



Combinaison d'indicateurs pour évaluer la perturbation des flux dans les ateliers à forts taux de reprises

Mélanie Noyel, Philippe Thomas, André Thomas, Patrick Charpentier,
Thomas Brault

► To cite this version:

Mélanie Noyel, Philippe Thomas, André Thomas, Patrick Charpentier, Thomas Brault. Combinaison d'indicateurs pour évaluer la perturbation des flux dans les ateliers à forts taux de reprises. 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, MOSIM'14, Nov 2014, Nancy, France. hal-01086864

HAL Id: hal-01086864

<https://hal.science/hal-01086864>

Submitted on 25 Nov 2014

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

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

COMBINAISON D'INDICATEURS POUR EVALUER LA PERTURBATION DES FLUX DANS LES ATELIERS A FORTS TAUX DE REPRISES

M. NOYEL^{1,2,3}, P. THOMAS^{1,2}, A. THOMAS^{1,2}, P. CHARPENTIER^{1,2}, T. BRAULT³

¹Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039, Campus Sciences, BP 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France

²CNRS, CRAN, UMR7039, France

³Acta-Mobilier, parc d'activité Macherin Auxerre Nord 89270 MONETEAU

mnoyel@acta-mobilier.fr, philippe.thomas@univ-lorraine.fr, andre.thomas@univ-lorraine.fr, patrick.charpentier@univ-lorraine.fr, tbrault@acta-mobilier.fr

ABSTRACT: *Les entreprises de fabrication présentant un fort taux de reprises sur leurs produits ont souvent des problèmes conséquents de gestion de leurs flux de produits. Malgré la multitude de méthodes disponibles pour tenter de diminuer le nombre de reprises, elles sont parfois confrontées à l'échec et se retrouvent obligées de mettre en place des solutions palliatives afin de gérer ces flux de produits perturbés. Nos précédents travaux nous ont permis de déterminer et d'évaluer le comportement de différents indicateurs afin de pouvoir construire une vue synthétique de l'état de l'atelier en temps réel de ces entreprises. Cet article nous permet de présenter quelques vues offertes par la combinaison de certains de ces indicateurs, jugés aptes à fournir des informations sur les différents « états de fonctionnement » de l'atelier. Ces travaux s'inscrivent dans un projet plus global dont le but est de développer un système d'aide au contrôle des flux de production basé sur le concept SCP (Système Contrôlé par le Produit) et des combinaisons visuelles d'indicateurs temps réels.*

KEYWORDS: *reworks, flow disturbance, indicator, simulation*

1 INTRODUCTION

Les entreprises fabricantes de produits à très haute qualité sont parfois contraintes de fonctionner avec de forts taux de reprises. C'est par exemple le cas de l'entreprise Acta-Mobilier, fabricant de mobiliers laqués de très haute qualité, contrainte de fonctionner avec un taux de reprises habituellement supérieur à 30% et pouvant aller jusqu'à 80% pour certaines gammes de produits. Ceci est principalement dû à l'augmentation constante de l'exigence client conduisant au fait qu'ils n'arrivent pas à faire évoluer leurs processus de fabrication à la même vitesse. L'enjeu de nos travaux et de pouvoir apporter une aide à ce type d'entreprise pour qu'elles puissent comprendre le comportement de leurs flux de production en réaction aux variations de taux de non-qualité, et ainsi d'anticiper les problèmes qui peuvent en résulter et de réagir au plus vite et au mieux pour les éviter. La perturbation des flux due à la non-qualité n'a pas été étudiée en profondeur et présente des comportements cumulatifs que l'on peut assimiler à un « effet boule de neige » (effet Forester) qui la rendent difficile à évaluer comme à maîtriser. Dans nos précédents travaux, nous nous sommes servi de simulations qui ont été faites avec le logiciel ARENA (principalement pour exploiter la « notion de temps » que nous offre la simulation à événements discrets) afin de trouver les familles d'indicateurs de non-qualité ou de perturbations des flux nous offrant des vues différentes et complémentaires de l'état de l'atelier. Nous nous proposons dans cet article d'en faire une analyse plus poussée pour établir un

système d'aide au pilotage des entreprises à forts taux de reprises.

2 CONTEXTE ET ENJEUX

2.1 Particularités des ateliers à fort taux de reprises

Dans un premier temps, il convient de définir le terme reprise. Nous considérons comme « reprise » toute perturbation de la gamme de fabrication normale d'un produit découlant d'un problème qualité. Deux possibilités sont couramment envisagées :

- Le produit doit être réparé sur un poste particulier avant de reprendre le cours normal de sa gamme de fabrication. La gamme modifiée a donc une seule tâche en plus.
- Le produit doit retourner à une étape précédente de sa gamme de fabrication et reprendre toutes les tâches qu'il avait déjà subies. La gamme modifiée va donc contenir deux séquences de tâches identiques.

