
CoSelect : réglage statistique et sélectif des procédés

Éric Pairel

*Université Savoie Mont Blanc, SYMME, F-74000 Annecy, France
eric.pairel@univ-savoie.fr*

RÉSUMÉ. On introduit le problème du réglage des procédés créant une dérive et une dispersion des caractéristiques de leurs produits. Les méthodes connues en SPC et en SPA pour les procédés multi-paramètres et multi-caractéristiques sont brièvement rappelées. On donne ensuite la forme très générale du modèle variationnel direct pour de tels procédés. La méthode de réglage statistique et sélectif proposée est présentée sur cette forme générale. Elle est ensuite utilisée pour piloter, grâce au logiciel CoSelect qui l'implémente, la simulation d'une production de 150 pièces. Les résultats sont comparés à ceux obtenus par un pilotage par le modèle pseudo-inverse. Un lien internet permet de télécharger le logiciel CoSelect 2.0.

ABSTRACT. The issue of the adjustment problem for process creating a drift and a dispersion on the characteristics of their products is placed. The known methods of SPC and SPA for multi-input and multi-output processes are briefly recalled. The very general form of the direct variational model for such processes is given. The proposed statistics and selective adjustment method is presented with this general form of direct model. It is then used to steer, thanks to the CoSelect software which implements it, the simulation of a production of 150 pieces. The results are compared to those obtained with a steering by the pseudo-inverse model that can be built for this production. An Internet link allows to download the CoSelect 2.0 software

MOTS-CLÉS : CoSelect, réglage multivariables, SPC, SPA.

KEYWORDS: CoSelect, multivariate adjustment, SPC, SPA.

DOI:10.3166/JESA.49.127-145 © Lavoisier 2016

1. Introduction

Le problème que nous avons cherché à résoudre, en mettant au point la méthode présentée dans cet article, est celui du réglage des procédés de fabrication créant des caractéristiques des produits qu'ils fabriquent. 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.

En outre nous considérons que le réglage du procédé ne modifie pas les dispersions des caractéristiques. Cette hypothèse est probablement vérifiée dans la plupart des cas car les réglages effectués sont de faibles amplitudes. Nous considérons aussi que le procédé de mesure n’introduit pas de biais lié par exemple à une mauvaise justesse.

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 (1931) et la carte aux limites élargies. Nous rappelons ici les relations de calcul de ces deux cartes car nous les utiliserons d’une manière un peu différente dans la méthode proposée. D’ailleurs nous ne les appellerons pas *limites de contrôle* mais *limites alpha et limites bêta*.

La carte de Shewhart utilise des limites disposées symétriquement autour de la cible en-dessous desquelles il a été montré par Deming (1982) 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 alors que sa dispersion est parfaitement centrée sur la cible (voir figure 1 et équations 1 et 2). Nous les appelons les limites alpha inférieure, $L\alpha I$, et supérieure, $L\alpha S$.

$$L\alpha I_i = \text{Cible}_i - u_\alpha \frac{\sigma c t_i}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

$$L\alpha S_i = \text{Cible}_i + u_\alpha \frac{\sigma c t_i}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

avec :

– Cible_i : valeur cible pour l’écart de la caractéristique i .

– u_α : valeur de la variation de Gauss centrée réduite correspondant au risque α ; généralement pris égal à 3.

- n : nombre de pièces mesurées pour calculer l'écart de la caractéristique.
- σ_{ct_i} : l'écart type de dispersion court-terme (instantanée) de la caractéristique i .

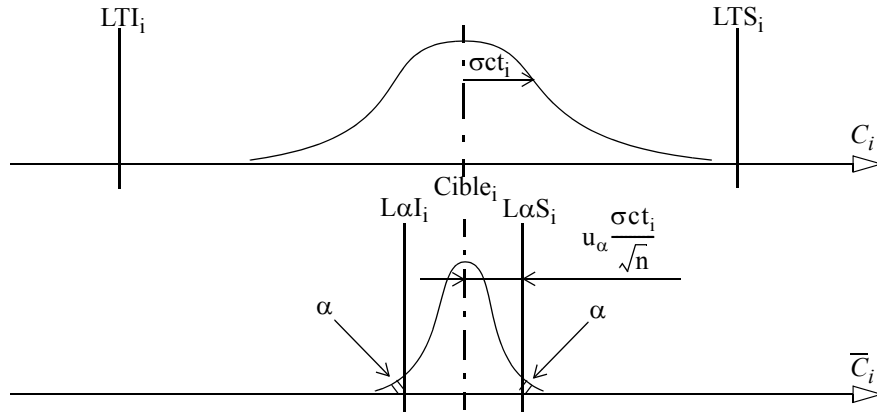


Figure 1. Position des limites alpha utilisées par la carte de Shewhart et par la méthode proposée pour surveiller l'écart moyen \bar{C}_i de la caractéristique mesurée sur n pièces, n pouvant être égal à 1

