

## Une structure hiérarchique d'indicateurs de performance clés pour la gestion des opérations et amélioration continue des systèmes de production

Ningxuan Kang <sup>une</sup>, Cong Zhao <sup>b \*</sup>, Jingshan Li <sup>b</sup> et John A. Horst <sup>c</sup>

<sup>une</sup> Département de génie industriel, Université Tsinghua, Pékin, Chine; <sup>b</sup> Département de génie industriel et des systèmes, Université du Wisconsin, Madison, WI, États-Unis; <sup>c</sup> Laboratoire d'ingénierie, Institut national des normes et de la technologie, Gaithersburg,

Etats-Unis

( Reçu le 10 septembre 2015; accepté le 16 décembre 2015)

Les indicateurs de performance clés (KPI) sont essentiels pour la gestion des opérations de fabrication et l'amélioration continue (IC). Dans les systèmes de fabrication modernes, les indicateurs de performance clés sont définis comme un ensemble de mesures pour refléter les performances opérationnelles, telles que l'efficacité, le débit, la disponibilité, du point de vue de la productivité, de la qualité et de la maintenance. Grâce à la surveillance et à la mesure continues des indicateurs de performance clés, une quantification et une identification significatives des différents aspects des activités d'exploitation peuvent être obtenues, ce qui permet et oriente les efforts d'IC. Un ensemble de 34 KPI a été introduit dans ISO 22400. Cependant, les KPI dans un système de fabrication ne sont pas indépendants et peuvent avoir des relations mutuelles intrinsèques. Le but de cet article est d'introduire une structure à plusieurs niveaux pour l'identification et l'analyse des KPI et de leurs relations intrinsèques dans les systèmes de production. Spécifiquement, Grâce à une telle structure hiérarchique, nous définissons et superposons les KPI en niveaux de KPI de base, KPI complets et leurs métriques de prise en charge, et l'utilisons pour étudier les relations et les dépendances entre les KPI. Une telle étude peut fournir un outil utile aux ingénieurs de fabrication et aux responsables pour mesurer et utiliser les KPI pour l'IC.

**Mots clés:** indicateur de performance clé (KPI); gestion des opérations de fabrication (MOM); amélioration continue (IC); systèmes de production; dépendance; relation; ISO 22400

### 1. Introduction

L'industrie manufacturière moderne devient de plus en plus compétitive. Afin de répondre aux demandes changeantes et variées des clients, les entreprises de fabrication doivent atteindre et maintenir une productivité et une qualité élevées, avec une réponse rapide, une flexibilité suffisante et des délais courts. Par conséquent, l'industrie manufacturière a incorporé divers systèmes de mesure pour évaluer la performance des activités d'opérations de fabrication, définis comme des systèmes de mesure de la performance (PMS). Neely 1995 ). Au sein d'un PMS, les objectifs stratégiques sont d'abord déterminés en fonction des besoins de l'entreprise pour réussir. Ensuite, chaque objectif est étayé par un ensemble d'indicateurs détaillés contribuant à la réalisation des objectifs stratégiques. Ces indicateurs sont appelés indicateurs clés de performance (KPI).

En d'autres termes, les indicateurs de performance clés sont définis comme un ensemble de mesures quantifiables et stratégiques dans un PMS qui reflètent les facteurs critiques de succès d'une entreprise. La sélection appropriée et une meilleure compréhension des KPI peuvent aider une entreprise à atteindre le succès commercial souhaité. Selon les rapports de Norme internationale ISO 22400-1 ( 2014 ) et Norme internationale ISO 22400-2 ( 2014 ), Les KPI jouent un rôle crucial dans la compréhension et l'amélioration des performances du système de fabrication. Le développement rapide de la technologie de l'information a fourni des opportunités sans précédent de détection et de contrôle au niveau de la gestion des opérations de fabrication (MOM) d'une entreprise. Les identifications par radiofréquence, les capteurs et le réseau sans fil, les contrôleurs logiques de programme, ainsi que les ordinateurs portables, tablettes et téléphones intelligents, ont été largement équipés sur le sol de l'usine ces dernières années. Cela a permis la collecte de données afin que les KPI puissent être facilement obtenus. Au total, 34 KPI ont été présentés dans les rapports de Norme internationale ISO 22400-1 ( 2014 ) et Norme internationale ISO 22400-2 ( 2014 ), ainsi que leurs contextes et contenus.