Le taux de reprises tel que nous l'envisageons dans notre papier se mesure à la sortie d'un poste de travail lors du contrôle qualité. Les produits « dans les normes » vont continuer vers les tâches suivantes de leur gamme de production tandis que les produits « hors normes » vont voir leur gamme de fabrication modifiées. Il y a donc un taux de reprises par poste de travail M_X dont l'équation est la suivante :

$$T_{reprise}(M_X) = \frac{\text{Nb de produits "hors normes"}}{\text{Nb de produits travaillés sur } M_X}$$

De nombreuses entreprises sont confrontées à ce type de problème, en particulier dans les secteurs du luxe et du haut de gamme où les exigences qualité conduisent à se situer aux limites technologiques des processus de fabrication et donc de la possible génération de défauts. Parmi les 5 points de vue différents sur la qualité (Garvin, 1984), la définition plus pertinente pour notre problème est « l'approche basée sur la fabrication ». Elle combine la conformité aux exigences client et le « faire juste du premier coup » dans le but de réduire les coûts. La notion de conformité est elle aussi définie comme « la mesure dans laquelle les caractéristiques de conception et d'exploitation d'un produit correspondent aux normes préétablies. » (Garvin, 1984). La non-qualité peut donc s'exprimer sous 2 formes :

- Produit non-conforme aux exigences client
- Produit conforme mais qui a nécessité une réparation pour l'être

Par définition, la non-qualité peut donc être le résultat d'une augmentation de l'exigence client au-dessus des exigences satisfaites habituellement et donc des spécifications des processus de production, ce qui peut se produire notamment lors de la conquête de nouveaux marchés (export, ...) par l'entreprise. Initialement, les processus sont bien maîtrisés et ne génèrent pas de défaut. Une évolution de qualité est demandée pour atteindre à nouveau les exigences client et les processus devront évoluer. Mais la non-qualité peut aussi découler de processus de fabrication instables au cours du temps ou de processus qui dérivent, générant des défauts qui doivent être réparés. Il est reconnu que ce type de non qualité affecte profondément la performance en productivité du système (Colledani & Tolio, 2006). Si le taux de reprises est fluctuant, les perturbations qui en découlent sur l'écoulement des produits sur la chaîne de fabrication seront-elles aussi fluctuantes et imprévisibles, ce qui complique le pilotage de la production.

En conclusion, si nous nous intéressons au pilotage de la production, nous devons inévitablement suivre et maintenir un bas niveau de reprises afin de ne pas compliquer le problème de pilotage initial. C'est ce que nous avons mis en relief dans nos précédents travaux (Noyel et al., 2013). Cependant, même en diminuant et en stabilisant les taux de réparations, la perturbation résultante sur les flux de produit reste conséquente et leur phénomène cumulatif que l'on pourrait assimiler au bullwhip effect ou à l'effet Forrester, rend la planification très difficile, voire impossible. En effet, les produits défectueux ont tendances à désorganiser les lots de fabrication (division, regroupage... problématique du Burbidge Effect) à modifier les gammes (étapes de réparation supplémentaires qui surchargent les plannings de travail... problématique du Houlihan Effect) ou à changer les priorités d'ordonnancement (Disney & Towill, 2003). La non-qualité semble donc aussi être une des causes primaire du bullwhip effect.

2.2 La non-qualité dans les travaux relatifs à l'aide au pilotage des flux

Même si la non-qualité est devenue un concept très connu comme le témoignent les multiples travaux à son sujet, le lien entre non-qualité (ou reprises) et perturbation des flux n'est pas toujours bien mis en évidence. Dès les années 50, on parle de non-qualité avec la méthode COQ (Cost of quality) et l'usine fantôme qui est un atelier parallèle à l'atelier officiel dont la mission est de réparer les défauts de l'usine officielle (Feigenbaum, 1951). Elle représente 40 % de la capacité de l'usine de production officielle. La première norme sur le sujet apparaît en France en 1986 (X 50-126) pour évaluer les coûts de la non-qualité (Abouzahir et al., 2003). Une analyse statistique par rapport à un problème de poste de travail souligne le phénomène oscillatoire (Skidmann et Nof, 1985) qui est également mentionné dans d'autres travaux dont l'objectif est d'évaluer la performance d'un atelier de type multi-produits (Skidmann et al., 1985). La perturbation de l'écoulement de la production par les reprises est particulièrement importante si les reprises ont lieu en aval du processus de production (Love et al., 1999). En conséquence, pour le contrôle de la production, il est impératif de suivre et maintenir un niveau de reprise bas pour être sûr de simplifier le problème de pilotage initial (Noyel et al., 2013). Cependant, même si on réduit et stabilise le taux de reprises, la perturbation résultante sur le flux de produit reste constante et rend la planification difficile. Pour évaluer le taux de reprises dans une entreprise, on utilise souvent un indicateur qui compte le nombre de défauts. Pour autant, quand le taux de reprises augmente, la probabilité de réparer plusieurs fois le même produit est de plus en plus forte. Alors, comment compter ces produits réparés plusieurs fois ? Il devient alors difficile de faire un lien direct entre taux de reprises et perturbation des flux.

2.3 Objectifs

L'objectif global de nos travaux est de développer un système d'indicateurs synthétique permettant d'avoir une vision globale en temps réel de l'état de l'atelier, de l'impact des reprises et/ou de la non qualité sur la fluidité (qualité des flux).