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 alors que la dispersion de cette dernière en est en fait au-delà et génère $p\%$ de valeurs hors tolérance (voir figure 2 et équations 3 et 4). Nous les appelons les limites bêta inférieure, $L\beta I$, et supérieure, $L\beta S$. Par rapport aux limites alpha, elles sont nécessairement au-delà de ces limites puisqu'en-deçà des limites alpha il ne faut pas corriger la caractéristique alors qu'au-delà des limites bêta il faut la corriger.

$$L\beta I_i = LTI_i + \left(u_p + \frac{u_\beta}{\sqrt{n}}\right) \sigma_{ct_i} \quad (3)$$

$$L\beta S_i = LTS_i - \left(u_p + \frac{u_\beta}{\sqrt{n}}\right) \sigma_{ct_i} \quad (4)$$

avec :

- LTI_i et LTS_i : limite de tolérance inférieure et supérieure de la caractéristique i .
- u_p : valeur de la variation de Gauss centrée réduite correspondant à la proportion p de valeurs supérieures ; généralement prise égale à 3.

– u_β : valeur de la variation de Gauss centrée réduite correspondant au risque β de croire que la dispersion est encore dans les limites ; généralement prise égale à 1,28 ($\beta = 10\%$).

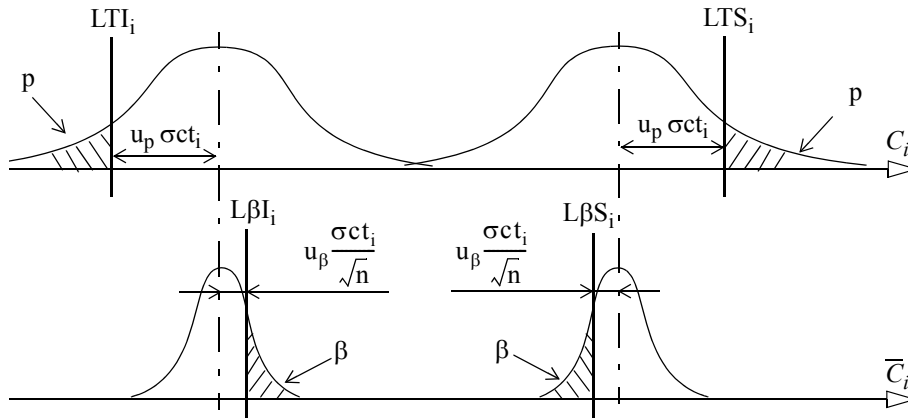


Figure 2. Position des limites bêta utilisées par la « carte aux limites élargies » et par la méthode proposée pour l'écart moyen \bar{C}_i de la caractéristique mesurée sur n pièces, n pouvant être égal à 1

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 (Tiplica, 2002) et (Bernis *et al.*, 2007). La plus connue d'entre-elles a été inventée par Hotelling (1947). 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* et SPA en anglais. Del Castillo en est le principal promoteur aujourd'hui. Il a notamment fait une synthèse de ces techniques en 2006 (Del Castillo, 2006). 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.* (2003) et Liu *et al.* (2013) 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.* (2002) propose un contrôleur EWMA fondé sur un modèle direct linéaire d'influence des paramètres sur les caractéristiques et

permettant de minimiser la somme des écarts quadratiques résiduels des caractéristiques par rapport à leurs cibles. Une proposition similaire a été faite par Del Castillo *et al.* (2002) pour les procédés à dérive. Yang *et al.* (2005) 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.* (2010).

Nous proposons une stratégie similaire mais d'une part chaque caractéristique a sa propre carte, ce qui laisse le choix du type de carte *mono-varié* ; d'autre part les limites de ces cartes participent pleinement au calcul du réglage lorsqu'il est nécessaire. Etant donné que la méthode présentée est à présent implémentée dans le logiciel CoSelect 2.0, nous parlerons indifféremment de CoSelect pour parler de celui-ci ou de la méthode.

Dans la première section nous montrons que CoSelet ne repose sur aucun modèle direct particulier à la différence de beaucoup de méthodes publiées. CoSelect peut être mis en œuvre avec n'importe quel modèle variationnel direct. La deuxième section présente ses idées-forces et son algorithme. La troisième permet de l'évaluer par rapport au réglage classique calculé par les moindres carrés.

