

LIMITES ET "ALARM INDEX" DU MONOVARIE AU GPC

LAFAYE DE MICHEAUX Daniel

GPC System

Résumé en anglais et en français :

Nous proposons une clarification de la définition des limites, à utiliser pour le contrôle de processus. Nous préconisons trois niveaux de limites associés à trois utilisations différentes. Ces limites sont utilisables en Maîtrise Statistique des Processus (MSP) monovariée classique, mais leur définition est ici étendue aux indicateurs spécifiques d'anomalie, indicateurs multivariés du Global Process Control (GPC). Ces limites permettent d'introduire la notion d'Alarm Index, et de proposer des graphiques pertinents pour identifier rapidement les dysfonctionnements les plus critiques.

We propose a clarification of the definition of limits to be used for process control. We recommend three levels of limits, associated with three different uses. These limits can be used in traditional univariate Statistical Process Control (SPC), but their definition is also extended to the specific anomaly indicators which are multivariate indicators of Global Process Control (GPC). These limits enable us to introduce the notion of Alarm Index, and to propose graphics that are particularly appropriate for rapid identification of the most critical malfunctions.

Mots clés : maîtrise statistique des processus, MSP, limites de contrôle, limites de maîtrise, limites de spécification, GPC, multidimensionnel, statistiques multivariées, global, alarm index.

1 – Introduction

Dans le cadre de la production industrielle, l'objectif principal de la Maîtrise Statistique des Processus (MSP) est de maintenir les caractéristiques de qualité du produit fabriqué au plus près de leurs valeurs cibles définies par la conception produit. Pour cela on cherche :

- à limiter la variabilité de chacune de ces caractéristiques dans le cadre d'un fonctionnement correct, appelé aussi fonctionnement "sous contrôle",
- à détecter le plus tôt possible un dysfonctionnement et déclencher une action corrective bien adaptée.

Cet article traite uniquement de ce deuxième point, c'est à dire de la décision de considérer que le processus n'est pas dans son état correct et de l'identification de la cause de ce dysfonctionnement.

Il n'est pas facile de détecter avec certitude un dysfonctionnement car seul un nombre limité des caractéristiques du produit sont évaluables par une mesure. Le détecter tôt est également difficile car les mesures sont souvent disponibles en fin de ligne, sur le produit fini et il n'est pas rare de disposer d'une mesure plusieurs heures ou même plusieurs jours après la sortie de ligne du produit.

Pour pallier le manque de mesures sur le produit et anticiper la détection de dysfonctionnement, la MSP procède au suivi de l'ensemble des caractéristiques disponibles sur le processus, données comprenant des caractéristiques des matières premières et des paramètres du procédé, en plus des mesures faites sur le produit. Bien que le nombre de données qu'il est possible d'associer à un produit puisse alors atteindre

plusieurs centaines de mesures, il est clair qu'on ne dispose toujours que d'une vue partielle de la réalité du processus.

Dans le cadre de la MSP classique la détection d'anomalie de fonctionnement est basée sur une variation jugée importante d'une ou plusieurs grandeurs disponibles pour la mesure (cf [AFNOR], [Daudin], [Montgomery], [Palsky], [Pillet]).

Juger de l'importance de la variation d'une mesure consiste à la comparer à une limite haute et une limite basse que l'on se donne autour de la valeur cible. Si la valeur d'une mesure se trouve au-delà de ces limites, un dysfonctionnement est détecté, son origine doit alors être correctement identifiée pour que l'action corrective adéquate soit déclenchée.

Le problème crucial de la détection d'anomalies de fonctionnement est donc celui de la détermination de ces limites pour chaque grandeur mesurée. Plusieurs approches sont utilisées pour définir ces limites. On observe souvent, au sein d'une même entreprise, que des modes différents de définition des limites coexistent sans qu'une véritable réflexion le justifie.

Nous proposons pour la MSP classique de distinguer trois niveaux de limites correspondant à trois interprétations bien distinctes.

Nous pouvons alors associer à chaque mesure un indicateur "alarm index" qui donne une unité commune aux différentes variables ainsi qu'une même interprétation des valeurs prises.