Comme nous l'avons dit, lorsqu'on cherche à évaluer la non-qualité dans une entreprise, on suit généralement un indicateur qui totalise le nombre de défauts et se pose alors la question de comment compter les pièces qui ont présenté plusieurs fois des défauts. Cet indicateur dont la définition est parfois incertaine présente aussi l'inconvénient de ne pas bien refléter la perturbation du travail dans l'atelier dû à cette non-qualité. L'objectif final de nos travaux est donc de développer un système d'aide à la décision basé sur plusieurs indicateurs afin de permettre aux entreprises de mieux comprendre l'impact de leur non-qualité sur la perturbation de leurs flux de production, d'anticiper l'impact des dérives qualité sur les problèmes de pilotage des flux et de réagir au plus vite et au mieux pour les amoindrir.

3 INDICATEURS ET MODELE DE TEST

Dans nos précédents travaux (Noyel et al., 2014), nous avons listé et défini les indicateurs possibles pour évaluer la non-qualité ainsi que la perturbation des flux. Comme tout indicateur de performance, ces indicateurs correspondent à des triplets (objectif, mesure, variable) qui exprime l'efficacité d'un système par rapport à une norme préétablie (AFGI, 1992) Nous avons montré leurs comportements en fonction de l'augmentation progressive du taux de reprises. Comme exprimé en conclusion de nos travaux, la perturbation des flux reste une notion compliquée à mesurer. Chaque indicateur offre une seule vue du problème. Pour en avoir un aperçu plus global et donc plus réaliste, il devient important de

travailler sur une combinaison de ces indicateurs. Dans un premier temps, les indicateurs analysés sont résumés sur la figure 1. Puis, suivant l'analyse qui en a été faite dans nos précédents travaux, ils sont classés par famille de comportement dont chacune offre une vue différente du problème terrain à l'atelier. Il convient aussi de vérifier la « disponibilité » de ces indicateurs. En effet, certains sont facilement disponibles en temps réel tandis que d'autres sont parfois mesurable « A posteriori », c'est-à-dire une fois que la fabrication de tous les lots est terminée. Les tables 1 et 2 présentent respectivement les indicateurs relatifs à la non-qualité et les indicateurs relatifs à la perturbation des flux.

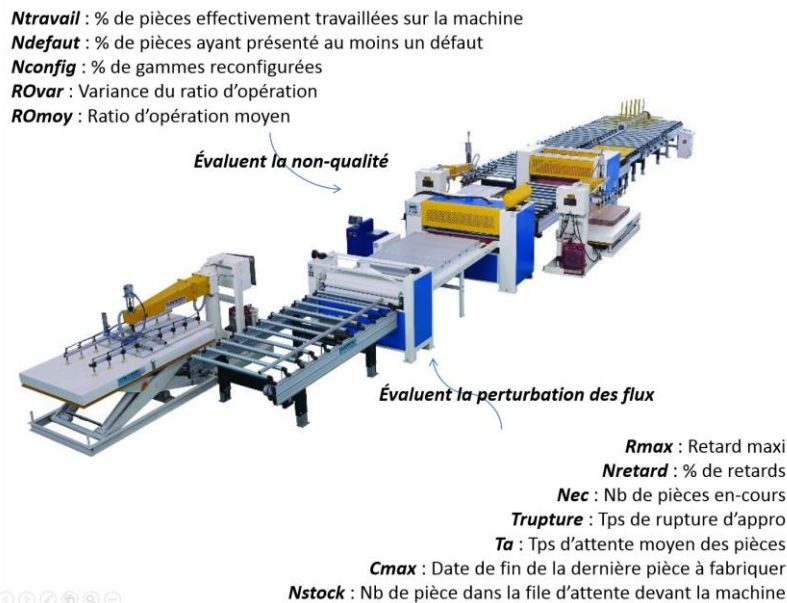


Figure 1: Quelques indicateurs pour la mesure de la non-qualité et de la perturbation des flux.

Indicateur	Vue et disponibilité
N_{config} ou N_{defaut} (équivalent dans le cas de lot unitaire) : Pourcentage de pièces qui ont présenté au moins un défaut.	Capacité à réaliser le produit juste du premier coup. Disponible sur une période donnée si les défauts sont relevés dès leur création à chaque poste susceptible de générer des défauts.
RO_{ET} : Le Ratio d'Opération RO correspond au nb d'opérations réalisées par rapport à ce qui était prévu dans la gamme. Comme il y a une valeur par pièce/lot, il convient de prendre la moyenne et/ou l'écart type.	Capacité de réparer correctement le produit défectueux ou la prévisibilité du respect des deadlines. Disponible a posteriori par comparaison avec la gamme de fabrication prévue si la traçabilité des produits est correctement sauvegardée

$N_{travail}$ ou RO_{moy} : Pourcentage de pièces effectivement travaillées sur la machine	Densité du flux ou charge de travail réelle sur l'atelier Facilement disponible par poste pour $N_{travail}$ mais disponible plus difficilement et a posteriori pour RO_{moy}
--	--

Table 1: Vues offertes par les indicateurs de non-qualité de flux.

Indicateur	Vue et disponibilité
N_{EC} et N_{stock} : Nb de pièces en en-cours global et niveau de stock en amont d'un poste de charge	Densité du flux ou charge de travail réelle sur l'atelier N_{EC} disponible en temps réel en tant que valeur offerte traditionnellement par les ERP. N_{stock} disponible de la même manière ou mesurable directement en amont des postes de travail critiques.