2. Modèle variationnel direct utilisé par CoSelect

Il existe plusieurs méthodes permettant d'établir un modèle variationnel direct. Une modélisation par les lois de la physique, de la géométrie ou par une approche purement empirique, permet d'obtenir un modèle mathématique. Quelle que soit la méthode pour l'établir, le modèle variationnel direct peut se mettre sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \delta C_1 = f_1(\delta P_1, \delta P_j, \delta P_k) \\ \delta C_i = f_i(\delta P_1, \delta P_j, \delta P_k) \\ \delta C_m = f_m(\delta P_1, \delta P_j, \delta P_k) \end{cases} \quad (5)$$

où δC_i est la variation de la caractéristique i due aux variations δP_j des paramètres de réglage du procédé.

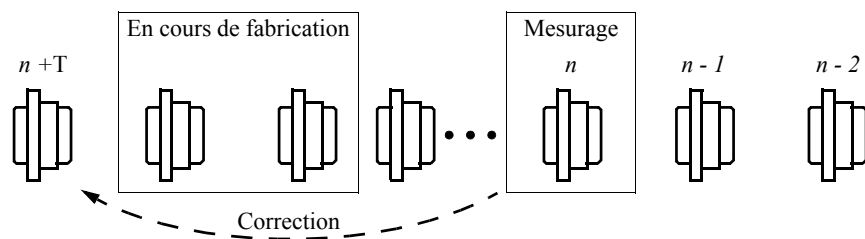


Figure 3. Période des réglages

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 que sur ceux en attente d'être fabriqués ($n+T, n+T+1...$) (voir figure 3).

Il y a donc un décalage d'une période T dépendant de l'encours de produits entre la dernière pièce n qui permet de calculer le réglage et la première $n+T$ qui sera effectivement corrigée.

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 6).

$$\begin{cases} C_l^{n+T} = C_l^n + \delta C_l \\ C_i^{n+T} = C_i^n + \delta C_i \\ C_m^{n+T} = C_m^n + \delta C_m \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} C_l^{n+T} = C_l^n + f_l(\delta P_1, \delta P_j, \delta P_k) \\ C_i^{n+T} = C_i^n + f_i(\delta P_1, \delta P_j, \delta P_k) \\ C_m^{n+T} = C_m^n + f_m(\delta P_1, \delta P_j, \delta P_k) \end{cases} \quad (6)$$

Dans cette équation (6), C_i^n 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.

Le problème du réglage consiste alors à trouver une variation des paramètres δP_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 (6) peut avoir une infinité de solutions, une solution unique ou au 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. En particulier, si le modèle variationnel direct est linéaire, alors il peut être mis sous forme matriciel et pseudo-inversé (voir section 4.3). Il suffit alors ensuite de multiplier la matrice colonne des écarts des caractéristiques par cette matrice pseudo-inverse pour obtenir le réglage des paramètres. C'est à cette méthode de calcul que nous comparerons les résultats obtenus par CoSelect à la section 4.

3. Méthode CoSelect

3.1. Cible et limites de contrôle des caractéristiques

Une cible est choisie pour chaque caractéristique. Elle peut être placée au milieu de l'intervalle de tolérance de la caractéristique, mais si cette dernière dérive

progressivement et qu'on souhaite minimiser la fréquence de sa correction, elle peut être placée à l'opposé du sens de sa dérive.

Dans tous les cas la cible déplace avec elle les limites alpha. Comme par ailleurs les limites alpha sont nécessairement à l'intérieur des limites bêta, cela contraint le domaine de position possible de la cible (domaine représenté par un trait vert-gris épais sur la figure 4)

De façon plus classique, des limites de contrôle sont établie pour chaque caractéristique. En-deçà de ces limites, la caractéristique ne demande aucune correction ; au-delà si. Ces limites de contrôle sont nécessairement entre les limites alpha et les limites bêta (voir un exemple de choix sur la figure 4). Là encore si l'on souhaite minimiser la fréquence de la correction d'une caractéristique qui dérive progressivement, on a intérêt à placer ces limites vers les limites bêta. Sinon, on peut les placer vers les limites alpha.