Le GPC (Global Process Control) est une extension de la MSP classique qui permet une détection anticipée et surtout l'identification d'anomalie de fonctionnement d'un processus de production grâce à des outils originaux de statistique multivariée [Lafaye de Micheaux a, b, c] : Nous montrons comment ces trois niveaux de limites ainsi que les alarm index ont été intégrés dans les outils GPC

2 – Contrôle MSP : Limites pour une variable

Nous allons dans cet article nous restreindre aux limites définies sur les mesures ou sur les moyennes de mesures associées à des d'échantillons successifs, nous n'abordons pas les limites définies sur des cartes EWMA ou CUSUM.

La définition des limites mises en œuvre dans l'industrie diffèrent fortement dans le temps et suivant le lieu : ces différences peuvent parfois s'expliquer par les spécificités du processus de fabrication, mais elles sont dues le plus souvent à l'historique de la culture de l'entreprise dans les techniques de production. Il est vrai qu'il n'est pas toujours facile de faire une distinction claire entre les divers vocables que l'on trouve dans la littérature ou dans les normes : "limites de spécification" (de tolérance), "limites de contrôle" type Shewhart, "limites de contrôle élargies", "moyennes refusables" et "limites de maîtrise".

On peut constater que chacune de ces définitions rend compte de l'une des trois fonctions suivantes :

- détection que le processus a quitté son fonctionnement correct normal,
- déclenchement d'une action corrective pour ramener le processus dans son fonctionnement correct normal avant qu'un mauvais produit ne soit fabriqué (objectif "zéro défaut"),
- déclenchement d'une alerte car la conformité des produits n'est plus assurée, cette alerte doit déclencher une action corrective d'urgence

Ces trois fonctions bien distinctes doivent conduire selon nous à trois niveaux de limites correctement définis :

- niveau 1 : "limites d'avertissement" notée UCL1 (limite haute : Upper Control Limit) et LCL1 (limite basse : Lower Control Limit) pour la détection que le processus a quitté son fonctionnement correct normal, limites associées à la couleur orange,
- niveau 2 : "limites d'action" notées UCL2 (limite haute) et LCL2 (limite basse) pour le déclenchement d'une action corrective évitant qu'un produit non-conforme ne soit fabriqué, limites associées à la couleur rouge,
- niveau 3 : "limites d'urgence" notées UCL3 (limite haute) et LCL3 (limite basse) pour le déclenchement d'actions correctives d'urgence car la conformité des produits aux

spécifications n'est plus assurée (correction de l'origine du dysfonctionnement, arrêt de production, tri des produits, ...), limites associées à la couleur noire.

La confusion de ces trois niveaux dans la pratique courante conduit à des fausses alarmes trop nombreuses et/ou à des corrections trop tardives qui engendrent pertes de production et rebuts.

Ainsi, un contrôle de processus basé sur les seules limites de spécification (notée USL et LSL) conduit à ignorer les limites de niveau 1 et à confondre les niveaux 2 et 3. L'aspect trop tardif de la réaction corrective incite certains à définir des limites de niveau 1 et 2 sous une forme empirique du type :

$$UCLx = \text{cible} + a \cdot (\text{USL} - \text{cible}) \quad \text{et} \quad LCLx = \text{cible} - a \cdot (\text{cible} - \text{LSL})$$

avec $a = 1/3$ ou $1/2$ ou $2/3$

Le contrôle basé sur les cartes de Shewhart confond les niveaux 1 et 2 et ignore généralement le niveau 3. Les limites sont définies par

$$UCL = \text{centre} + k \cdot \sigma / \sqrt{n} \quad \text{et} \quad LCL = \text{centre} - k \cdot \sigma / \sqrt{n} \quad (1)$$

avec $n =$ taille de l'échantillon

$$k = u(1 - \alpha/2),$$

$u()$ fonction de répartition inverse de la loi de probabilité gaussienne standard

α taux de fausse alerte toléré

Cette dernière pratique du contrôle peut conduire à déclencher des actions correctives nombreuses et coûteuses pour maîtriser des paramètres dont les variations sont sans grande incidence sur la qualité finale du produit par exemple dans le cas où l'aptitude est importante. Le choix traditionnel de $k=3$ et $\alpha=0,27\%$ est rarement remis en cause pour être adapté au contexte du contrôle : fréquence des mesures et enjeux économiques. De plus, lorsque l'on surveille p caractéristiques simultanément, le taux réel de fausse alerte est de l'ordre de $p \cdot \alpha$ ce qui peut conduire à une multiplication d'arrêts inutiles et de corrections erronées, cela peut même entraîner une décrédibilisation de la MSP.

