

# CIGI 2011

## Vers la maîtrise de la propagation des non-conformités en fabrication. Cas d'étude dans une usine d'assemblage électromécanique.

VALERIE FIEGENWALD<sup>1</sup>, SAMUEL BASSETTO<sup>2</sup>, MICHEL TOLLENAERE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GRENOBLE-INP/ UJF-GRENOBLE 1/ CNRS, G-SCOP UMR5272  
Grenoble, F-38031, France  
valerie.fiegenwald@grenoble-inp.fr, michel.tollenaere@inpg.fr

<sup>2</sup> DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET DE GENIE INDUSTRIEL, ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL  
C.P. 6079, succ. Centre-Ville, Montreal, Quebec, Canada H3C3A7  
samuel.bassetto@polymtl.ca

---

**Résumé** - Cet article s'intéresse à la mise sous contrôle de la propagation de non-conformités en fabrication. Les moyens de contrôle mis en œuvre pour garantir la performance qualité d'un système de production présentent des brèches, inhérentes à leur constitution qui peuvent laisser les défauts se propager le long de la chaîne de valeur. Ne pouvant empêcher l'existence de la propagation, il est possible de travailler à sa maîtrise. Cet article présente ainsi une méthode permettant de maîtriser la propagation des défauts au sein d'un système de production en construisant la carte de contrôle associée à la distance de propagation. Afin de calibrer la proposition, un cas d'étude est présenté issu de la propagation de problèmes qualité dans une industrie de faibles volumes du secteur de l'énergie. La simulation du dispositif proposé permet de mettre en évidence l'intérêt de la mise sous contrôle de cet indicateur.

**Abstract** – This paper is interested in controlling the propagation of assembly non-conformities. The control methods implemented to ensure the quality performance of a production system present weaknesses, inherent to their constitution, which can let non-conformities propagate along the value stream. This propagation can not be avoided but it can be mastered. This paper presents a method to master non-conformities propagation in a production system by building the associated control chart. In order to calibrate the proposition, a case study on non-conformities propagation in a low-volumes industry in the energy field is presented. The simulation of the proposed plan shows the benefits of controlling this indicator.

**Mots clés** - Maîtrise de la qualité, maîtrise des processus, propagation des défauts, barrières de contrôle.

**Keywords** – Quality control, process control, non-conformities propagation, layers of control.

---

### 1 INTRODUCTION

Cet article se focalise sur la maîtrise qualité des productions industrielles manufacturières. Il propose une méthode de mise sous contrôle de la propagation des défauts au sein des systèmes de production.

Les dispositifs de contrôle qualité au cours de la production sont pour beaucoup fondés sur des connaissances métier et des analyses des risques encourus [Bassetto, 2005]. De très nombreuses techniques d'analyses de risques existent [Tixier et al., 2002]. Elles peuvent se classer en deux grandes catégories :

1. Les analyses arborescentes (défaillances, causes et papillons) qui partent d'un évènement redouté pour en déduire les causes et les conséquences.
2. Les analyses systématiques (AMDE, AMDEC, HAZOP...) qui dressent un inventaire des défaillances possibles d'un système en suivant sa constitution.

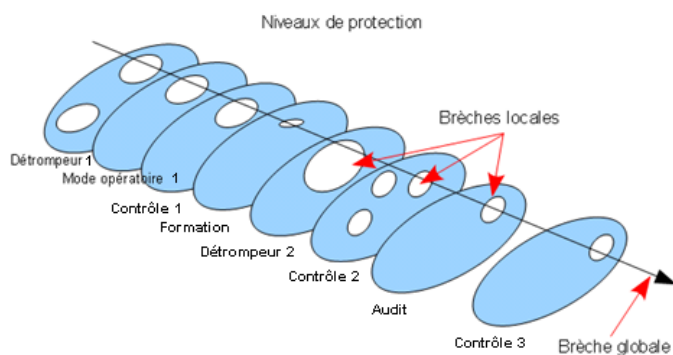
A partir de ces analyses, des actions de maîtrise sont entreprises et notamment la mise en place de barrières de contrôle. Le concept de barrières de protection, très utilisé dans les domaines de la sécurité et de la sûreté [Summers 2003], [Gowland, 2006], [Sklet, 2006], [Duijm, 2009], [Salvi et Debray, 2006], [Hollnagel, 2008], est une illustration des efforts pour prévenir la propagation des défaillances et pour les stopper au plus près de leur origine [Schippers, 2001] limitant ainsi leur impact au moins sur les coûts. De manière non exhaustive, dans le domaine de la qualité industrielle, ces barrières sont les cartes de contrôle, les prélèvements, les maintenances préventives, les tests d'acceptation, les inspections visuelles.

Dans le cas d'analyses de risques basées sur des scénarios, les moyens de détection et de prévention mis en œuvre sont évidemment limités aux risques envisagés dans ces scénarios.

Pour les analyses systématiques de type AMDEC, même si l'exhaustivité est visée, elle ne peut être garantie. Il peut y avoir des défauts qui n'ont pas été imaginés, qui surviennent et qui ne rencontrent que très peu de "résistance" au sein de l'appareil de production. Ce genre de défauts peut alors se reproduire touchant un nombre croissant de produits ou au moins se propager sur un produit tout au long de sa fabrication. Certains auteurs préconisent l'emploi de méthodes itératives [Mili et al., 2009] où les risques sont révisés à chaque détection d'un défaut, qu'il soit connu ou inconnu. Cette méthode est fondée sur la récurrence de défauts et le dépassement de seuils d'actions pour leur traitement. Cependant dans le cas de faibles volumes de production l'accumulation de défauts peut nécessiter un temps supérieur à la durée de vie du système de production rendant cette approche inutilisable.