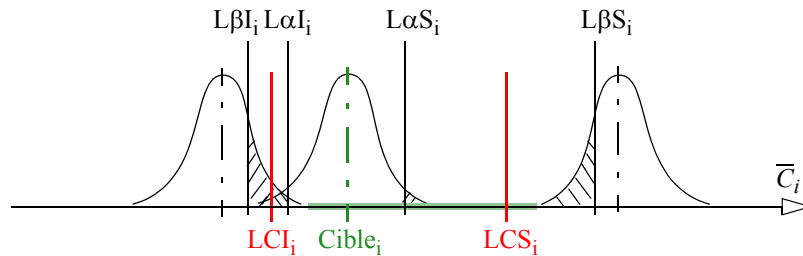


Figure 4. Choix de la cible et des limites de contrôle

3.2. Formulation du problème d'optimisation

L'idée-force fondamentale de CoSelect 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 C_i^{n+T} devront être dans leurs limites de contrôle (voir équation 7 dans laquelle, chacune des inéquations est volontairement écrite avec une limite de contrôle inférieure LCI_i et/ou une limite de contrôle supérieure LCS_i).

$$\begin{cases} LCI_1 \leq C_1^{n+T} \leq LCS_1 \\ LCI_i \leq C_i^{n+T} \\ C_m^{n+T} \leq LCS_m \end{cases} \quad (7)$$

Ainsi, alors qu'il est possible qu'aucune solution sur les paramètres ne permette de remettre théoriquement les caractéristiques sur leurs cibles, CoSelect 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 CoSelect : permettre de définir des préférences sur les paramètres pour que CoSelect recherche d'abord une solution de réglage sur les paramètres préférés. Nous détaillerons cet idée plus bas.

Enfin la troisième idée-force de CoSelect 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 8 et figure 5) :

$$\begin{aligned} LCI_i &= \text{Cible}_i - KI_i \times d \\ LCS_i &= \text{Cible}_i + KS_i \times d \end{aligned} \tag{8}$$

où $KI_i = \text{Cible}_i - LCI_i$ et $KS_i = LCS_i - \text{Cible}_i$

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

$$\text{Cible}_i - KI_i \times d \leq C_i^{n+T} \leq \text{Cible}_i + KS_i \times d \tag{9}$$

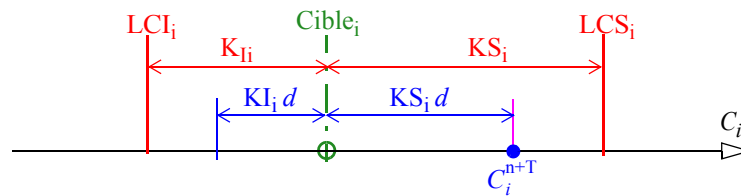


Figure 5. Limites de contrôle paramétrées par la distance réduite d

La minimisation de d contraint la prochaine valeur C_i^{n+T} à se rapprocher de sa cible. Si d est inférieur à 1, cela signifie qu'elle a l'intérieur de ses limites ; sinon cela signifie qu'elle en est à l'extérieur (voir figure 5).

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 (7), prend la forme générale suivante :

Minimiser d sous :

$$\begin{cases} \text{Cible}_1 - \text{KI}_1 \times d \leq C_1^{n+T} \leq \text{Cible}_1 + \text{KS}_1 \times d \\ \text{Cible}_i - \text{KI}_i \times d \leq C_i^{n+T} \\ C_m^{n+T} \leq \text{Cible}_m + \text{KS}_m \times d \end{cases} \quad (10)$$

Soit, en utilisant le modèle variationnel direct :

Minimiser d sous :

$$\begin{cases} \text{Cible}_1 - \text{KI}_1 \times d \leq C_1^n + f_1(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \leq \text{Cible}_1 + \text{KS}_1 \times d \\ \text{Cible}_i - \text{KI}_i \times d \leq C_i^n + f_i(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \\ C_m^n + f_m(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \leq \text{Cible}_m + \text{KS}_m \times d \end{cases} \quad (11)$$

ou encore sous forme canonique :

Minimiser d sous :

$$\begin{cases} \text{KI}_1 \times d + f_1(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \geq (\text{Cible}_1 - C_1^n) \\ \text{KS}_1 \times d - f_1(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \geq (-\text{Cible}_1 + C_1^n) \\ \text{KI}_i \times d + f_i(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \geq (\text{Cible}_i - C_i^n) \\ \text{KS}_m \times d - f_m(\delta P_l, \delta P_j, \delta P_k) \geq (-\text{Cible}_m + C_m^n) \end{cases} \quad (12)$$

Ce problème d'optimisation a toujours une solution puisque d peut être augmenté à l'infini. C'est là un avantage pratique intéressant.

Il existe de nombreux codes d'optimisation sous contraintes. Dans le logiciel CoSelect 2.0 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 CoSelect, 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 calculé. Cependant, ce réglage minimise le dépassement des limites, ce qui peut suffire.

4. Simulation du pilotage par CoSelect d'un procédé industriel

4.1. Présentation du procédé industriel et de son modèle variationnel direct

Nous reprenons l'exemple industriel introduit dans (Pairel *et al.*, 2011) (voir figure 6).

