adjustment". *IIE Transactions*, 42(10), 746–752. doi:10.1080/07408171003670967
14. Govind N., Del Castillo E., Runger G. & Janakiram M., (2018). "Multivariate bounded process adjustment schemes". *Quality Technology & Quantitative Management*, 15:2, 253-273. doi: 10.1080/16843703.2016.1208938
15. Pairel É., Goldschmidt E., Vayre, B., Adragna, P.-A., & Pillet, M. (2011). "Copilot Pro ®: A full method for the steering of the machining". *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2(1), 39–44. doi:10.1051