Par ailleurs les outils de maîtrise issus de ces analyses de risques comme les inspections visuelles, les cartes de contrôles, les tests d'acceptation, présentent également des risques de non détection (risque alpha) et de fausses détections (risque beta). Depuis les travaux de Lorenzen et Vance [Lorenzen et Vance, 1986], la rapidité de détection d'un défaut (ARL1) est un élément clé de l'évaluation de la performance des moyens de détection. La notion de perméabilité de ce moyen de détection est alors prise en compte dès la conception de ce dispositif.

Ainsi les moyens de contrôle mis en œuvre pour garantir la performance qualité d'un système de production présentent des brèches, inhérentes à leur constitution. L'apparition d'un défaut et sa propagation est une composante de tout système de production, même doté d'analyses et de barrières de contrôle des mieux conçues [Perrow, 1994]. Comme illustré (Figure 1), ces brèches locales peuvent donc laisser les défauts se propager et être réitérés d'un produit à l'autre. Cette propagation impacte les indicateurs de performance de l'entreprise (Coûts, Qualité, Temps de service, Satisfaction client).



**Figure 1 : Barrières de protection et brèches locales**

Enfin, les concepts les plus en vogue dans le domaine de la production conduisent de nombreuses entreprises à entreprendre des démarches de rationalisation de leur système de production et à mettre en œuvre les outils de production dites amincies [Jina et al., 1997]. Les contrôles, étant perçus comme "improductifs" [Schippers, 2001], [Benfer, 1993] sont souvent visés par ces politiques de recentrage. Cette cure d'amincissement est parfois source de déstabilisation de l'efficacité ouvrant un peu plus encore les brèches.

La problématique est donc de mettre sous contrôle des dérives inhérentes au système de production. Les défauts apparaissent parce qu'ils ne sont stoppés par aucune barrière de protection. Plus un défaut est détecté tard, plus l'ajout de valeur inutile sur le ou les produits défectueux sera important. Si le défaut est imputable à un dérèglement, plus sa détection est tardive, plus le nombre de produits potentiellement affectés augmente. Ces retards de détection augmentent le risque de voir la détection se faire "chez le client". Un encours important de défectueux, mobilise une capacité de production (corrections de défaut ou reprises) qui n'est pas consacrée à la production à proprement parler, mais à rattraper un retard généré par les défauts. Cette surcharge de travail doit être conciliée avec les objectifs normaux de cadence et génère un stress contre-productif (tant au niveau de l'apprentissage que de la qualité produite).

Cet article se fonde sur le fait que les méthodes préventives de type analyse de risques, bien que nécessaires, présentent des limites : on ne peut pas imaginer à l'avance toutes les défaillances potentielles. Des systèmes de protection sont donc nécessaires pour limiter l'impact de ces défaillances après leur apparition. Des approches récentes sur les risques et sur la résilience organisationnelle présentent les variations et les dégradations comme des composantes quotidiennes des organisations (Weick and K. M Sutcliffe 2001; Barton and Kathleen M. Sutcliffe 2009; Erik Hollnagel 2008; E. Hollnagel, Woods, and Leveson 2006). Dans cette perspective, la fiabilité est vue non pas comme l'absence d'événements non désirés mais comme la capacité de l'organisation à prendre en charge les variations, perturbations et dégradation des conditions normales de travail (E. Hollnagel and Woods 2006) et de faire face aux dangers et incertitudes non anticipés (Douglas and Wildavsky 1983).

Ainsi on ne peut pas empêcher l'existence de la propagation, mais on peut travailler à sa maîtrise. Cet article présente une méthode qui permet un contrôle de la propagation des défauts au sein d'un système de production. Afin de calibrer la proposition, un cas d'étude est présenté issu de la propagation de problèmes qualité dans une usine du secteur de l'énergie qui travaille à l'affaire (faibles volumes et forte personnalisation des produits) et qui a été récemment confrontée à une série d'incidents qualité engendrant des interruptions de la production et pouvant impacter le fonctionnement du matériel. Ces incidents ont généré en interne un sentiment fort d'incertitude sur la maîtrise et la fiabilité du processus de réalisation.

Le but de l'article est donc de proposer une méthodologie d'amélioration du système de contrôles par la maîtrise de la distance de propagation des défauts le long de la chaîne de valeur. Nous faisons l'hypothèse que la distance moyenne de propagation des défauts est un indicateur de performance du système global de contrôles. En effet :

1. Les défauts qui se propagent mettent en évidence des faiblesses dans le système de barrières de protection
2. La distance de propagation est étroitement liée aux coûts de non conformité à travers l'augmentation de la quantité de produits affectés ou/et la quantité de reprises induite par le défaut. (Bettayeb et al. 2010)
3. La réduction de la propagation des défauts qualité est en ligne avec les objectifs Lean tels que la qualité à la source et l'autocontrôle.

4. La distance de propagation est un indicateur macroscopique qui permet d'évaluer la performance globale du système de contrôle.

Ainsi, nous proposons de mettre sous contrôle cette distance de propagation en construisant la carte de contrôle associée.

La suite de l'article est organisée comme suit : la section 2 présente une revue de la littérature, la section 3 le modèle de la carte de contrôle, la section 4 le cas d'étude et enfin la section 5 la simulation de la mise en œuvre de la carte ainsi qu'une discussion des résultats.

## 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le process control croise différentes disciplines pour mettre en place des barrières de protections adaptées [Schippers, 2001]. La revue est structurée autour de différents aspects du process control : le management des risques, la maîtrise statistique des procédés et l'allocation de ressources d'inspection.