Il s'agit d'une pièce usinée en décolletage. Seuls les outils de finition sont représentés sur la figure 6. 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 C_i du procédé sont les cotes et sont nommées par leurs valeurs nominales : 15.3, 10.28, 6.36 et 5.5.

Les paramètres P_j du procédé sont les correcteurs d'outils. Les correcteurs de position, notés δTiz , 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). Il possède aussi une cote-outil $\delta T2c1$ qui peut être réglée par affûtage. T2c1 est donc aussi un correcteur même s'il beaucoup plus difficile à modifier que les autres.

Cette représentation des correcteurs d'outils de coupe sur le dessin de la pièce avec ses cotes est due à la méthodologie Copilot-pro® (Pairel et Goldschmidt, 2010) même si elle est ici améliorée. Elle permet d'établir les relations géométriques entre ces correcteurs et les cotes et donc le modèle variationnel de ce procédé.

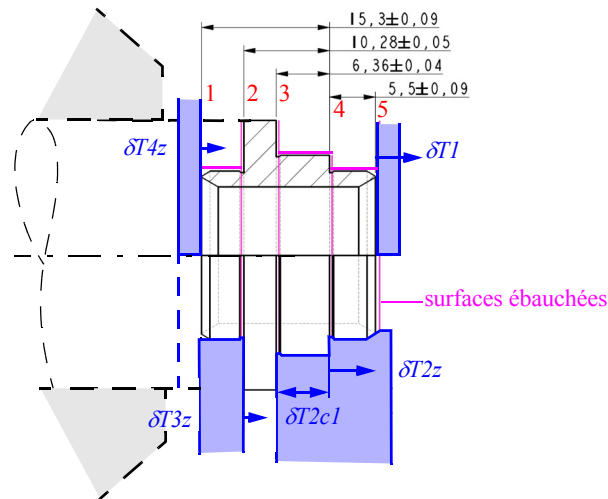


Figure 6. Cotes finies et outils de finition

Le dessin permet de voir qu'un déplacement position $\delta T2z$ 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 :

$$[\delta C] = [E] \cdot [\delta P] \quad (13)$$

avec $[E]$, la matrice d'incidence des paramètres sur les caractéristiques donnée dans le figure 7 ci-dessous.

	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

Figure 7. Matrice d'incidence $[E]$ des correcteurs sur les cotes finies

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 dans les pilotages par la pseudo-inverse et par CoSelect.

4.2. Mise en place de la simulation

Le simulateur de production a été réalisé avec Excel®. Nous avons simulé une usure des outils à laquelle s'ajoute une dispersion aléatoire instantanée des cotes « fabriquées ». Le tableau 1 donne la dérive imposé 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 1. Lois d'usure simulées des outils

Correcteur outil	Dérive / pièce (µm)
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 8) puis sur les 150 dont elles font parties (figure 9).

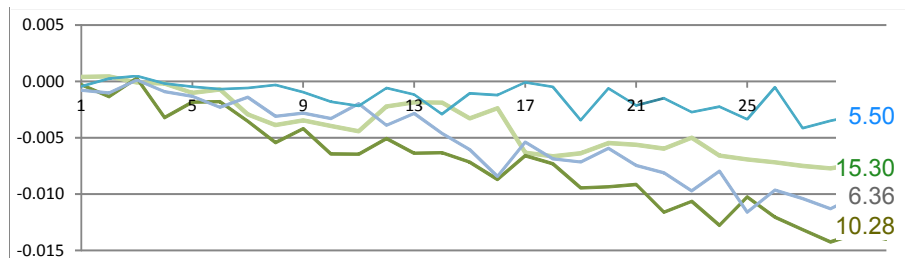


Figure 8. Variations des cotes sur les 30 premières pièces

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 10).