Enfin, ces limites, étant définies uniquement à partir du "risque fournisseur" α , ne tiennent pas compte directement du "risque client" β d'accepter l'hypothèse de fonctionnement correct alors qu'en fait la grandeur mesurée n'est plus centrée sur la cible. Les utilisateurs avisés savent ajuster la taille de l'échantillon n pour maintenir β à un niveau acceptable pour le client.

Les "limites de maîtrise" ou "limites de type Shewhart" définies dans la norme AFNOR NFX06 031 cherchent à minimiser le coût des mesures par échantillonnage tout en préservant le client du risque β . La norme prévoit ainsi d'ajuster la taille de l'échantillon prélevé de sorte que les limites 1 et 3 soient confondues et fait alors coïncider la limite d'action de niveau 2 avec cette valeur commune.

Pour un taux p_0 de non conformes accepté par le client (taux proche du "zéro défaut"), les limites de maîtrise Lms et Lmi (limites "de type Shewhart" selon AFNOR X06 031) sont alors définies à partir des "moyennes refusables" mrs et mri par les formules :

$$\begin{aligned} mrs = Ts - \sigma \cdot u(1 - p_0) & \quad (2) \quad \text{et} & \quad Lms = mrs - u(1 - \beta) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ mri = Ti + \sigma \cdot u(1 - p_0) & & \quad Lmi = mri + u(1 - \beta) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \end{aligned} \quad (3) \quad \text{avec } u() \text{ fonction définie plus haut}$$

Lorsque l'aptitude du processus est suffisante on peut choisir n de sorte que les limites de contrôle de Shewhart définies par la formule (1) coïncident avec les limites de maîtrise de la formule (3) ; n étant forcément entier, on peut être amené à un réajustement de α , β ou p_0 .

Nous proposons de définir généralement

- les limites de niveau 1 : sous la forme de limites de contrôle de Shewhart définies à partir d'un taux α adapté au contexte du contrôle

- les limites de niveau 3 : en deçà des limites de tolérances et des moyennes refusables comme dans le calcul des limites de maîtrise proposé par l'AFNOR,

Le plus souvent, lorsque le processus est bien capable, on obtient ainsi des limites 3 extérieures aux limites 1. Dans ce cas on choisit les limites de niveau 2 entre limites 1 et limites 3 en tenant compte des coûts de réglage et de l'impact sur la qualité du produit d'un écart à la cible de la mesure : si un écart faible de la mesure à la cible influe fortement sur la qualité finale du produit on corrigera le plus tôt possible en plaçant les limites d'action sur les limites de niveau 1, si par contre une action de correction s'avère coûteuse (si elle nécessite par exemple un arrêt prolongé de production), on préférera attendre le plus possible avant d'agir, ainsi on fera coïncider les limites 2 avec les limites 3.

Dans le cas où les limites 3 ne sont pas extérieures aux limites 1 il faut augmenter la taille n de l'échantillon ou reconsidérer les valeurs choisies pour α , β ou p_0 afin de se ramener au cas précédent.

Certains cas particuliers doivent être envisagés (faible aptitude, absence de limites de tolérance, ...), leur traitement déborde du champ de cet article.

3 – Contrôle MSP : "Alarm index" pour une variable

La MSP classique évalue l'importance du décalage d'une mesure en exprimant son écart à la cible en nombre d'écart types (écart type associé à la variabilité du fonctionnement correct). Ainsi, toutes les mesures sont munies d'une unité qui rend leurs variations comparables.