Pratiquement toutes les industries doivent fournir des analyses de risques mises à jour sur leurs processus, leurs produits et parfois leurs outils. L'objectif est de rassurer les clients sur la capacité à fournir les produits à temps, dans les bonnes quantités et avec le niveau de qualité exigé. Ces analyses concernent les risques opérationnels qui sont évalués, maîtrisés et dans le meilleur des cas suivis. Ces risques ciblent des événements redoutés par rapport aux enjeux opérationnels. L'AMDEC (Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité) est une méthode parmi les plus utilisées dans les industries de production (mécanique, électrotechnique, assemblage, armement, électronique et automobile tout particulièrement) [Department of Defense, 1980], [Villacourt, 1992]. D'autres méthodes peuvent cependant être utilisées. [Tixier et al., 2002] les présente de manière plus exhaustive. Certains auteurs ont également proposé des approches mixtes couplant l'AMDEC avec d'autres méthodes qualité. (Hassan et al. 2010) par exemple propose un couplage avec la méthode QFD (Quality Function Deployment) pour choisir les alternatives de process. Les caractéristiques qualité et les éléments de process de la méthode QFD sont pris en entrée de l'analyse AMDEC.

Dans les analyses de risques, les niveaux de protection sont explicitement mentionnés. Dans les AMDEC ils sont visibles dans la colonne « détectabilité ». Cependant peu de méthodes lient les analyses de risques aux plans de contrôle de manière détaillée, efficace et pérenne. Du point de vue de l'analyse de risques, les contrôles sont souvent mentionnés de manière générique comme « contrôle MSP » ou « maintenance ». Pour être opérationnelles, ces expressions doivent être retravaillées par des spécialistes du domaine. Cette opération manuelle déconnecte souvent l'analyse des risques de l'origine des contrôles. Pour résoudre ce problème, [Mili et al., 2009] ont proposé un modèle d'activités joignant l'évaluation des risques au plan de contrôle et permettant une connexion automatique. Opérationnellement, les contrôles sont réalisés aux niveaux des outils, des processus, des produits et de l'organisation pour capturer le plus tôt possible les défaillances et prévenir leur propagation [Schippers, 2001]. Il existe un lien entre ces défaillances et les plans de contrôle utilisés, mais il n'est pas employé systématiquement [Bassetto et al., 2006].

Afin de détecter plus rapidement les défauts apparus au sein du système de production, regardons un instant la littérature autour de la maîtrise statistique des processus. Le lecteur

intéressé par un ouvrage complet et introductif en la matière est invité à la lecture de [Montgomery, 2007]. La conception économique des cartes de contrôle et les cartes de contrôle adaptatives sont deux champs d'étude dans le domaine de la maîtrise statistique des processus.

Le premier a été initié par les travaux de [Duncan, 1971] qui propose un modèle complet pour la définition des fréquences d'échantillonnage, du nombre de points de mesures et des limites de contrôle et ce en regard d'un coût objectif minimum. Certains inconvénients ont été identifiés par rapport au manque de robustesse des résultats [Woodall et al., 1986]. Cependant des développements ont suivi, par exemple, un article historique sur la réduction des contrôles qualité [J. I.S Hsu 1980] a été trouvé. Il s'intéresse à la diminution des tailles de lot et à la réduction de la fréquence de contrôle. Dans le domaine du design économique des cartes de contrôle, le modèle de Lorenzen et Vance [Lorenzen et Vance 1986] semble être un jalon fondateur tout comme l'article de [Seetala et Vommi, 2007]. La principale avancée est la présentation d'un modèle de coûts unifié.

La conception économique des cartes de contrôle est très intéressante, car elle pose la question de l'efficacité des contrôles et de leur mesure. Au cœur de cette mesure se trouve la rapidité de détection. En effet, de par la nature statistique de l'observation, il se peut qu'une dérive de processus se produise sans pour autant qu'elle soit détectée. Cette durée a été introduite sous les termes d'ATS1 (Average Time to Signal) ou ARL1 (Average Run Length) [Lorenzen et Vance, 1986] [Montgomery, 2007], [Y. K. Chen et al., sans date], [Gadre et Rattihalli, 2004] pour désigner respectivement le temps moyen écoulé pour obtenir un signal de détection ou le nombre moyen de produits fabriqués avant d'avoir un signal de détection. Ces deux indices entrent dans la conception économique des moyens de détection et dans l'évaluation de la performance des dispositifs de maîtrise. Dans le cadre de faibles productions à fort coût (aéronautique, médical, aérospatiale, barrages, usines...), la question des coûts globaux de la détection est dominée par la rapidité de détection. En effet, avoir un ARL1 du même ordre de grandeur que la durée de production peut perturber fortement la résilience du système de production. Ainsi la diminution du nombre de produits impactés (ou au moins potentiellement impactés) par la dérive est un élément clé, qui semble non traité dans les travaux actuels.

Un second développement concerne l'adaptation des plans de contrôle en fonction des événements observés par ces mêmes cartes de contrôle. Les investigations dans ce domaine ont commencé avec les travaux de [Reynolds Jr et al., 1988]. Le contrôle adaptatif a été étudié par [Tagaras, 1998] et plus récemment par [De Magalhães et al., 2009] qui présentent une revue des techniques dans le domaine. Des développements récents se sont également intéressés à la conception des cartes de contrôle pour la surveillance de variables régies par des distributions non-normales [Lin et Chou 2005], ou de données corrélées [Y. K Chen et al., 2007].

Des études qui couplent les approches de conception économique avec le contrôle adaptatif. [Prabhu et al., 1997] présentent une approche statistique et économique de conception d'une carte de contrôle adaptative avec des tailles d'échantillons et des intervalles variables. Plus récemment [Torng et al., 2009] ont étudié la conception statistique d'une carte de contrôle à double échantillonnage.

Toutes les adaptations sont centrées autour des trois paramètres suivants : la quantité de points mesurés (n), la fréquence d'échantillonnage (f), et les limites de contrôle (L). Ces méthodes sont évaluées sur leur coût et leur rapidité d'action. Cette revue, sans prétendre à l'exhaustivité, n'a pas mis en lumière de travaux visant à adapter le plan de surveillance qualité en fonction d'évènements exogènes au dispositif de maîtrise.