Dans les systèmes de fabrication, une fois qu'un ensemble de KPI est défini dans un PMS, chaque paramètre reflète une facette de la performance du système. Étant donné que différents aspects de la performance ne sont pas indépendants et ne peuvent être séparés les uns des autres, les KPI ont également des relations mutuelles. Certains KPI peuvent être corrélés positivement ou négativement. Certains pourraient être dérivés et remplacés par d'autres. Pour utiliser efficacement les indicateurs de performance clés pour l'amélioration continue (IC) ou le contrôle de la production, il est important de comprendre ces relations. Ainsi, l'étude des relations entre les KPI peut conduire à une meilleure compréhension et à une utilisation efficace des

\* Auteur correspondant. Email: [czhao27@wisc.edu](mailto:czhao27@wisc.edu)

leur. De plus, une contribution beaucoup plus avantageuse à l'identification des relations KPI est que la direction pourrait s'appuyer sur la relation connue existante pour projeter et développer de nouveaux KPI potentiels et trouver les relations correspondantes.

Jusqu'à présent, l'étude des relations KPI repose principalement sur des approches statistiques basées sur les données. Une telle méthode identifie les corrélations positives ou négatives entre les KPI. Cependant, il peut ne pas trouver les connexions intrinsèques et les idées managériales. En outre, les données collectées auprès de différentes entreprises peuvent conduire à des résultats sensiblement distincts. Par conséquent, une nouvelle approche pour découvrir les relations KPI via des implications intrinsèques doit être développée.

Pour y parvenir, les indicateurs de performance clés doivent être répartis de manière appropriée à différents niveaux, c'est-à-dire qu'une structure hiérarchique doit être développée. Par conséquent, dans cet article, nous proposons un cadre de recherche pour reconnaître les relations intrinsèques des KPI à partir de leurs définitions originales.

Utiliser et redéfinir les KPI fournis dans les rapports de **Norme internationale ISO 22400-1**

**(2014) et Norme internationale ISO 22400-2 (2014) et en introduisant quelques nouveaux KPI, nous présentons une structure hiérarchique pour la catégorisation des KPI. Dans**

chaque niveau hiérarchique, plusieurs catégories sont introduites. Sur cette base, nous explorons plus en détail leurs relations et leurs dépendances. Celles-ci constituent la principale contribution de cet article. Les résultats peuvent fournir des informations de gestion pour les entreprises manufacturières et sont applicables à la plupart des systèmes de production.

**Le reste de cet article est structuré comme suit. Section 2 examine la littérature connexe. Section 3 définit certains KPI et fournit une catégorisation pour les KPI.**

**Section 4 étudie les relations entre les KPI. Les dépendances entre les KPI et leurs mesures de prise en charge sont discutées dans la section 5. Une étude de cas sur l'utilisation de KPI pour améliorer les performances de la ligne de production dans une usine de fabrication automobile est présentée dans la section 6. Enfin, les conclusions sont données dans la section 7.**

## 2. Revue de la littérature

La recherche sur les systèmes de fabrication a attiré une attention considérable, où l'analyse des performances en a été un enjeu majeur. En règle générale, le débit, les stocks, les délais et la satisfaction de la demande des clients sont les principaux objectifs (voir les monographies par [Viswanadham et Narahari \(1992\)](#), [Buzacott et Shantikumar \(1993\)](#), [Papadopoulos, Browne et Heavey \(1993\)](#), [Tempelmeier et Kuhn \(1993\)](#), [Gershwin \(1994\)](#), [Zhou et Venkatesh \(1999\)](#), [Li et Meerkov \(2009\)](#) et avis de [Dallery et Gershwin \(1992\)](#), [Papadopoulos et Heavey \(1996\)](#), [Li et coll. \(2009\)](#)).