Une telle unité de mesure n'est pas facile à interpréter par des utilisateurs non statisticiens, par ailleurs elle ne rend pas compte de l'impact qu'un écart à la cible peut avoir sur la qualité du produit. Par exemple un écart à la cible de 4σ n'a pas la même importance selon l'indice d'aptitude associé à la mesure : si $Cpk = 1$, un tel écart signifie que le produit n'est pas conforme, alors que si le Cpk est de 2, une action corrective est sans doute nécessaire mais le produit est toujours conforme.

Pour pouvoir évaluer rapidement si une mesure, ou un ensemble de mesures, doit être considérée comme conforme au fonctionnement normal ou si une action doit être envisagée, nous proposons un indice dont l'interprétation est immédiate en termes concrets et opérationnels :

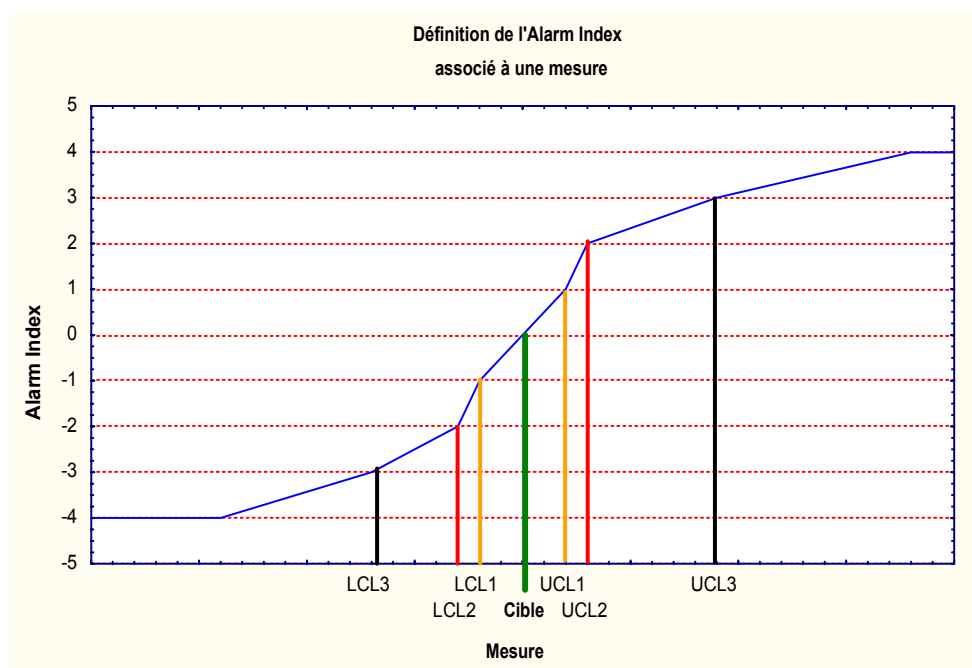


Figure 001 : Définition de l'alarm index

L'indice vaut

- 0 pour la valeur cible
- 1 pour la valeur UCL1 limite supérieure d'avertissement
- 2 pour la valeur UCL2 limite supérieure d'action

- 3 pour la valeur UCL3 limite supérieure de non conformité
- 4 pour la valeur égale ou supérieures à Cible + 2 (UCL3-Cible)
- -1 (respectivement -2 , -3) pour la valeur LCL1 (respectivement LCL2 , LCL3)
- -4 pour la valeur égale ou supérieure à : Cible + 2 (LCL3-Cible)

Entre ces valeurs de référence l'Alarm Index est fonction linéaire de la mesure. Cette définition assure une relation continue entre mesure et Alarm Index

Cette définition permet, dans l'analyse d'un historique de production comportant un grand nombre de variables, de créer des graphiques qui identifient clairement les dysfonctionnements principaux auxquels il faut trouver rapidement une parade en prenant des mesures préventives :

- graphique des variables critiques : graphique de type Pareto qui identifie les variables ayant donné lieu au plus grand nombre de mesures hors contrôle en classant celles-ci par gravité (niveau d'Alarm Index) ;
- graphique des observations critiques (figure 003) : graphique de type Pareto indiquant le nombre d'observations hors contrôle pour plusieurs variables simultanément.

Sur la figure 002 et 003 on a retenu que les niveaux de gravité 2 et 3 qui sont les plus critiques.