Il existe des travaux et témoignages d'adaptation de cartes de contrôles basés sur l'apprentissage et les volumes de production. [L. F Hsu et Tapiero, 1989] ont été pionniers dans ce domaine en proposant un lien entre le management opérationnel, l'apprentissage résultant et les cartes de contrôle. L'adaptation de la politique de maîtrise, en fonction du nombre de rebuts a également été présentée par [Baud-Lavigne et al., 2009]. Des témoignages d'industriels relatent par ailleurs une adaptation de la politique de surveillance fondée sur la « maturité de production » [Bousetta et Cross, 2005]. Ces travaux intéressants pointent quant à eux la possibilité d'adaptation des dispositifs de maîtrise par des variables extérieures aux détections elles mêmes. Ces travaux adaptent les politiques de contrôle par paliers d'apprentissage (jalons de maturité, courbes d'apprentissage). Peu le font en temps réel.

Dans un environnement de production, les capacités de contrôle ne sont pas infinies. Il est nécessaire d'allouer les moyens disponibles à différentes zones. Celles ci peuvent être des produits, des opérations, des opérateurs ou des machines. L'allocation de capacité de maîtrise est connue comme étant le problème d'allocation de moyens d'inspection. Ce problème a largement été investigué [Villalobos et al., 1993], [Rene et al., 2001] et se présente comme un problème d'optimisation NP Complet du type « sac à dos ». Ces problèmes ont été étudiés pour l'allocation d'inspection de circuits imprimés et peuvent avoir une large palette d'applications. Ces travaux soulèvent le questionnement de la réorganisation globale de l'inspection et plus généralement de la politique de maîtrise, en fonction d'éléments contraignants (en l'occurrence la capacité limitée).

Ainsi en synthèse de cette revue de littérature, il a été remarqué un indicateur d'évaluation des dispositifs de contrôle (l'ARL1 ou l'ATS) intéressant pour la formulation du problème de détection pour les productions de faibles quantités, mais à fort investissement capitalistique – aviation, création d'usines... - ou à très fort enjeux (médical, nucléaire,...). Les analyses de risques ne peuvent garantir l'exhaustivité. Les outils de détection classiques, ne peuvent assurer des ARL nuls et donc il est nécessaire de les adapter de manière globale. Cependant, il n'a pas été remarqué un lien entre l'adaptation de la politique de contrôle, soit localement (à l'image des cartes de contrôle adaptatives), soit pris dans leur globalité (à l'image de la réallocation de moyens d'inspection) et les dérives ayant traversées ces dispositifs de détection. Cela laisse donc la possibilité de développer une proposition scientifique permettant cette adaptation du système de maîtrise (renforcement des contrôles, re-conception des dispositifs, redéploiement des capacités de maîtrise) en fonction de sa performance, celle-ci étant mesurée vis à vis des dérives qui traversent les dispositifs de maîtrise.

### 3 MODELE

#### 3.1 Matrice des distances de propagation

Comme présentée plus haut, la propagation des défauts peut générer des coûts élevés pour les entreprises. L'objectif du système de contrôle qualité est de stopper les défauts le plus tôt possible, idéalement à l'endroit même où ils sont générés. Nous introduisons ainsi la distance de propagation d'un défaut qui correspond au nombre d'étapes du processus parcourues par le défaut avant qu'il ne soit détecté.

Cette distance peut être visualisée dans une matrice croisant les lieux de génération et de détection comme représenté sur la (Figure 2).

		Lieu de détection				
		Op <sub>1</sub>			Op <sub>i</sub>	Op <sub>N</sub>
Lieu de génération	Op <sub>1</sub>					NDE <sub>2</sub>
	Op <sub>j</sub>				NDE <sub>1</sub>	
	Op <sub>N</sub>					

Figure 2 : Matrice de propagation

Le processus est composé de N opérations {Op1, ..., OpN}. Un défaut NDE1 généré lors de l'opération Opj et détecté à l'opération Opi a parcouru une distance d = i – j étapes. Cette distance correspond à la distance à la diagonale de la matrice. Dans le pire des cas, un défaut généré durant la première étape du processus sera détecté lors de la dernière étape comme pour l'exemple de NDE2 (Figure 2). Un défaut ne pouvant pas être détecté avant d'être généré, la partie inférieure à la diagonale est grisée.

Cette matrice possède une double lecture. A l'échelle de l'événement, elle permet de visualiser la propagation d'un défaut, tandis qu'à l'échelle du système, la moyenne des distances de propagation sur une période donnée illustre la performance globale du dispositif de contrôle. Cette distance moyenne est retenue comme indicateur de performance.

$$\bar{D} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d_k = \frac{1}{K} \sum i_k - j_k$$

Avec :

$\bar{D}$  : distance moyenne de propagation

K : nombre de défauts relevés

dk : distance de propagation du défaut k

ik : lieu de génération du défaut k

jk: lieu de détection du défaut k

N : nombre d'étapes dans le processus

#### Équation 1 : Distance moyenne de propagation

L'objectif du système de contrôle est donc de réduire la propagation des défauts et donc la distance moyenne à la diagonale pour avoir une matrice aussi diagonale que possible.

### 3.2 Hypothèses de modélisation

**Hypothèse 1 :** Le concept de défaut n'est pas relié à un mode de défaillance particulier, mais à tout événement potentiellement négatif, pouvant perturber le fonctionnement du produit.

**Hypothèse 2 :** La notation suppose que chaque opération de détection est « incluse » dans une opération de production et que chaque opération de production peut "contenir" une opération de détection. Cette hypothèse permet de créer une matrice carrée.

**Hypothèse 3 :** L'unité de distance retenue est le nombre d'étapes dans le processus de fabrication. Cette unité a été choisie pour être cohérente avec la notion de système de production. Dans un réseau étendu de production, une distance aurait pu être l'unité de valeur ajoutée par chaque opération de production par exemple.