Les PMS pour MOM ont fait l'objet d'études approfondies au cours des dernières décennies. Les mesures financières sont les principaux axes ([Ghalayini 1997](#)). Cependant, il a été soutenu qu'une telle tradition présente des défauts dans la mesure et l'intégration de l'ensemble des paramètres essentiels au succès d'une entreprise commerciale ([Kaplan 1983](#); [Kaplan 1984](#); [Hayes, Wheelwright et Clark 1988](#); [Eccles 1991](#); [Fisher 1992](#); [Maskell 1992](#)). Pour surmonter cela, de nombreux nouveaux PMS sont développés, tels que le système de coût basé sur l'activité ([Cooper 1988](#); [Cooper 1988](#); [Cooper 1988](#); [Cooper 1989](#)), tableau de bord équilibré ([Kaplan et Norton 1996](#)), Système SMART ([Cross et Lynch \(1988\)](#)), questionnaire de mesure du rendement ([Dixon, Nanni et Vollman 1990](#)) et un système intégré de mesure dynamique des performances ([Ghalayini 1997](#)). [Neely \(1995\)](#) étudie les mesures de la performance et leur relation avec l'environnement après une revue d'articles massifs et proposent une ligne directrice pour la conception de PMS. [Gomes \(2004\)](#) examine la littérature sur les questions liées aux différentes facettes de la performance organisationnelle de fabrication et identifie certaines questions relatives à la pratique et à la théorie de la fabrication du PMS.

Étroitement liés au PMS, les KPI dans les systèmes de production ont suscité beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs ces dernières années.

[Rakar et coll. \(2004\)](#) établissent un ensemble d'indicateurs de performance clés capables de capturer l'état d'un système de production. [Ahmad et Dhafir \(2002\)](#) construisent également des KPI pour évaluer quantitativement les performances de fabrication d'une entreprise. [Arinez et coll. \(2010a\)](#) utilisent la modélisation par simulation d'événements discrets pour combiner les KPI de production traditionnels avec les KPI d'énergie de processus et donner des références au système de production, à l'énergie de processus et à la performance énergétique des installations.

Les relations entre les indicateurs de performance clés sont également discutées par de nombreux chercheurs, dont la plupart utilisent des méthodes basées sur les données et appliquent des approches statistiques. [Rodriguez \(2009\)](#) étudie quantitativement les relations de cause à effet des indicateurs de performance clés définis dans un système de mesure de la performance. Une méthode d'analyse des composants principaux est utilisée pour obtenir les corrélations des indicateurs. [Suwignjo](#)

[\(2000\)](#) développe des modèles quantitatifs pour les systèmes de mesure de la performance afin d'identifier les facteurs affectant la performance et leurs relations numériquement, là où la méthodologie des cartes cognitives est utilisée. [Sarkis \(1997\)](#) étudie la relation entre les mesures de la performance de productivité des systèmes de fabrication flexibles à mesure qu'ils deviennent plus complexes. Une analyse standard d'enveloppement des données et des techniques d'efficacité croisée sont utilisées.

Dans une autre direction, en utilisant des modèles mathématiques de lignes de production, des indicateurs de goulot d'étranglement ont été développés pour identifier et atténuer les goulots d'étranglement dans les systèmes de fabrication pour l'amélioration de la productivité (voir [Jacobs et Meerkov 1995](#);

[Kuo et coll. 1996](#); [Chiang, Kuo et Meerkov 1998](#), [2000](#), [2001](#); [Li et Meerkov 2000](#); [Li 2004b](#); [Billar 2010](#); [Meerkov et Zhang 2010](#), [2011](#)) et l'amélioration de la qualité (par exemple [Wang et coll. 2010](#); [Wang, Li et Huang 2012](#); [Wang et coll. 2013](#); [Ju et coll. 2013](#), [2014](#)).

Malgré ces efforts mentionnés ci-dessus, les relations intrinsèques des indicateurs de performance clés dans les systèmes de production sont encore largement méconnues. Cet article est destiné à contribuer à cette fin en développant une structure hiérarchique et en utilisant pour l'étude des relations KPI.

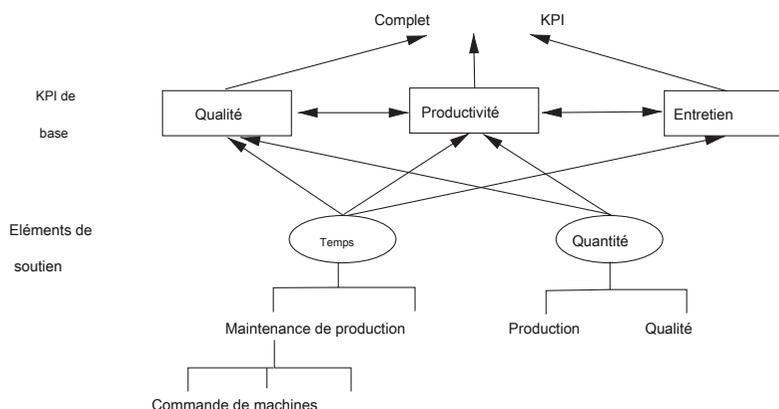


Figure 1. Catégorisation des KPI.