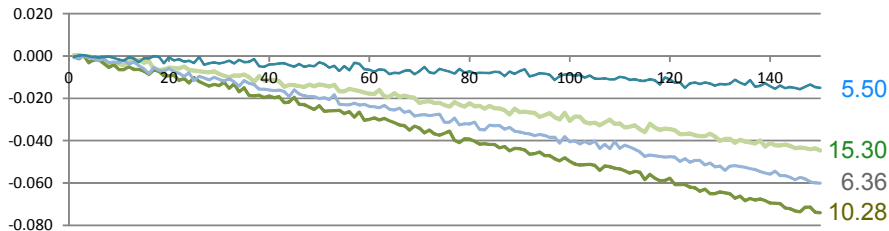


Figure 9. Variations des cotes sur les 150 pièces

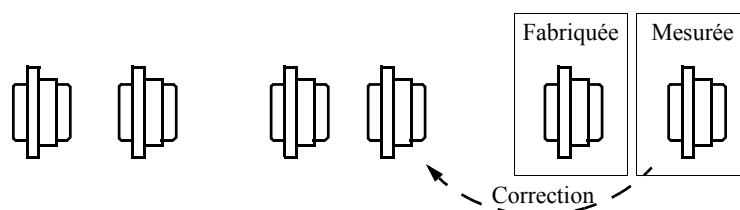


Figure 10. Période de 2 utilisée pour la simulation

En pratique c'est une période minimale car la transitique entre la machine-outil et le moyen de production peut contenir aussi d'autres pièces ce qui allonge encore la période (voir figure 3). 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

Il n'est pas possible en pratique de corriger le correcteur de forme T2c1 toutes les deux pièces car cela nécessiterait le changement de l'outil ou son ré-affûtage. C'est pourquoi le pilotage par la pseudo-inverse interdit de pouvoir prendre en compte un correcteur de ce type. Avec le correcteur de position T4z également figé, la matrice d'incidence n'a alors plus que trois colonnes pour 4 lignes dont une nulle (voir figure 11). En effet la cote de 6.36 ne dépend que de T4z. On ne pourra donc pas la corriger et elle va dériver (voir figure 14). En pratique il faudra donc prévoir une procédure de surveillance et de correction complémentaire et spécifique de cette c c ce qui alourdira le travail des opérateurs.

La figure 12 donne la pseudo-inverse. Les figures 13 et 14 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.

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

Figure 11. Sous-matrice d'incidence permettant d'établir le modèle pseudo-inverse

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

Figure 12. Matrice pseudo-inverse pour le pilotage de même nom

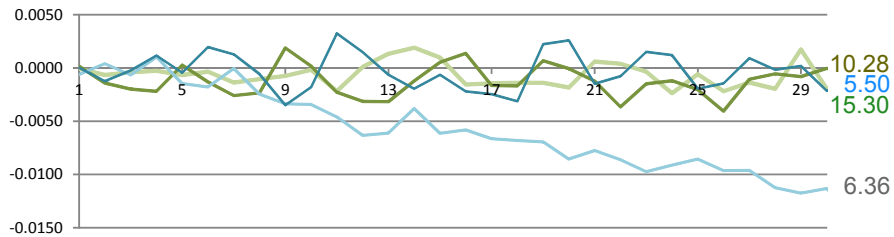


Figure 13. Résultat des réglages par le modèle pseudo-inverse sur les 30 premières pièces

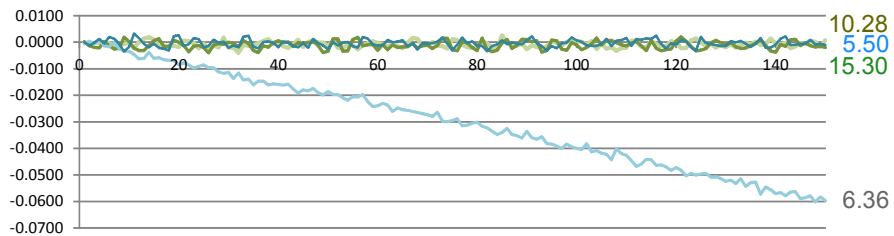


Figure 14. Résultat des réglages par le modèle pseudo-inverse sur les 150 pièces

4.4. Pilotage par CoSelect

Comme pour le pilotage par le modèle pseudo-inverse, le correcteur de l'outil de tronçonnage T4z va être figé. Cela se fait en le classant dans le groupe 0 (voir l'interface partielle de CoSelec 2.0 sur figure 15). 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 son réglage, les limites de contrôle de la cote 6.36 ont été élargies le plus possible étant donnée la dispersion aléatoire de la cote. 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 colonnes LimContInf et LimContSup de l'interface partielle sur la figure 16).

Nom	T1z	T2z	T3z	T2c1	T4z
Niveau	1	1	1	2	0
Plafond	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Correctio...	-0.0097	-0.0060	-0.0111	0.0000	0.0000
▶ Etat	Utilisé	Utilisé	Utilisé	Inutilisé	Désactivé
15.3	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	-1.0000
10.28	0.0000	1.0000	-1.0000	0.0000	0.0000
6.36	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
▶ 5.5	1.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Figure 15. Configuration des correcteurs dans CoSelect 2.0

Nom	LimTolInf	LimContInf	Cible	LimContS...	LimTolSup	Nb mesures	Val mesurée
15.3	-0.0900	-0.0030	0.0000	0.0030	0.0900	1	0.0061
10.28	-0.0500	-0.0030	0.0000	0.0030	0.0500	1	-0.0052
6.36	-0.0400	-0.0350	0.0000	0.0350	0.0400	1	-0.0010
5.5	-0.0900	-0.0030	0.0000	0.0030	0.0900	1	0.0038

Figure 16. Configuration des cotes dans CoSelect 2.0

Les figures 17 et 18 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 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. Ainsi la pente de la dérive plus longue. Evidemment cela augmenterait aussi la dispersion globale de la cote. Il y a donc là un arbitrage ou un compromis à trouver en tenant compte aussi de l'usure maximale admissible réelle de l'outil qui peut nécessiter un changement ou un ré-affûtage sur une période plus courte.