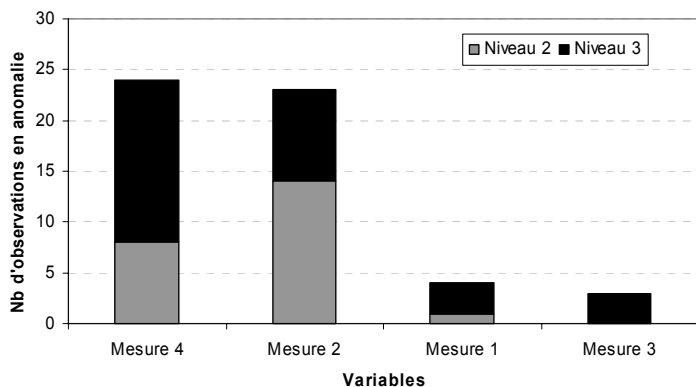


Figure 002 : Variables critiques

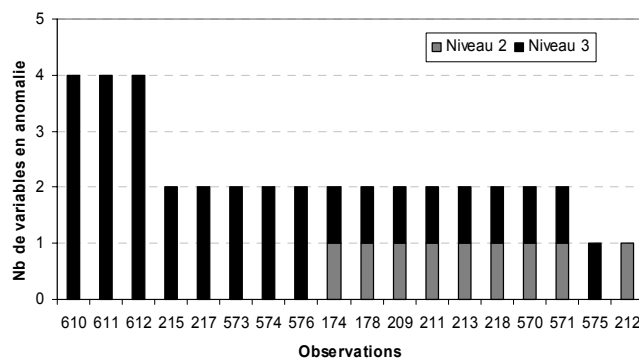


Figure 003 : Observations critiques

4 – Contrôle GPC : Limites sur les indicateurs d'anomalies.

Le GPC (Global Process Control) a été développé pour pallier aux problèmes rencontrés par l'usage de la MSP lorsqu'on veut suivre plusieurs mesures associées à la même unité de production : prolifération des fausses alertes, non détection de certains dysfonctionnements véritables, difficulté d'identification de la cause racine d'un dysfonctionnement détecté.

Les outils GPC sont basés sur un modèle probabiliste multidimensionnel des mesures prises sur un processus industriel. Ce modèle étant un prolongement de l'hypothèse de distribution gaussienne qui sous tend les techniques classiques de MSP, il a été validé sur des données d'origines très différentes (industrie chimique, automobile, semi-conducteur, ...). On se référera aux articles cités pour plus de détails sur le GPC.

Les figures 004 et 005 illustrent dans le cas de deux dimensions les deux principaux aspects de ce modèle:

1. En fonctionnement correct les mesures multidimensionnelles sont situées principalement dans un domaine de forme ellipsoïdale. La figure 004 montre combien la zone d'acceptation de bon fonctionnement définie par le GPC (zone interne à l'ellipse) est fortement différente de la zone rectangulaire d'acceptation associée à deux cartes de contrôle de Shewhart classiques. En gris apparaissent alors des zones de non détection d'anomalie pour les cartes de contrôles classiques qui appartiennent, à juste titre, à la zone de détection GPC.
2. Une cause d'anomalie entraîne, dans l'espace multidimensionnel, un éloignement des points de mesure vis-à-vis du centre associé au fonctionnement correct, cet éloignement se fait dans une

direction qui caractérise la cause d'anomalie (voir figure 005). Si l'anomalie provient d'une dérive de la moyenne, les divers points sont situés d'un même côté du centre (exemple de la cause 1), si l'anomalie correspond à une augmentation de variabilité on trouvera des points de mesures de part et d'autre du centre (exemple de la cause 2).

Le GPC définit un indicateur global qui détecte si le point de mesure se trouve en dehors de l'ellipsoïde d'acceptation : il est alors reconnu comme "en anomalie" ("hors contrôle"). L'analyse GPC permet de classer les observations en anomalie en fonction de leur direction d'éloignement, les regroupant ainsi par causes de dysfonctionnement. A chaque cause d'anomalie est alors associé un indicateur spécifique de son intensité : cet indicateur correspond à l'abscisse du point mesure en anomalie sur l'axe de la direction d'anomalie. Sur cet axe on a pris l'écart type des points sous contrôle comme unité.