C_{max} et T_A : Temps pour terminer la fabrication de toutes les pièces à produire et temps moyen d'attente des pièces	Vitesse d'écoulement du flux C_{max} disponible a posteriori, une fois que toute la production a été réalisée ou estimable mais avec beaucoup de dispersion. T_A disponible plus facilement sur le terrain (ex : mise en place de minuteurs).
R_{max} : Retard maxi	Ponctualité Disponible a posteriori puisque le lot doit être terminé pour pouvoir évaluer son retard par rapport à une date d'expédition prévue.
N_{retard} : Pourcentage de retards.	Satisfaction client Disponible a posteriori pour la même raison que R_{max} .

Table 2 : Vues offertes par les indicateurs de perturbation des flux.

Le réseau de Pétri présenté sur la figure 2 a été implémenté dans le logiciel ARENA afin d'analyser l'impact d'une augmentation du nombre de reprises sur un procédé de fabrication. L'apparente simplicité de ce modèle a été justifiée par les travaux sur la réduction de modèle qui montrent qu'on parvient souvent à résumer le problème par un modèle avec un ou deux postes de travail (Thomas et Charpentier, 2005), et par d'autres travaux du même ordre qui ont conduit eux-aussi à des systèmes à une ou deux machines (Rabiee et al., 2012). Le modèle considère un flux de pièces à l'unité et chaque produit est transféré directement à la station de travail sans temps supplémentaire correspondant à l'attente de la fin de lot avant transfert. Cela permet ainsi d'éviter le problème de divisions des lots entre les pièces à réparer et les pièces de bonne qualité (Zargar, 1995).

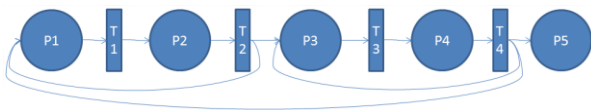


Figure 2 : Modèle Réseau de Petri implémenté dans ARENA

- P1: Attente en file devant la machine 1
- P2: Opération sur machine 1
- P3: Attente en file devant la machine 2
- P4: Opération sur machine 2
- P5: Etat terminé
- T1: Machine 1 disponible
- T2: Fin d'opération sur la machine 1
- T3: Machine 2 disponible
- T4: Fin d'opération sur la machine 2

Nous avons testé en termes de scénarios, une des règles de priorité parmi les plus couramment utilisées : EDD (au plus tôt à la date d'échéance). La date d'échéance par produit requise pour la mise en œuvre de la règle de priorité EDD a été déterminée suivant l'hypothèse du Total Work Content en prenant une marge proportionnelle au temps de réalisation du produit (Cheng, 1987). Les probabilités d'occurrence des reprises ont été définies arbitrairement. Dans notre modèle de simulation, chaque machine a la même probabilité de générer des défauts (1) et chaque pièce défectueuse peut être réparée sur la même machine ou une machine précédente avec une probabilité équivalente (2).

$$\begin{cases} T_{reprises}(M1 \rightarrow M1) = T_{reprises}(M2 \rightarrow M1) + \\ T_{reprises}(M2 \rightarrow M2) \end{cases} \quad (1)$$

$$T_{reprises}(M2 \rightarrow M1) = T_{reprises}(M2 \rightarrow M2) \quad (2)$$

Ces équations peuvent être simplifiées en ne considérant qu'une seule probabilité de reprises T_r sur les machines M1 et M2. Cette simplification est présentée sous forme de flux de produit sur la figure 3. Le passage sur la machine 1 est toujours suivi d'un passage sur la machine 2, même dans le cas d'une reprise car on considère que si la pièce nécessite à nouveau la tâche 1, la(les) tâche(s) suivante(s) a(ont) été(e)s compromise(s). Les deux machines sont paramétrées avec la même cadence de production. Le 100% en entrée de la machine 1 matérialise un nombre de pièce total qui va entrer sur la chaîne de production M1 – M2. Cette quantité de pièces va augmenter entre les 2 machines à cause des reprises alors que la quantité de sortie sera à nouveau égale à la quantité d'entrée vu qu'il n'y a ni création ni perte de pièces sur la chaîne. La variabilité implémentée dans le modèle pour les temps de génération des commandes, les temps de traitement sur les postes de travail et la probabilité d'occurrences de défauts impliquent des perturbations (ex. Bullwhip Effect). Cette variabilité a été prise arbitrairement selon la loi normale qui est connue en théorie des probabilités et en statistique comme l'une des lois les plus adaptées pour modéliser des phénomènes issus de plusieurs événements aléatoires. D'autres lois auraient pu être utilisées pour parvenir à des résultats équivalents.

4 COMBINAISON D'INDICATEURS

La combinaison de deux ou plus des indicateurs présentés précédemment permet de combiner plusieurs vues différentes afin de porter un jugement plus complet sur l'état d'un atelier de production. L'indicateur N_{defaut} qui évalue le nombre de pièces ayant présenté au moins un défaut, est couramment utilisé dans les entreprises car il résulte directement des méthodes de contrôle de la qualité. Il est donc directement lié avec la capacité de l'atelier à réaliser le produit juste du premier coup. Seul, il ne permet pas de comprendre et prévoir l'impact sur la perturbation des flux alors que les combinaisons réfléchies peuvent y parvenir. Les figures 4 à 8 présentent des vues combinées différentes du même atelier de production géré avec la

même règle de pilotage. 100 simulations ont été lancées avec chacune un taux de reprise différent.