### 3. Définitions, hiérarchisation et catégorisation du KPI et de ses éléments de support

Bien que les rapports de **Norme internationale ISO 22400-1 (2014)** et **Norme internationale ISO 22400-2 (2014)** décrivent 34 KPI, des définitions plus rigoureuses sont nécessaires pour les distinguer clairement. Certains KPI doivent être redéfinis et des KPI supplémentaires doivent être inclus. De plus, ces KPI doivent être catégorisés de manière logique afin qu'il soit pratique de découvrir les relations intrinsèques entre eux. Par conséquent, il est nécessaire de regrouper les KPI en plusieurs catégories à différents niveaux, qui ont des liens croisés explicites.

Dans les systèmes de production, de nombreux éléments de mesure bruts sont surveillés et collectés, tels que le temps occupé de la machine et le volume de production. Sur la base de ces éléments, des indicateurs de performance clés qui intéressent les ingénieurs et les gestionnaires peuvent être dérivés et évalués, par exemple, l'efficacité ou la qualité. Ainsi, les éléments directement surveillés deviennent les métriques de support pour les KPI. Ces KPI révèlent principalement un seul aspect des performances du système et sont donc classés comme KPI de base. Pour représenter la performance globale, des KPI plus complets, pris en charge par plusieurs KPI de base, peuvent être obtenus. Par exemple, l'indice d'efficacité globale des équipements (OEE), qui est basé sur l'allocation du temps de fonctionnement et de panne de l'équipement individuel (ou d'un groupe d'équipements global), fournit des informations relatives à l'efficacité de production et à la perte de production. Le débit d'une ligne de production dépend de toutes les machines, des tampons, de leurs positions et interactions. Par conséquent, sur la base de ces attributs, du rôle de support, de la fonction unique et de la fonctionnalité complète de ces éléments ou indicateurs, nous introduisons une structure hiérarchique pour catégoriser les KPI et les éléments de support.

Plus précisément, une telle structure se compose de trois niveaux catégorisés : la mesure directe ou les éléments de support, les KPI de base et les KPI complets, comme le montre la figure 1. De plus, nous regroupons les paramètres en fonction de leurs fonctions ou attributs dans chaque niveau. Au niveau des éléments de support, les mesures peuvent être divisées en groupes de temps et de quantité. Dans le groupe de temps, il y aura des mesures de temps liées à la production et à la maintenance, du point de vue des machines, des ordres de fabrication et des opérateurs. Dans le groupe de quantité, les mesures sont liées aux quantités sur la production et la qualité. Pour les KPI de base, les attributs sont liés à la production, à la qualité et à la maintenance. Ces KPI sont calculés par les mesures directes. Ils contribuent tous aux indicateurs de performance clés complets. Notez que les relations existent non seulement entre différents niveaux de KPI et éléments de support, mais peuvent également lier des KPI au sein du même niveau, qui sont représentés par des flèches doubles entre la qualité, la productivité,

Un tel cadre hiérarchique indique explicitement les relations causales entre les différents niveaux de KPI et les éléments de support. De toute évidence, une telle catégorisation n'est pas unique. D'autres types de structure de regroupement peuvent être développés en fonction des objectifs spécifiques. Ci-dessous, les indicateurs de performance clés et les mesures de prise en charge illustrés dans la figure 1 sont décrits. Étant donné que des éléments de support sont nécessaires pour dériver les indicateurs de performance clés de base et complets, ces éléments sont présentés en premier.

#### 3.1 Éléments de soutien

Les éléments de support sont les données directement surveillées et collectées pendant la production. En utilisant ces éléments, les KPI de base peuvent être dérivés. Dans le cadre proposé, les éléments de support peuvent être divisés en deux catégories : le temps et la quantité.