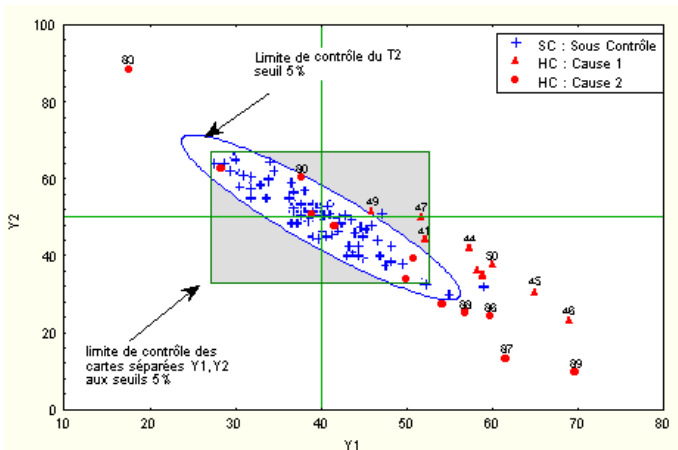


Figure 004 : Zones d'acceptations MSP et GPC

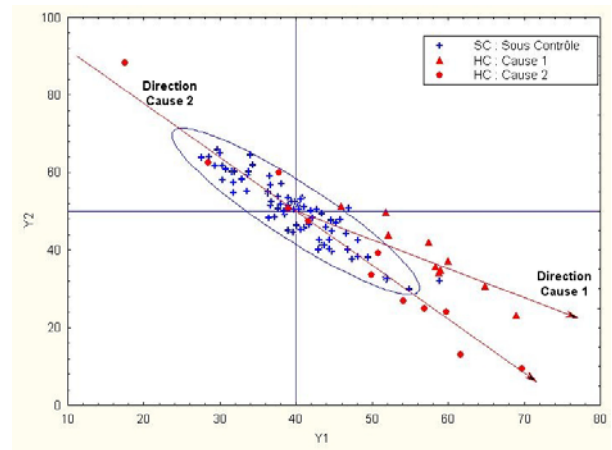


Figure 005 : Directions d'anomalies

Il est alors possible de définir sur un tel indicateur spécifique des limites de niveaux 1, 2 et 3 qui permettent d'évaluer l'importance pratique de l'anomalie en conservant l'interprétation des trois niveaux qui ont été définis pour les mesures initiales.

Le logiciel "GPC Scan" d'analyse d'historique propose des valeurs par défaut de ces limites qui sont définies à partir des limites sur les mesures initiales selon le principe suivant :

La limite de niveau x est franchie par l'indicateur spécifique d'anomalie lorsque un point s'éloignant du centre sur l'axe de l'anomalie franchit pour la première fois une limite de niveau x pour une des mesures initiales.

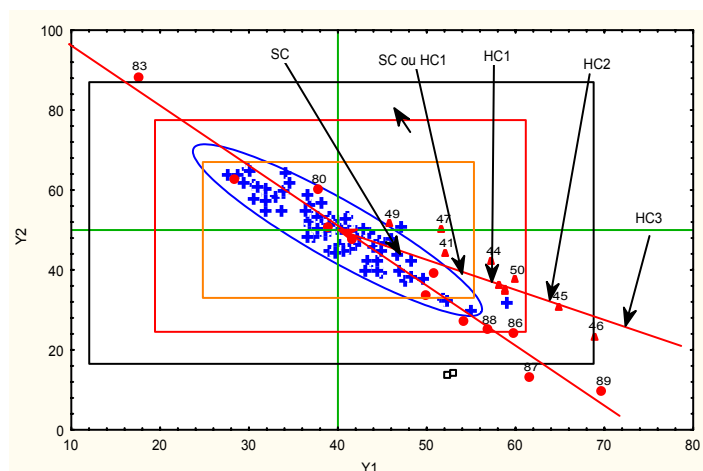


Figure 006 : Définition des limites sur un indicateur spécifique d'anomalie

La figure 006 illustre graphiquement ce principe : les trois rectangles emboîtés correspondent aux trois niveaux de limites définies sur les mesures initiales Y1 et Y2. L'indication HCx valable pour un tronçon de l'axe d'anomalie de cause 1 signifie que la limite de niveau x est franchie par l'indicateur spécifique d'anomalie mais pas la limite de niveau x+1. Ces tronçons sont limités par les rectangles associés aux niveaux x et x+1.