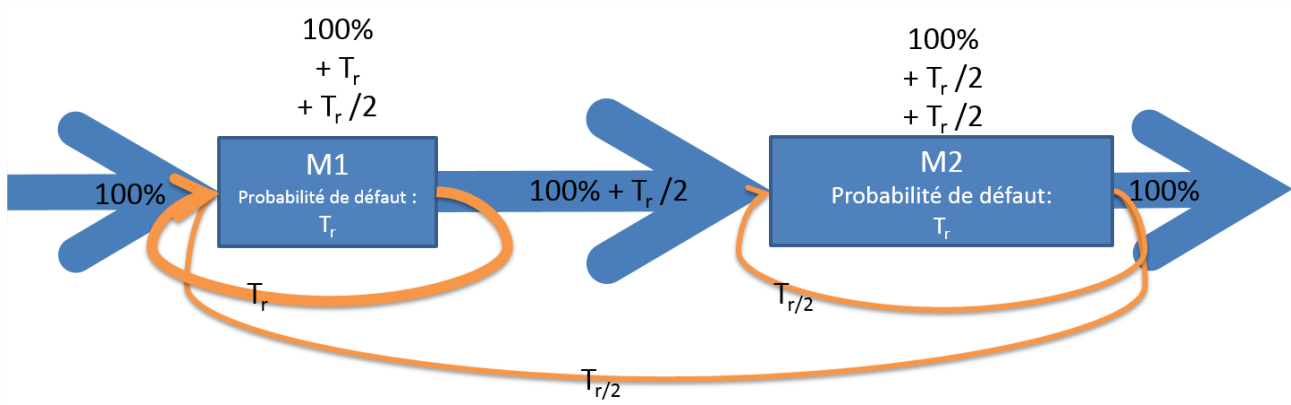


Figure 3 : Probabilité d'occurrence d'une reprise

Chaque point des figures 4 à 8 correspond à une simulation et donc à un taux de reprises. Pour chaque simulation, nous plaçons le point sur le graphique en fonction de la valeur atteinte par les deux indicateurs que nous souhaitons mettre en vis-à-vis, nous offrant ainsi une vue particulière de l'évolution du comportement de ces deux indicateurs en fonction du taux de reprises. La position des indicateurs entre abscisse et ordonnée n'a pas d'importance dans notre cas car nous regardons leurs évolutions simultanées et non l'un en fonction de l'autre. Ces combinaisons permettent de mettre en évidence un ou plusieurs seuils déterminant des zones à différents niveaux de perturbation des flux. Nous nous intéressons ici uniquement à l'existence de ces seuils et à la manière de les rendre visibles en combinant des indicateurs judicieusement choisis. Les valeurs des seuils présentés dans les figures 4 à 8 n'ont pas d'intérêt particulier car ils dépendent essentiellement des paramètres de simulation.

4.1 Vue combinant la capacité à réaliser le produit juste du premier coup et la satisfaction client

Le point de vue présenté figure 4 combine deux indicateurs très couramment utilisés dans les entreprises montre clairement deux seuils de comportement du système de production.

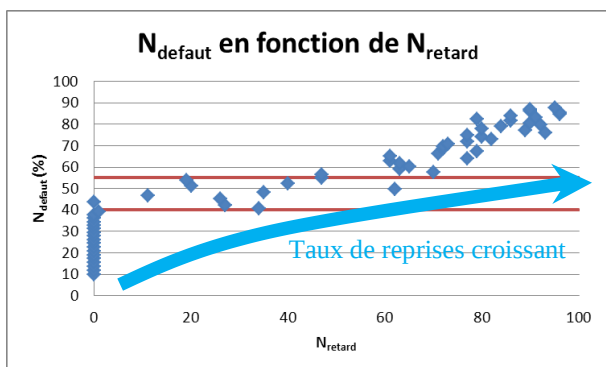


Figure 4 : Matérialisation des différentes zones de comportements sur la vue offerte par N_{retard} et N_{defaut}

Lorsque le taux de reprises augmente, il est normal que N_{default} augmente puisque une première reprise correspond à un défaut. L'indicateur N_{retard} n'augmente pas au départ car, si la capacité de l'atelier est suffisante, quelques réparations ne mettront pas en retard la pièce. Sur ce graphique, avec les paramètres de simulation présenté précédemment, la structure du système et les jeux de paramètres de fonctionnement permettent l'absorption des défauts jusqu'à 40% de N_{default} sans perturber les livraisons. En revanche, dès lors que l'on dépasse ce seuil de 40%, un faible gradient de l'ordre de 5% de N_{default} peut correspondre à une augmentation du nombre de retard de 60%. Lorsque le taux de reprises est très haut (points en haut à droite), un même gradient de 5% de N_{default} ne correspondra plus qu'à un gradient de 15% de retard. Ceci est expliqué par le fait que déjà une grande partie des pièces est en retard et donc que les pièces encore livrables à temps sont moins nombreuses. Encore une fois, les valeurs dépendent des paramètres de simulation. Toutefois, on peut parler de l'existence de deux bornes de saturation du système. La première (située, avec notre modèle et scénario de simulation, aux alentours de 40% de défauts) délimite la zone d'absorption (en dessous) de la zone de dégradation rapide où le nombre de retard de livraison devient conséquent et imprévisible (au milieu). On l'appellera le seuil d'absorption. La deuxième, (située, avec notre modèle et scénario de simulation, aux alentours de 55% de défauts) délimite la zone de dégradation rapide (au milieu) de la zone de saturation où le nombre de retard augmente à nouveau plus lentement car la presque totalité des pièces est déjà en retard. On l'appellera le seuil de saturation. La mise en évidence des bornes que l'on vient de faire arbitrairement sur N_{default} peut aussi se faire sur N_{retard} . Dans ce cas, la borne d'absorption se situerait à 0%, ce qui est difficilement exploitable sur le terrain, et la borne de saturation se situerait vers 55%.