### 3.1.1 Éléments temporels

Les éléments de temps sont les données liées aux durées de temps dans les opérations des systèmes de production. Ce sont des mesures de temps décrivant les activités liées à la production et à la maintenance. Dans un processus de production, ces temps peuvent être mesurés du point de vue d'une machine, d'un ordre de fabrication ou d'un opérateur. En commençant par les éléments fournis dans **Norme internationale ISO 22400-2 (2014)**, nous les modifions, les redéfinissons et en introduisons de nouvelles pour les rendre rigoureusement présentées. Tout d'abord, considérons une machine ou un poste de travail, les périodes suivantes peuvent être planifiées:

- *Temps de fonctionnement prévu (POT)*: heure programmée pendant laquelle une machine peut être utilisée.
- *Temps occupé prévu (PBT)*: le temps planifié pendant lequel une machine est occupée.

Ces deux périodes ne sont pas les mêmes en raison du temps de non-travail prévu. Ainsi, pour aborder la relation entre eux, l'élément suivant est introduit:

- *Temps d'arrêt planifié (PDOT)*: Le temps prévu pendant lequel une machine est incapable de produire, qui peut inclure des pauses programmées, des réunions, de la maintenance, etc.

$$POT = PBT + PDOT. \quad (1)$$

Ensuite, d'un point de vue pièce ou ordre de fabrication, nous avons

- *Durée d'exécution prévue par article (PRI)*: le temps prévu pour produire une pièce ou une pièce.
- *Heure de configuration de l'unité prévue (PUST)*: heure planifiée pour qu'une machine se configure pour une commande.
- *Temps d'exécution de l'ordre planifié (POET)*: l'heure prévue pour l'exécution d'une commande. Considérant qu'un

ordre de fabrication a traité la quantité de pièces PQ, nous obtenons

$$POËTE = PRI \cdot PQ + PUST. \quad (2)$$

Cependant, le temps prévu peut ne pas être exactement observé en production, en raison de pannes, de déséquilibres, etc. Ainsi, les délais réels sont présentés ci-dessous en fonction d'un ordre de fabrication sur une seule machine ou unité de travail.

- *Temps de traitement réel de l'unité (AUPT)*: Le temps nécessaire à la production et à la configuration sur une machine pour une commande.
- *Temps de production réel (APT)*: le temps réel pendant lequel la machine produit pour une commande, qui inclut uniquement les fonctions de valeur ajoutée.
- *Heure de configuration réelle de l'unité (AUST)*: Le temps utilisé pour la préparation, c'est-à-dire la configuration, d'une commande sur une machine. Ainsi, la

relation suivante est observée:

$$AUPT = APT + AUST. \quad (3)$$

De plus, pour caractériser le temps d'arrêt réel, nous définissons

- *Temps d'arrêt réel de l'unité (ADOT)*: le temps réel pendant lequel le processus de production est retardé en raison d'interruptions causées par un dysfonctionnement, d'arrêts mineurs et d'autres événements imprévus.
- *Temps d'inactivité réel de l'unité (AUIT)*: l'heure réelle pendant laquelle la machine n'exécute pas la production de commandes même si elle est disponible. Cela peut également être appelé *temps de retard réel de l'unité (ADET)*. Ensuite, le temps occupé réel peut être introduit comme
- *Temps d'occupation réel de l'unité (AUBT)*: le temps réel pendant lequel une machine est utilisée pour l'exécution d'un ordre de fabrication. On obtient

$$AUBT = AUPT + ADOT, \quad (4)$$

$$PBT = AUBT + ADET. \quad (5)$$

Lors de l'exécution d'un ordre de fabrication, une machine peut avoir besoin de charger ou de décharger la pièce, et la pièce peut devoir attendre dans une mémoire tampon ou sur une machine en raison des interactions de la machine avec d'autres unités de travail. Ces délais sont définis comme suit:

- *Temps d'exécution réel de l'ordre (AOET)*: le temps écoulé entre le début d'une commande et son achèvement sur une machine.