Ces valeurs par défaut sont conveniennent généralement mais elles peuvent être modifiées lorsque l'on connaît la nature technique exacte de l'anomalie. Si, par exemple, l'anomalie correspond à un phénomène dangereux pour le produit ou pour le processus on pourra rapprocher les limites d'avertissement et d'action de 0 (moyenne de l'indicateur pour un fonctionnement correct) afin de détecter et agir au plus tôt en profitant au maximum des possibilités d'anticipation du GPC . Ainsi le tronçon mentionné "SC ou HC1" sera associé à une valeur de non détection pour les limites par défaut mais pourra correspondre à une détection d'anomalie s'il faut détecter au plus tôt, la sortie de l'ellipse ayant permis de détecter le dysfonctionnement. Si l'anomalie s'avère sans conséquence majeure on préférera écarter les limites de zéro afin d'éviter des interventions inutiles.

5 – Contrôle GPC : "Alarm index" d'une observation en anomalie

Ayant ainsi défini les limites sur les indicateurs spécifiques d'anomalie, on peut associer à chaque observation en anomalie "l'alarm index" définie sur cet indicateur comme indiqué au paragraphe 3. Deux graphiques donnent alors une vision très claire des dysfonctionnements constatés sur l'historique. Le graphique "alarm summary", figure 007, présente toutes les observations en abscisse. Les observations sous contrôle sont représentées par des croix vertes d'ordonnées 0. Une observation en anomalie est représentée par un symbole qui identifie la cause de l'anomalie ayant comme ordonnée "l'alarm index" associé à l'anomalie. D'un seul coup d'œil on peut ainsi repérer le type, l'importance et l'instant d'apparition des différents dysfonctionnements apparus au cours de l'historique.

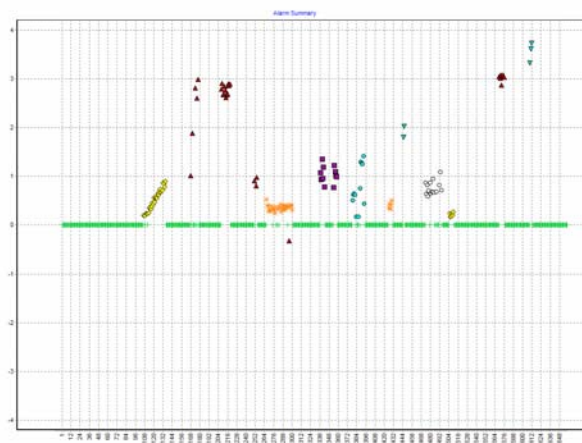


Figure 007 : Graphique "alarm summary"

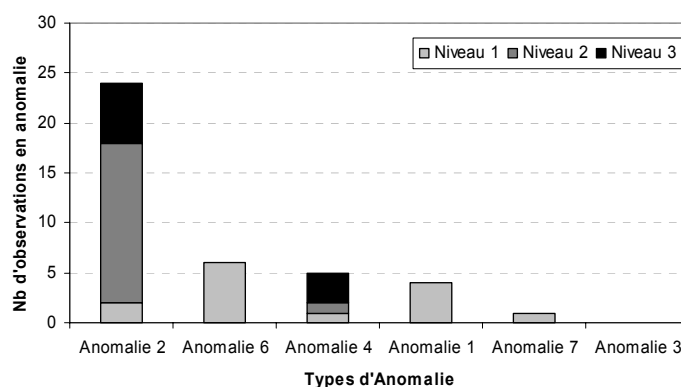


Figure 008 : Graphique des anomalies critiques

Le graphique des "anomalies critiques" figure 008, met en évidence les anomalies pour lesquelles il faut en priorité prendre des mesures de prévention : en abscisse on a disposé les types d'anomalie et en ordonnée le nombre d'occurrences en distinguant les niveaux de gravité par des couleurs distinctes (orange, rouge, noire) sur les barres. On préfère en première analyse représenter ce graphe sous forme Pareto pour repérer rapidement les anomalies les plus critiques.