4.2 Vue combinant la capacité à réaliser le produit juste du premier coup et la ponctualité

Le retard est perçu comme un indicateur de ponctualité car il mesure la différence entre la date souhaitée d'expédition et la date de fin de production qui le rend donc disponible pour l'expédition. Sur la figure 5, le retard du produit le plus en retard R_{max} est exprimé en heures. Le seuil d'absorption vu précédemment est aussi directement visible sur ce graphique.

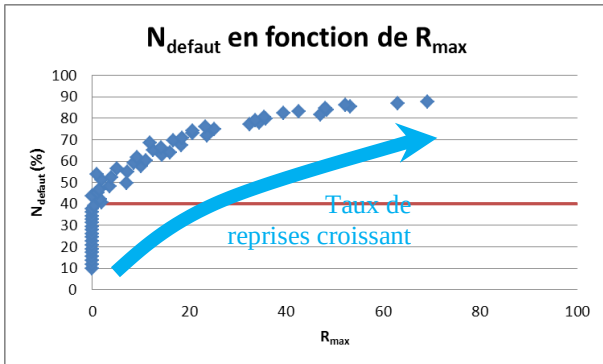


Figure 5 : Matérialisation des différentes zones de comportements sur la vue offerte par $N_{default}$ et R_{max}

Toutefois, la différence fondamentale avec le graphique précédent réside dans l'augmentation de R_{max} qui est beaucoup plus linéaire avec l'augmentation des taux de reprises, ce qui complique la matérialisation du seuil de saturation. En effet, un gradient d'augmentation de 5% de défauts vers la borne d'absorption engendre une augmentation du retard maximum de moins d'une heure. En revanche, une même augmentation de 5% de défauts lorsque $N_{default}$ atteint 70% engendre une augmentation du retard max de plus de 10 heures. Cette particularité empêche de pouvoir déterminer le seuil de saturation et cette combinaison offre donc une vue moins complète.

4.3 Vue combinant le taux de satisfaction client et la ponctualité

La figure 6 présente les comportements combinés de R_{max} et N_{retard} . Pour des taux de reprises faibles (en bas à gauche), N_{retard} augmente très rapidement alors que R_{max} augmente lentement (les lots tombent facilement en retard mais avec de très petits retards) tandis que pour des taux de reprises élevés (en haut à droite), N_{retard} augmente lentement alors que R_{max} augmente de plus en plus rapidement (la majeure partie des lots sont déjà en retard mais la durée des retards s'allonge). Il est donc possible de mettre en évidence les différences de pentes entre les zones comme présenté sur la figure 6. Notons aussi que le point (0;0) représente en réalité une multitude de points superposés correspondant à toutes les situations inférieures au seuil de 40% de $N_{default}$. Les

seuils d'absorption et de saturation comme définis précédemment pourraient donc respectivement se situer à $N_{retard} = 0\%$ et $N_{retard} = 60\%$ qui correspond à l'ordonnée de changement de pente. Si nous regardons ces seuils depuis l'indicateur R_{max} , ces mêmes seuils se situeraient à $R_{max} = 0$ et $R_{max} = 8h$.

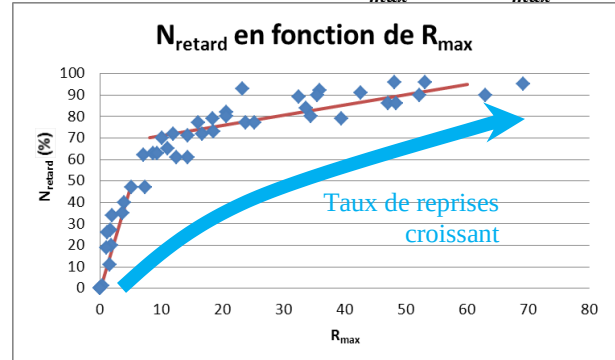


Figure 6 : Matérialisation des différentes zones de comportements sur la vue offerte par N_{retard} et R_{max}

4.4 Vue combinant la vitesse d'écoulement du flux et le taux de satisfaction client.

C_{max} est un indicateur couramment utilisé dans les problématiques de planification et d'ordonnancement. Il correspond à la date de fin du dernier lot en en-cours de production et représente donc le temps minimum nécessaire à la fabrication de tous les lots. Dans notre étude, de par sa définition, il offre donc une vision sur la vitesse d'écoulement du flux. Le graphique de la figure 7 montre l'évolution simultanée du C_{max} avec N_{retard} .