**Hypothèse 4 :** La distance de propagation des défauts est un indicateur de performance du système de contrôle.

**Hypothèse 5 :** Pour un système de production donné, la distance de propagation des défauts, suit une loi normale.

### 3.3 Carte de contrôle de la distance de propagation

La proposition est centrée sur une stratégie d'amélioration basée sur la minimisation de la distance. Il s'agit de suivre cette distance à l'aide d'une carte de contrôle comme visualisée sur la (Figure 3). Pour chaque occurrence de défaut sur une période donnée, la distance de propagation est relevée sur la carte de contrôle. Une limite supérieure de contrôle (LSC) est établie, au-delà de laquelle une alarme est déclenchée et une action d'amélioration initiée (Montgomery, 2007) comme suit :

$$LSC = \mu_D + A_2 * \sigma_D$$

Avec:

$\mu_D$  : espérance de la distance de propagation

$\sigma_D$  : écart type de la distance de propagation

$A_2$  : coefficient

#### Équation 2 : Limite supérieure de contrôle

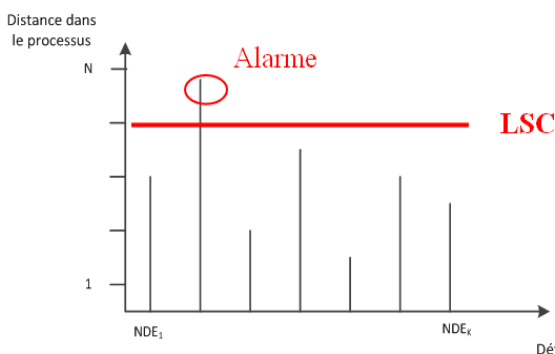


Figure 3 : Représentation de la distance de propagation

## 4 ETUDE DE CAS

Cette étude de cas concerne une entreprise du secteur de l'énergie fabriquant de faibles volumes de matériel électromécanique qui travaille en mode projet. Elle développe et produit à la demande de ses clients un matériel entièrement

personnalisé nécessitant des études spécifiques en amont de la fabrication.

Précisons au préalable que le matériel fabriqué dans l'usine étudiée est extrêmement complexe et sensible ce qui engendre beaucoup de contraintes pour les opérateurs lors de l'assemblage. La moindre poussière peut par exemple compromettre le bon fonctionnement du produit. Une erreur de montage peut avoir des conséquences graves en matière de sécurité des hommes et des installations.

L'étude porte sur l'un des produits fabriqués par l'entreprise. L'analyse se base sur des rapports de non-conformités issus de différentes sources, telles que les rapports qualité usine et site, les réunions qualité ou les sensibilisations qualité terrain sur une période d'un an. Quarante et une non-conformités ont été reportées dans la matrice des distances de propagation présentée dans la partie 3.2. Le résultat est présenté sur la (Figure 4). Chaque case de la matrice recense le nombre de défauts pour chaque couple (lieu de génération, lieu de détection). Les totaux en ligne et en colonne donnent respectivement un aperçu des pires générateurs de non-conformités et des meilleurs filtres.

	OP.1	OP.2	OP.3	OP.4	OP.5	OP.6	OP.7	OP.8	OP.9	OP.10	OP.11	OP.12	OP.13	OP.14	OP.15	Total	
OP.1				4	1			1		1	1					7	15
OP.2					1												1
OP.3																	0
OP.4								1									1
OP.5					1			1		6	4					1	13
OP.6																	0
OP.7															1		1
OP.8										4		1					5
OP.9																	0
OP.10														1			1
OP.11																	0
OP.12																	0
OP.13															4		4
OP.14																	0
OP.15																	0
Total	0	0	0	4	3	0	0	3	0	11	5	1	0	1	13		41

Figure 4 : Matrice des distances de propagation

Cette analyse permet d'établir la représentation suivante de la distance de propagation (Figure 5). Des exemples d'alarme sont visualisés sur le graphique par des cercles rouges.

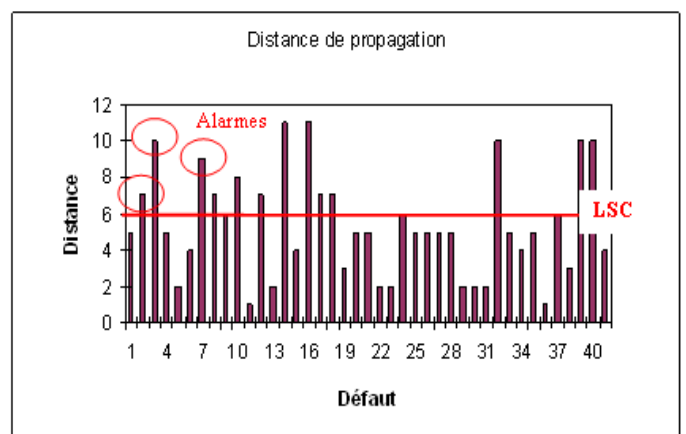


Figure 5 : Représentation de la distance de propagation

Une analyse de la distribution des distances par la méthode de la droite de Henry (Q-Q plot) est réalisée pour valider l'hypothèse que la distance de propagation suit une loi normale.

Etant donné le peu de données (N= 41 données) appartenant à l'intervalle [0;12], nous avons divisé l'intervalle en racine (N) classes, soit 6 classes : ]0;2], ] 2 ;4], etc .

Les quantiles de la loi normale (ti) sont calculés pour chaque valeur de la fonction de répartition aux bornes supérieures des intervalles précédents (P(X<xi)).

Intervalle	Borne sup (xi)	Effectif	Pi = P(xi<X<xi+1)	Pi cumulé = P(X<xi)	ti (quantile de la loi normale centrée réduite)
0 - 2	2	9	0,214285714	0,214285714	-0,791638608
2 - 4	4	6	0,142857143	0,357142857	-0,366106357
4 - 6	6	13	0,30952381	0,666666667	0,430727299
6 - 8	8	6	0,142857143	0,80952381	0,376142849
8 - 10	10	5	0,119047619	0,928571429	1,465233793
10 - 12	12	2	0,047619048	0,976190476	1,980752397

Figure 6 : Calcul des quantiles

Ce sont ces valeurs (ti) qui sont représentées par les points sur le graphique (Figure 7).