6 – Discussion

On peut trouver cette approche séduisante dans le principe mais peu réaliste pour plusieurs raisons :

- 1- On trouve souvent difficile de déterminer une limite de spécification sur des paramètres procédés parce que l'on ne connaît pas clairement l'impact de ce paramètre sur la qualité du produit final.
- 2- Comment définir ces 3 niveaux de limites quand on ne connaît même pas de limites de spécification ou quand le service méthode a proposé des limites irréalistes ? Déterminer 3 limites peut apparaître comme un véritable casse tête pour l'ingénieur process.
- 3- L'opérateur doit disposer de règles de décisions simples : multiplier les limites peut créer une complexité qu'il n'arrivera pas à gérer.

Les réponses à ces critiques se trouvent intégrées dans les outils logiciels GPC, mais les détailler déborde le cadre de cette présentation ; précisons cependant que :

- la réflexion sur la signification des limites peut être l'occasion pour les responsables d'affiner leur compréhension du processus ;
- les premières analyses peuvent être basées sur 3 niveaux de limites proposées par défaut à 3σ , 4.5σ et 6σ ; on peut aussi omettre les limites de niveau 3 en cas d'absence de contraintes de spécification ;
- Les trois niveaux de limites sont à examiner, dans une phase d'analyse d'historique, par l'ingénieur responsable du process assisté de préférence par le responsable qualité et le responsable méthode. Pour le contrôle temps réel, l'opérateur dispose d'une interface particulière (GPC Assist) qui lui indique clairement par message, image ou vidéo l'action adaptée à l'anomalie. GPC Assist prend en compte le diagnostic statistique, l'intègre par un moteur d'intelligence artificielle à d'autres informations qualitatives sur le contexte de production (exécution d'une opération de maintenance, ...), et propose alors l'action adaptée à entreprendre.

7- Conclusion

Actuellement, nous constatons que trop souvent, les limites de contrôle sont positionnées de façon peu rigoureuse, alors qu'elles ont une importance fondamentale dans le suivi de la qualité de production. Les nouvelles limites, définitions et méthodes que nous proposons ici ont pour objectif de rationaliser et de simplifier la mise au point du contrôle de procédé, et de rendre beaucoup plus efficace ce contrôle en l'étendant au domaine multidimensionnel.

Références :

[AFNOR] AFNOR. *Cartes de contrôle*. norme NFX06 031 -0 à -4, AFNOR, Paris,

[Daudin] J.-J. Daudin, S. Tapiero. *Les outils et le contrôle de la qualité*. Economica, Paris, 1996.

[Lafaye de Micheaux-a] D. Lafaye de Micheaux. *Cartes de contrôle multidimensionnelles*. 2èmes journées Statistique pour la Qualité, MFQ, Paris, Septembre 98.

[Lafaye de Micheaux-b] D. Lafaye de Micheaux. *Prolonger la MSP par la "Maîtrise Globale du Processus"*. Qualité références, Paris, juillet 2000.

[Lafaye de Micheaux-c] D. Lafaye de Micheaux. *Indicateurs multivariés pour une maîtrise globale de processus*. Actes Qualita 2001, Annecy, Mars 2001.

[Lafaye de Micheaux-d] D. Lafaye de Micheaux, A. Palsky. *Les Cartes Shewhart des moyennes*. Qualité références, Paris, Janv et Avril 2000.

[Montgomery] D.C.Montgomery. *Introduction to Statistical Quality Control*. Willey & sons, 1985.

[Palsky] A. Palsky, R. Fiorentino. *Maîtrise statistique des processus continus*, AFNOR, Paris, 1994.

[Pillet] M. Pillet. *Appliquer la maîtrise statistique des procédés MSP/SPC*. Ed. d'organisations, Paris, 2000.