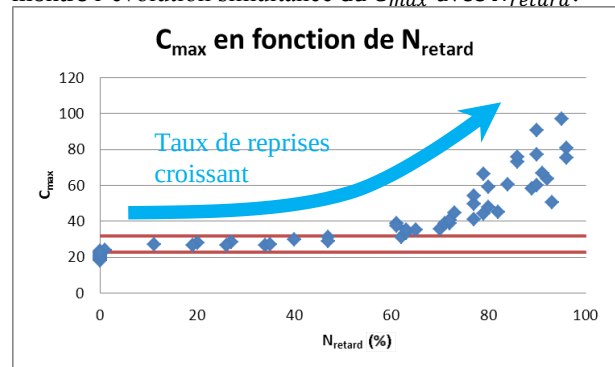


Figure 7 : Matérialisation des différentes zones de comportements sur la vue offerte par $N_{default}$ et C_{max}

Sur la figure 7, on peut là encore diviser le graphique en trois zones de comportement différentes. La première zone (sous le premier seuil d'absorption) correspond à la zone d'absorption. Il s'agit des points situés sur l'axe des ordonnées (lorsque N_{retard} vaut 0). Ceci signifie que la durée d'écoulement de production de toutes les pièces peut s'allonger quelques peu sans générer de retard. Cette capacité d'absorption est par exemple possible pour un atelier travaillant généralement en sous-capacité. La deuxième zone correspond à l'augmentation rapide du nombre de retards (jusqu'à 50% environ sur le graphique) alors que le C_{max} n'augmente pas de manière conséquente. On peut expliquer ce comportement par le

fait qu'une augmentation du C_{max} (une grosse réparation par exemple) mette en retard toutes les pièces qui devaient être produites après. Ce comportement est renforcé par l'utilisation de la règle de priorité EDD entre les pièces qui ne cherchent pas à « sauver » un maximum de pièces du retard en « condamnant » quelques-unes, mais qui fait toujours passer la plus urgente en priorité, même si cette dernière est déjà en retard. La dernière zone correspond à une augmentation très marquée du C_{max} avec une variabilité croissante. Cette zone témoigne bien du fait que lorsque le taux de reprises est trop important il devient quasiment impossible de prévoir correctement le temps nécessaire à la fabrication d'une quantité de lots donnés. Cette augmentation correspond à l'incapacité du système à absorber les reprises et se traduit sur le terrain par une augmentation du nombre de produits dans les files d'attente devant les postes de travail.

4.5 Vue combinant la vitesse d'écoulement du flux et le retard maximum.

La combinaison de C_{max} qui représente la vitesse d'écoulement du flux et de R_{max} , le retard maximum, ne permet pas de mettre en relief aussi clairement les différents types de comportement cités plus haut comme présenté sur le graphique de la figure 8 :

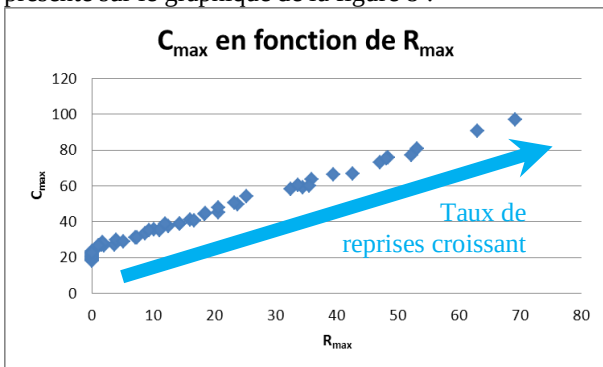


Figure 8 : Zones de comportement moins marquées sur la vue offerte par R_{max} et C_{max}

A première vue linéaire malgré la variabilité implémentée dans les simulations, les points matérialisent quand même deux zones de comportement. La superposition des points le long de l'axe des ordonnées qui correspond à une augmentation du temps de production nécessaire à la réalisation de tous les lots à produire sans générer de retard d'expédition. Puis une zone où le C_{max} et le R_{max} semblent parfaitement linéairement corrélés. Le choix des indicateurs à mettre en relation est donc primordial pour offrir la vue la plus pertinente pour les problèmes de l'industriel. Il faut pouvoir faire ressortir les informations dont l'industriel a besoin sans en masquer d'autres.

5 SEUILS DE FONCTIONNEMENT

Les graphiques précédents ont permis de mettre en relief l'existence de différents seuils de fonctionnement liés à la variation du taux de reprises. Ces seuils semblent

délimiter trois zones dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Zone 1 (taux de reprises faible) : Absorption des reprises par le système, pas d'impact (ou très peu) sur la majorité des indicateurs considérés.
- Zone 2 (taux de reprises proche du seuil) : Dégradation très rapide de la plupart des indicateurs. Le système est en cours de saturation.
- Zone 3 (taux de reprises supérieur au seuil) : Le système est saturé, les files d'attente accumulent de plus en plus de produits, les indicateurs présentent de plus en plus de variabilité.