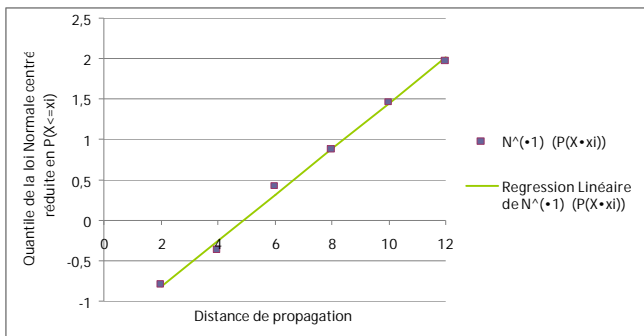


Figure 7 : Droite de Henry

Une régression linéaire est ensuite appliquée à l'ensemble de ces points et permet de valider qu'ils forment bien une droite, avec un résidu faible au regard du r<sup>2</sup> très proche de 1 (r<sup>2</sup>= 0,99219). Nous validons ainsi que la distance de propagation des erreurs suit une loi normale.

$$a = 0,3077703$$

$$b = -1,45316692$$

$$r^2 = 0,99219039$$

Figure 8 : Coefficients de régression

Les points de la droite de Henry semblent alignés, ce qui confirme l'hypothèse de normalité de la distribution. Le coefficient r<sup>2</sup> proche de 1 confirme également cette hypothèse. Cependant le léger défaut d'alignement est très certainement dû au petit nombre de mesures. En effet une série de 41 mesures est suffisante pour effectuer un test de normalité mais relativement faible pour obtenir une approximation exacte.

Les données montrent que la définition de la limite supérieure de contrôle comme définie par l'équation 2 aurait déclenchée 13 alarmes et donc autant d'actions d'amélioration du système de détection.

Aujourd'hui, l'entreprise ne mesure pas la propagation des défauts. La partie suivante illustre par une simulation le potentiel d'amélioration issu de la mise sous contrôle de cette distance et des actions associées au dépassement du seuil.

## 5 SIMULATION ET DISCUSSION

Cette partie présente une comparaison entre une situation dans laquelle la propagation des défauts est suivie par rapport à une situation dans laquelle cette distance n'est pas suivie. Pour ce faire, une simulation de la carte de contrôle de la distance a été construite. Des défauts, associés à leur propagation, sont générés de manière aléatoire. Si la propagation dépasse un certain seuil, une action d'amélioration est initiée. L'évolution de  $\bar{D}$  et de LSC est suivie dans le temps et dépend de la performance des actions d'amélioration entreprises.

Les hypothèses de la simulation sont les suivantes :

1. La distance de propagation suit une loi normale  $(\mu_D; \sigma_D)$ .
2. Une action d'amélioration affecte les paramètres  $\mu_D$  et  $\sigma_D$ . Cet effet peut être soit positif soit négatif.
3. Une action d'amélioration impacte les paramètres  $\mu_D$  et  $\sigma_D$ . Les effets de l'action sur  $\mu_D$  et  $\sigma_D$  sont aléatoires et compris respectivement entre  $[P\mu_{\min}; P\mu_{\max}]$  et  $[P\sigma_{\min}; P\sigma_{\max}]$ .

Les paramètres de la simulation sont les suivants :

R : Nombre de runs

$\mu_0$  : Espérance initiale de la distance de propagation

$\sigma_0$  : Ecart type initial de la distance de propagation

$[P\mu_{\min}; P\mu_{\max}]$  : Performance de l'action d'amélioration sur l'espérance de la distance de propagation

$[P\sigma_{\min}; P\sigma_{\max}]$  : Performance de l'action d'amélioration sur l'écart type de la distance de propagation

La simulation est initialisée avec l'espérance et l'écart type empirique de la distribution de la distance de propagation calculés à partir des 41 observations sur l'année.

La performance des actions d'amélioration sur l'espérance et l'écart type de la distance est distribuée aléatoirement dans l'intervalle [-1% ; +5%]. Cette hypothèse est qualifiée de pessimiste par les experts de l'entreprise.

La (Figure 9) présente les conditions initiales de la simulation.

A2	0,18
$\mu_0$	5,36
$\sigma_0$	2,8
LSC	6
$P\mu_{\min}$	-1%
$P\mu_{\max}$	5%
$P\sigma_{\min}$	-1%
$P\sigma_{\max}$	5%

Figure 9 : Conditions initiales de la simulation

Le tableau (Figure 10) présente les résultats de la simulation. Les distances de propagation dépassant le seuil LSC sont visualisées en rouge dans le tableau et déclenchent une action d'amélioration.



Run	D	$\mu$	$\sigma$	LSC	P $\mu$	P $\sigma$
1	5	5,36	2,80	6,00	pas d'action	pas d'action
2	3	5,36	2,80	6,00	pas d'action	pas d'action
3	9	5,29	2,66	5,76	0,99	0,95
4	6	5,29	2,66	5,76	pas d'action	pas d'action
5	8	5,22	2,57	5,68	0,99	0,97
6	3	5,22	2,57	5,68	pas d'action	pas d'action
7	0	5,22	2,57	5,68	pas d'action	pas d'action
8	10	5,18	2,46	5,62	0,99	0,96
9	5	5,18	2,46	5,62	pas d'action	pas d'action
10	8	4,95	2,36	5,38	0,96	0,96
11	4	4,95	2,36	5,38	pas d'action	pas d'action
12	2	4,95	2,36	5,38	pas d'action	pas d'action
13	5	4,95	2,36	5,38	pas d'action	pas d'action
14	2	4,95	2,36	5,38	pas d'action	pas d'action
15	6	4,98	2,31	5,40	1,01	0,98
16	2	4,98	2,31	5,40	pas d'action	pas d'action
17	7	4,78	2,26	5,19	0,96	0,98
50	6	3,51	1,83	3,84	0,96	0,99

Figure 10 : Simulation

Au bout de 50 itérations, la moyenne de la distance de propagation a diminué de 30%, l'écart type de 40%. Ainsi, le suivi de la distance de propagation associé à la mise en œuvre d'actions d'amélioration en cas d'alarme apparaît profitable.