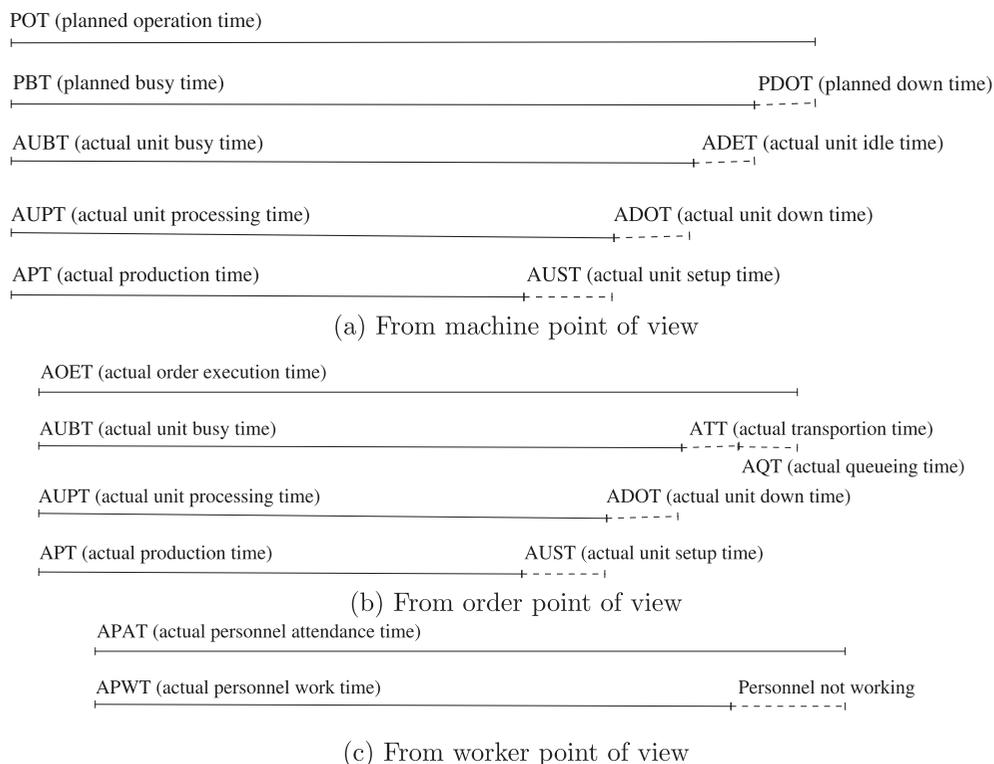


Figure 2. Éléments temporels.

- *Temps de transport réel (ATT)*: le temps réel de transport des pièces sur ou entre les machines, comme le temps de chargement et de déchargement.
- *Temps réel de mise en file d'attente (AQT)*: Le temps réel pendant lequel le matériau attend de passer par un processus de fabrication, c'est-à-dire le temps de mise en file d'attente dans un tampon. Parfois, ce temps de mise en file d'attente est également appelé *temps de séjour dans le tampon*.

La relation se présente comme:

$$AOET = AUBT + ATT + AQT + ADET. \quad (6)$$

De plus, du point de vue d'un travailleur ou d'un opérateur, nous avons

- *Temps de présence réel du personnel (APAT)*: temps réel pendant lequel un travailleur est disponible pour travailler sur les ordres de fabrication.
- *Temps de travail réel du personnel (APWT)*: temps dont un travailleur a besoin pour exécuter un ordre de fabrication. De toute évidence, la différence

entre eux est le temps pendant lequel le travailleur ne travaille pas. Les relations mentionnées ci-dessus sont illustrées dans la figure 2.

### 3.1.2 Éléments de quantité

En plus des éléments de temps, les éléments de quantité (la plupart sont appelés éléments logistiques dans Norme internationale ISO 22400-2 (2014)) fournissent des informations sur les problèmes liés à la qualité et à la quantité des produits. Certains éléments de quantité majeurs sont définis comme suit.

- *Bonne quantité (GQ)*: La quantité produite qui répond aux exigences de qualité dans la première fois d'un processus d'exploitation.
- *Quantité de rebut (SQ)*: La quantité produite qui ne répond pas aux exigences de qualité et doit être mise au rebut ou recyclée.
- *Quantité de rebut prévue (PSQ)*: la quantité de ferraille liée au processus attendue lors de la fabrication du produit.
- *Quantité de reprise (RQ)*: la quantité qui ne répond pas aux exigences de qualité, mais ces exigences peuvent être satisfaites par retraitement.

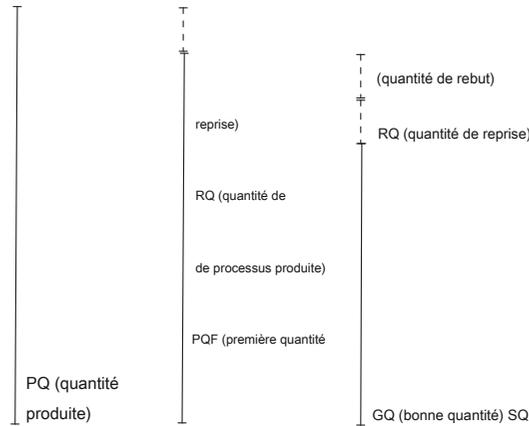


Figure 3. Éléments de quantité.