Il est évident que la position de ces seuils et donc la grandeur de ces zones est fonction de différents paramètres définis de manière figée dans notre modèle de simulation. Parmi ces paramètres, il est possible de citer :

- La marge totale qui correspond au temps disponible pour la réalisation du produit, c'est-à-dire le temps entre le lancement en fabrication et la date souhaitée d'expédition ou la marge restante qui correspond à la différence entre le temps avant livraison et le temps de production prévu par la gamme.
- La capacité des machines considérées comme goulots et qui sont donc les principales génératrices de file d'attente.
- La charge globale de l'atelier qui a un impact direct sur les files d'attente.

Dans le cadre de notre projet plus global, la détermination efficace de ces zones de fonctionnement est primordiale. À chacune de ces zones correspondra des règles de pilotage différentes afin de maintenir le système « sous contrôle ». Nos prochains travaux concerneront donc l'évaluation des seuils de comportement et leur évolution en fonction des paramètres du système tels que ceux énoncés précédemment.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les flux de produits générés par les reprises perturbent la production de manière conséquente. Ceci est largement confirmé par la littérature mais rarement étudié en profondeur. Dans le but de développer un système d'aide au pilotage de la production pour les entreprises présentant de fort taux de reprises et suite à nos précédents travaux sur les indicateurs de non-qualité et de perturbation des flux, nous résumons tout d'abord dans ce papier les vues offertes par les différents indicateurs ainsi que leur disponibilité en les classant par famille de comportement. Quelques combinaisons des indicateurs les plus pertinents sont ensuite proposées afin de mettre en évidence les premiers seuils de comportement délimitant les différents états de fonctionnement de l'atelier. Le modèle (et son paramétrage) utilisé pour réaliser cette étude, et explicité dans notre article, a permis de déterminer trois zones de comportement s'articulant autour de deux seuils clairement définis. Ces seuils étant liés aux paramètres du modèle, nous avons comme perspectives d'analyser leur évolution en faisant varier la

marge totale ou la capacité par exemple. Nous devons aussi valider nos analyses à une échelle industrielle afin d'apporter à nos travaux une dimension plus réelle. Le but final reste le développement d'une carte de comportement visuelle dans le but de connaître en temps réel l'état de l'atelier, son niveau de saturation, afin de pouvoir prendre des décisions efficaces sur les règles de pilotage. Les cartographies d'indicateurs pourraient permettre d'être encore plus performant, précis et réactif par rapport au suivi d'un seul indicateur global. En effet, la position du point correspondant au fonctionnement actuel de l'atelier sur la « cartographie de contrôle » permettrait de savoir dans quel « état » l'atelier se trouve et donc d'adapter les règles de pilotage sur le terrain. Il pourrait y avoir autant de règles différentes à appliquer que de zone de comportement délimitées.

REFERENCES

- Abouzahir O., Gautier R., Gidel T., 2003. Pilotage de l'amélioration des process par les coûts de non-qualité. 10ième Séminaire CONFERE, Belfort, France, 3-4 Juillet.
- AFGI, 1992. Evaluer pour évaluer, les indicateurs de performance au service du pilotage industriel. *Association Française de Gestion Industrielle*, ouvrage collectif AFGI, Octobre.
- Cheng T.C.E., 1987. Optimal total-work-content-power due-date determination and sequencing. *Computers & Mathematics with Applications*, 14(8), 579-582.
- Colledani M., Tolio T., 2006. Impact of quality control on production system performance. *CIRP Annals-Manufacturing-Technology*, 55(1), 453-456.
- Disney M.S., Towill, D.R., 2003. On the bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy. *Omega*, 31(3), 157-167.
- Feigenbaum A.V., 1951. Quality control: Principles, practice and administration: An industrial management tool for improving product quality and design and for reducing operating costs and losses. McGraw-Hill, New-York.
- Garvin D., 1984. What does product quality really mean. *Sloan management review*, 26(1), 25-48.
- Love P.E.D., Li H., Mandal P., 1999. Rework: a symptom of a dysfunctional supply chain. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 5(1), 1-11.
- Noyel M., Thomas P., Charpentier P., Thomas A., Brault T., 2013. Implantation of an on-line quality process monitoring. *5th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM'13*, Rabat, Maroc, 28 – 30 octobre.
- Noyel M., Thomas P., Charpentier P., Thomas A., Brault T., 2014. Flow disturbance analysis in workshops with high reworks rate. *Advances in Production Management Systems*, 20-24 septembre 2014
- Rabiee M., Zandies M., Jafarian A., 2012. Scheduling a no-wait two-machine flow shop with sequence-dependent setup times and probable rework using robust meta-heuristics. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7428-7446.
- Skidmann A., Nof S.Y., 1985. Unitary manufacturing cell design with random product feedback flow. *IIE transactions*, 17(2), 188-193.
- Skidmann A., Schweitzer P., Nof S.Y., 1985. Performance evaluation of a flexible manufacturing cell with random multiproduct feedback flow. *International Journal of Production Research*, 23(6), 1171-1184.
- Thomas A., Charpentier P., 2005. Reducing simulation models for scheduling manufacturing facilities. *European Journal of Operational Research*, 161(1), 111-125.
- Zargar A.M., 1995. Effect of rework strategies on cycle time. *Computers & Industrial Engineering*, 29(1), 239-243.