La méthode proposée de suivi de la distance de propagation présente plusieurs intérêts industriels. Tout d'abord, elle fournit à l'entreprise un indicateur de performance global et macroscopique de son dispositif de contrôle. Ensuite, même si les dérives majeures peuvent être détectées et corrigées par ailleurs, le dispositif présente un intérêt certain dans le cas de dégradation du système de contrôle. Il permet de mettre en évidence des brèches dans le système de protection et les potentiels d'amélioration. Pour les dérives lentes on peut proposer une carte Q-Sum ou EWMA. Le suivi de la distance de propagation est un outil d'aide à la décision pour la mise en œuvre d'actions d'amélioration. En effet, les outils qualité et groupes de travail sont mis en œuvre pour certains défauts qualifiés de majeurs. Or cette qualification est aujourd'hui relativement arbitraire. L'outil présenté pourrait donc objectiver le déclenchement des actions d'amélioration vers les plus pertinentes. Enfin, les données issues de l'outil peuvent être utilisées pour actualiser les AMDEC.

Ainsi, la méthode proposée permet d'identifier la profondeur avec laquelle les défaillances pénètrent les barrières de protections ainsi que la taille des brèches.

Pour valider le modèle, il reste à le confronter à la réalité industrielle. Ainsi, la mise en œuvre de la carte de contrôle et des actions associées est en cours pour une période de 3 mois dans l'entreprise étudiée.

Le modèle proposé présente cependant certaines limites. Tout d'abord, il se base sur des hypothèses simplificatrices, notamment sur l'utilisation de la loi normale pour générer les distances de propagation. Ensuite, il est difficile de quantifier de manière objective l'efficacité des actions d'amélioration entreprises suite au dépassement du seuil. Nous espérons valider la fourchette retenue par la mise en œuvre de la carte de contrôle. Enfin, l'analyse de la distance de propagation n'est pas automatisée et est de ce fait extrêmement chronophage. En effet, si le lieu de détection est immédiatement identifié, le lieu de génération du défaut peut nécessiter de longues investigations, les causes étant toujours plus difficiles à identifier que les effets. Cela signifie que l'ATS n'est pas maîtrisé. Pour affiner le modèle, la vitesse de détection et les erreurs de type I et II doivent être investiguées.

## 6 CONCLUSION

Les entreprises industrielles mettent en place différents mécanismes pour se protéger contre les défauts qualité. D'une part des analyses de risques pour prévenir ces défauts et d'autre part des systèmes de détection pour les stopper au plus vite lorsqu'ils apparaissent. Ces dispositifs peuvent cependant présenter des brèches et laisser passer certains défauts qui vont alors se propager. Cette propagation implique des coûts élevés pour les entreprises, car elle engendre des rebuts, des reprises, des retards et peut potentiellement impacter la satisfaction des clients.

Cet article s'est donc intéressé à la mise sous contrôle de cette propagation qui reflète la performance globale du dispositif de contrôles. Il propose de créer une carte de contrôle associée à cette propagation et de mettre en œuvre des actions d'amélioration du dispositif de détection en cas de franchissement d'un seuil de propagation.

L'intérêt de cette méthode est illustré par une étude de cas dans une industrie de faibles volumes ainsi que par une simulation. Des développements restent à effectuer pour affiner cette méthode et évaluer plus précisément l'impact des actions d'amélioration sur le système de contrôles.

## 7 REFERENCES

- Barton, Michelle A., and Kathleen M. Sutcliffe. 2009. "Overcoming dysfunctional momentum: Organizational safety as a social achievement." *Human Relations* 62 (9): 1327 -1356. doi:10.1177/0018726709334491.
- Bassetto, S. 2005. Contribution à la qualification et amélioration des moyens de production. Application à une usine de recherche et production de semi-conducteurs.
- Bassetto, S., Ali Siadat, et Patrick Martin. 2006. Etudes des interactions entre les risques des moyens de production, introduction à l'utilisation du concept de typologie des risques. *JESA* 40, n°. 6: 571-591.
- Baud-Lavigne, B., S. Bassetto, et B. Penz. 2009. A broader view of the economic design of the X-bar chart in the semiconductor industry. *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207540903150593.
- Benfer, Richard H. (Richard Hunt). 1993. Learning during ramping : policy choices for semiconductor manufacturing firms. Thesis. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/12358>.
- Bettayeb, B., P. Vialletelle, S. Bassetto, and M. Tollenaere. 2010. Optimized design of control plans based on risk exposure and resources capabilities. In *Semiconductor Manufacturing (ISSM), 2010 International Symposium on*, 1-4
- Bousetta, A., et A. J Cross. 2005. Adaptive sampling methodology for in-line defect inspection. Dans *Advanced semiconductor manufacturing conference and workshop, 2005 IEEE/SEMI*, 25-31.
- Chen, Y. K., K. L Hsieh, et C. C Chang. 2007. Economic design of the VSSI control charts for correlated data. *International Journal of Production Economics* 107, n°. 2: 528-539.
- Chen, Y. K., K. C. Chiou, et C. Y. Chen. sans date. A Markov Chain Approximation for ATS Modeling for the Variable Sampling Interval CCC Control Charts.
- De Magalhães, M.S., A.F.B. Costa, et F.D. Moura Neto. 2009. A hierarchy of adaptive control charts. *International Journal of Production Economics* 119, n°. 2 (Juin): 271-283. doi:10.1016/j.ijpe.2008.10.017.
- Department of Defense. 1980. Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis.