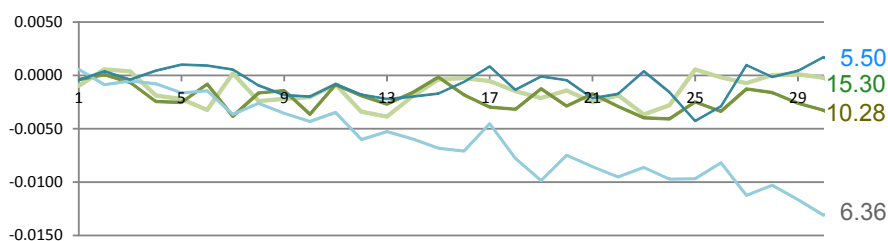


Figure 17. Résultat des réglages par CoSelect sur les 30 premières pièces

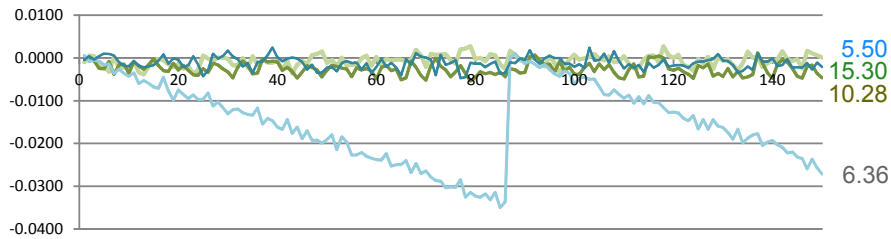


Figure 18. Résultat des réglages par CoSelect sur les 150 pièces

4.5. Comparaison des performances des deux pilotages

CoSelect a déclenché 30 réglages alors que la pseudo-inverse en a fait 75. En effet les 45 autres pièces mesurées avaient leurs cotes dans les limites de contrôle et n'ont donc pas déclenché de réglage par CoSelect. De plus, lors des réglages, certains correcteurs n'ont pas été modifiés. Cela peut être observé sur la figure 19, tout particulièrement pour le correcteur T3z. CoSelect peut donc être utilisé en réglage manuel alors que la pseudo-inverse ne le peut pas en pratique, en tout cas avec des périodes courtes.