- *Quantité traitée (PQ)*: La quantité qu'une unité de travail a traitée (qui peut inclure celles retravaillées et grattées).
- *Quantité produite lors de la première opération (PQF)*: La quantité qu'une machine a produite dans la première fois d'un processus d'opération.

Supposons que toutes les pièces retravaillées soient de bonne qualité, alors la relation entre ces quantités peut être décrite comme

$$PQF = GQ + SQ + RQ, \quad (7)$$

$$PQ = PQF + RQ. \quad (8)$$

Une illustration de ces quantités est présentée dans la figure 3. De plus, en pratique, PSQ est la quantité mise au rebut prévue,

qui peut être différent avec le SQ réel. Le PQF est la première quantité de temps, qui est utilisée pour définir la première qualité de temps dans de nombreuses pratiques.

Lorsque les pièces retravaillées nécessitent plusieurs fois de retraitement, la relation PQ avec PQF ajoutera plus de RQ à chaque fois. En d'autres termes, si les pièces sont retravaillées  $N$  fois, alors

$$PQ = GQ + SQ + (N + 1) \cdot RQ.$$

La formule peut être plus compliquée si chaque reprise entraîne un nombre différent de pièces de bonne qualité. Vous trouverez des références pour l'étude des systèmes avec des boucles de reprise dans Li (2004a), Li (2004b), Li et coll. (2008), et Biller (2010).

### 3.1.3 Éléments de maintenance

Les éléments de maintenance enregistrent les informations relatives aux problèmes de maintenance et de réparation des machines. Basé sur des éléments introduits dans Norme internationale ISO 22400-2 (2014), certains éléments de maintenance importants sont définis ou modifiés ci-dessous.

- *Temps d'échec (TTF)*: le temps réel pendant lequel une machine est capable de produire, à partir de l'achèvement de la réparation et se terminant à une nouvelle panne. Cet élément est également appelé *Temps entre les échecs (TBF)*.
- *Temps de fonctionnement entre les pannes (OTBF)*: le temps réel de production de l'unité entre deux pannes consécutives d'une machine.

La différence entre TBF et OTBF sur une commande sera le temps d'inactivité et le temps de configuration. Ensuite, la relation entre eux peut être décrite comme

$$TTF = TBF = OTBF + ADET + AUST. \quad (9)$$

- *Temps de réparation (TTR)*: Le temps réel pendant lequel une machine est indisponible en raison d'une panne, c'est-à-dire en réparation.
- *Événement d'échec (FE)*: Le décompte sur un intervalle de temps spécifié des terminaisons de la capacité d'une machine à effectuer une opération requise.

- *Temps de maintenance corrective (CMT)*: la partie du temps de maintenance pendant laquelle la maintenance corrective est effectuée sur une machine.
- *Temps de maintenance préventive (PMT)*: la partie du temps de maintenance pendant laquelle la maintenance préventive est effectuée sur une machine.

En plus des éléments ci-dessus, des éléments liés à l'énergie pourraient illustrer les informations relatives aux coûts énergétiques. Étant donné que ces éléments sont en grande partie inexplorés, ils sont ignorés dans cet article, mais ils constitueront certainement une partie importante des recherches futures.

### 3.2 KPI de base

Chaque KPI de base révèle un aspect de la performance d'une unité de travail ou d'un système, dérivé des données surveillées des éléments de support. Les KPI de base **peuvent être regroupés par ceux représentant un groupe d'aspects avec des attributs similaires. Dans la structure proposée, différente de Norme internationale ISO 22400-2 (2014)**, nous classons les KPI de base en trois groupes: aspects de la production, de la qualité et de la maintenance. Encore une fois, un tel regroupement n'est pas unique. Ci-dessous, ces groupes sont décrits en détail.

#### 3.2.1 KPI de production

Certains indicateurs clés de performance importants traitant des problèmes de production sont regroupés et définis ci-dessous. Tout d'abord, considérez les KPI au niveau de l'unité de travail ou de la machine.