- Douglas, M., and A. Wildavsky. 1983. *Risk and culture: An essay on the selection of technical and environmental dangers*. Univ of California Pr on Demand.
- Duijm, N. J. 2009. Safety-barrier diagrams as a safety management tool. *Reliability Engineering & System Safety* 94, n° 2: 332–341.
- Duncan, A. J. 1971. The Economic Design of barX-Charts When There is a Multiplicity of Assignable Causes. *Journal of the American Statistical Association* 66, n° 333: 107–121.
- Hadre, M. P., et R. N. Rattihalli. 2004. A group runs control chart for detecting shifts in the process mean. *Economic Quality Control* 19, n° 1: 29–43.
- Gowland, R. 2006. The accidental risk assessment methodology for industries (ARAMIS)/layer of protection analysis (LOPA) methodology: A step forward towards convergent practices in risk assessment? *Journal of hazardous materials* 130, n° 3: 307–310.
- Hassan, Alaa, Ali Siadat, Jean-Yves Dantan, and Patrick Martin. 2010. “Conceptual process planning - an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods.” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 26 (4) (August): 392-401. doi:16/j.rcim.2009.12.002.
- Hollnagel, E., D. D Woods, and N. Leveson. 2006. *Resilience engineering: Concepts and precepts*. Ashgate Pub Co.
- Hollnagel, E., and D. D Woods. 2006. “Epilogue: Resilience engineering precepts.” *Resilience Engineering—Concepts and Precepts, Ashgate, Aldershot*: 347–358.
- Hollnagel, Erik. 2008. Risk + barriers = safety? *Safety Science* 46, n° 2 (Février): 221-229. doi:10.1016/j.ssci.2007.06.028.
- Hsu, J. I.S. 1980. An Economic Design of Skip-Lot Sampling Plans. *Journal of Quality Technology* 12, n° 3: 144–149.
- Hsu, L. F, et C. S Tapiero. 1989. Quality control of the M/G/1 queue. *European journal of operational research* 42, n° 1: 88–100.
- Jina, Jay, Arindam K. Bhattacharya, et Andrew D. Walton. 1997. Applying lean principles for high product variety and low volumes: some issues and propositions. *Logistics Information Management* 10, n° 1: 5 - 13. doi:10.1108/09576059710159655.
- Lin, Y. C, et C. Y Chou. 2005. On the design of variable sample size and sampling intervals charts under non-normality. *International Journal of Production Economics* 96, n° 2: 249–261.
- Lorenzen, T. J, et L. C Vance. 1986. The economic design of control charts: a unified approach. *Technometrics* 28, n° 1: 3–10.
- Mili, A., S. Bassetto, A. Siadat, et M. Tollenaere. 2009. Dynamic risk management unveil productivity improvements. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22, n° 1: 25–34.
- Montgomery, D. C. 2007. *Introduction to statistical quality control*. Wiley-India.
- Perrow, C. 1994. The limits of safety: the enhancement of a theory of accidents. *Journal of Contingencies and Crisis Management* 2, n° 4: 212–220.
- Prabhu, S. S, D. C Montgomery, et G. C Runger. 1997. Economic-statistical design of an adaptive chart. *International Journal of Production Economics* 49, n° 1: 1–15.
- Rene, V. J, et others. 2001. Information-based inspection allocation for real-time inspection systems. *Journal of manufacturing systems* 20, n° 1: 13–22.
- Reynolds Jr, M. R, R. W Amin, J. C Arnold, et J. A Nachlas. 1988. X charts with variable sampling intervals. *Technometrics* 30, n° 2: 181–192.
- Salvi, O., et B. Debray. 2006. A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive. *Journal of hazardous materials* 130, n° 3: 187–199.
- Schippers, Werner A. J. 2001. An integrated approach to process control. *International Journal of Production Economics* 69, n° 1 (Janvier 7): 93-105. doi:10.1016/S0925-5273(98)00243-6.
- Seetala, et Vommi. 2007. A new approach to robust economic design of control charts. *Applied Soft Computing* 7, n° 1.
- Sklet, S. 2006. Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of loss prevention in the process industries* 19, n° 5: 494–506.
- Summers, Angela E. 2003. Introduction to layers of protection analysis. *Journal of Hazardous Materials* 104, n° 1 (Novembre 14): 163-168. doi:10.1016/S0304-3894(03)00242-5.
- Tagaras, G. 1998. A survey of recent developments in the design of adaptive control charts. *Journal of Quality Technology* 30, n° 3: 212–231.
- Tixier, J., G. Dusserre, O. Salvi, et D. Gaston. 2002. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 15, n° 4 (Juillet): 291-303. doi:10.1016/S0950-4230(02)00008-6.
- Torng, Chau-Chen, Pei-Hsi Lee, Huang-Sheng Liao, et Nai-Yi Liao. 2009. An economic design of double sampling X charts for correlated data using genetic algorithms. *Expert Syst. Appl.* 36, n° 10: 12621-12626.
- Villacourt, M. 1992. *Failure mode and effects analysis (fmea): A guide for continuous improvement for the semiconductor equipment industry*. International Semetech Inc., Austin, USA.
- Villalobos, Foster, et Disney. 1993. Flexible inspection system for serial multistage production systems. *Dans IIE-Transactions* 25, 16.
- Weick, K. E, and K. M Sutcliffe. 2001. *Managing the unexpected: Assuring high performance in an age of complexity*. Jossey-Bass.
- Woodall, W. H, T. J Lorenzen, et L. C Vance. 1986. Weaknesses of the economic design of control charts. *Technometrics* 28, n° 4: 408–410.