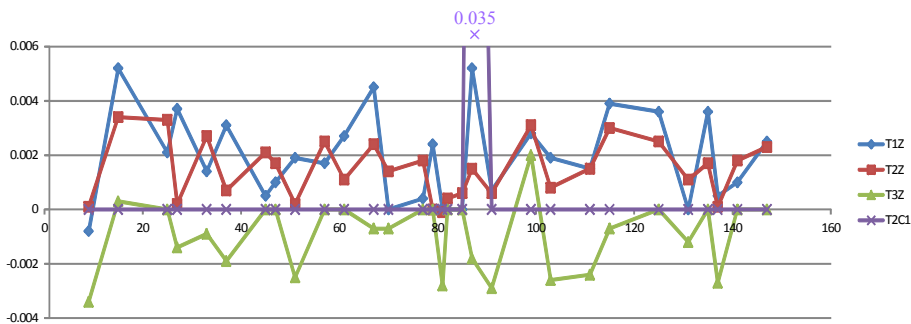


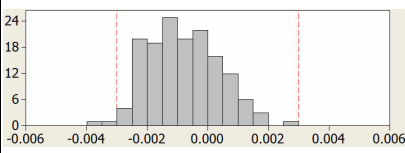
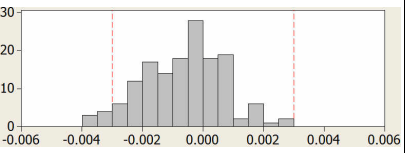
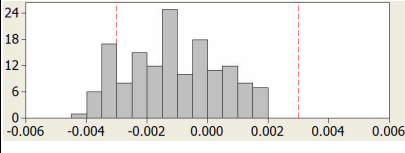
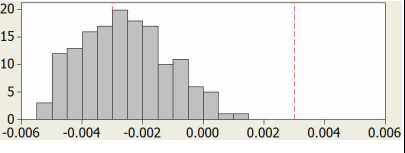
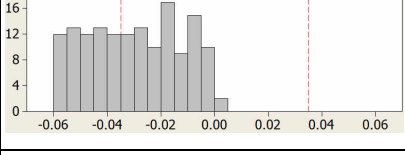
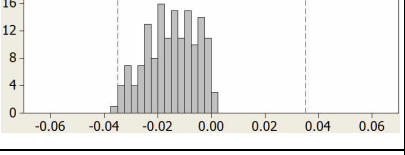
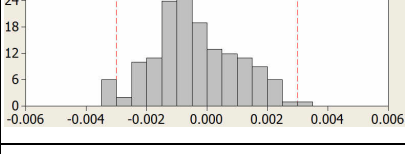
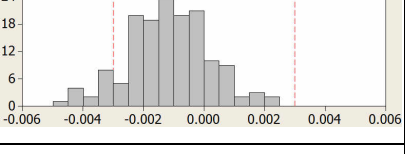
Figure 19. Les trente réglages des correcteurs par CoSelect

Malgré un nombre de réglages plus de deux fois inférieur au nombre de réglage par la pseudo-inverse, les « qualités » des cotes « fabriquées » par CoSelect et par la pseudo-inverse sont très proches. La comparaison des moyennes et des écart types expérimentaux dans le tableau 2 ci-dessous permet de dire que CoSelect ne disperse pas plus que la pseudo-inverse 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 2, les limites de contrôle ont été tracés en pointillés. Elles sont nettement en-deçà des limites de tolérance (sauf pour la cote de

6.36 qui a des limites de contrôle élargies). Aucune des 150 pièces n'est hors tolérance.

Tableau 2. Histogramme, écart type expérimental s et moyenne m de chaque cote

	Pseudo-inverse	CoSelect
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

Le réglage statistique et sélectif, que nous proposons, fusionne la surveillance SPC avec la régulation de procédés discrets en apportant 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 d'une part, il permet d'augmenter la durée d'utilisation des outils et, d'autre part, il permet au régleur de la machine d'intervenir sur ce classement selon ses besoins.

– 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 d'une production sont très similaires à celles obtenues par les techniques de pilotage basé sur le critère des moindres carrés, les plus courantes.

– 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 des procédés réglés manuellement.

– 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 novateur, appelé CoSelect, qui peut être téléchargé en suivant le lien internet ci-dessous et utilisé sous contrat : <https://www.polytech.univ-savoie.fr/index.php?id=444>

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

Merci à mon collègue Maurice Pillet qui m'a fourni le simulateur Excel®. Merci à Fabrice Frelin, programmeur informatique au laboratoire SYMME, qui a développé le logiciel sur la base de mes algorithmes de calcul et d'optimisation.

Bibliographie

- 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.
- Del Castillo E., & Rajagopal R. (2002). A multivariate double EWMA process adjustment scheme for drifting processes. *IIE Transactions*, 34, 1055–1068.
- 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.
- Del Castillo E., (2006). Statistical process adjustment: a brief retrospective, current status, and some opportunities for further work. *Statistica Neerlandica*, 60 (3), 309–326.
- Deming W. E. (1982). *Out of the Crisis*. The MIT Press, 1982.
- Grubbs F. E., (1983). An Optimum Procedure for Setting Machines or Adjusting Processes. *Journal of Quality Technology*, 15, 186-189. (A reprint of an article from the July 1954 issue of Industrial Quality Control).
- 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.
- 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.
- Pairel É., & Goldschmidt E. (2010). *Procédé de préparation de réglages d'outils, dispositif de préparation de réglages d'outils et procédé de réglage d'outils*. Brevet Européen en copropriété Cetim-Ctdec, Université Savoie Mont Blanc, publié le 04/08/2010.
- 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.
- Runger G., Lian Z., & Del Castillo E. (2010). Optimal multivariate bounded adjustment. *IIE Transactions*, 42(10), 746–752. doi:10.1080/07408171003670967.
- Shewhart W. A., (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. ASQ Quality Press, 1931, 501 pages.
- Tiplica T. (2002). *Contributions à la maîtrise statistique des processus industriels multivariés*. Thèse de doctorat en Sciences et Technologies Industrielles. Université d'Angers.
- Tseng S.-T., Chou R.-J., & Lee S.-P. (2002). A study on a multivariate EWMA controller. *IIE Transactions*, 34, 541–549.
- 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.

Article soumis le 12 mai 2015

Accepté le 8 octobre 2015