- *Disponibilité (A)*: Le pourcentage de temps réel pendant lequel une machine est disponible, c'est-à-dire l'APT parmi les PBT d'une machine. Il représente la partie du temps utilisée pour le traitement par rapport au temps total qui comprend AUST, le temps de retard et le temps d'arrêt.

$$A = \frac{APT}{PBT} \cdot 100\% \quad (\text{dix})$$

La disponibilité est similaire à la soi-disant efficacité. Sur la base de divers objectifs, différents aspects de l'efficacité peuvent être définis.

- *Efficacité de l'allocation (AE)*: l'utilisation et la disponibilité réelles de la capacité planifiée d'une machine, qui est mesurée par le rapport entre l'AUBT et le temps d'occupation de l'unité planifié (PBT). La partie complémentaire est le pourcentage de temps d'arrêt réel de l'unité.

$$AE = \frac{AUBT}{PBT} \cdot 100\% \quad (11)$$

- *Efficacité technique (TE)*: efficacité de la production par rapport aux interruptions causées par des dysfonctionnements. Il représente la relation entre APT et la somme de APT et ADOT qui comprend les temps d'interruptions provoquées par un dysfonctionnement.

$$TE = \frac{APT}{APT + ADOT} \cdot 100\% \quad (12)$$

- *Efficacité des travailleurs (WE)*: L'efficacité de la présence d'un travailleur à la production, mesurée par la relation entre le temps de travail effectif du personnel (APWT) lié aux ordres de fabrication et le temps de présence effectif du personnel (APAT).

$$WE = \frac{APWT}{APAT} \cdot 100\% \quad (13)$$

- *Efficacité d'utilisation (UE)*: La productivité d'une machine, mesurée par le rapport entre l'APT et l'AUBT. Si le temps de retard de l'unité et le temps de configuration réels sont élevés, l'UE sera faible.

$$UE = \frac{APT}{AUBT} \cdot 100\% \quad (14)$$

Les indicateurs de performance clés supplémentaires suivants caractérisent également l'efficacité.

- *Efficacité (E)*: Quelle est l'efficacité d'une machine pendant le temps de production, mesurée par le rapport entre le temps de cycle cible planifié (représenté par le temps d'exécution planifié par article (PRI)) et le temps de cycle réel (exprimé comme APT divisé par la quantité produite (PQ)).

$$E = \frac{PRI}{\frac{APT}{PQ}} \cdot 100\% = \frac{PRI \cdot PQ}{APT} \cdot 100\% \quad (15)$$

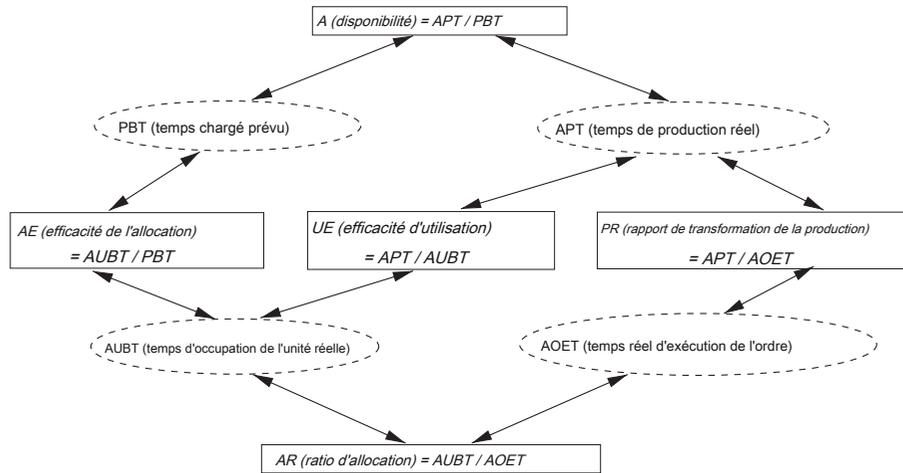


Figure 4. Démonstration graphique des définitions de KPI.

- **Rapport de configuration (SeR)**: La perte relative d'opportunité de valeur ajoutée pour une machine en raison de la configuration, mesurée par le rapport AUST à APT. La proportion complémentaire est l'APT.

$$\text{SeR} = \frac{\text{AUST}}{\text{AAPT}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Deuxièmement, en considérant l'ensemble de la ligne de production ou toutes les machines d'un système de production, les KPI suivants sont définis.

- **Ratio d'allocation (AR)**: le pourcentage du temps occupé réel de toutes les machines (*AUBT*) parmi les AOE d'un ordre de fabrication. La proportion complémentaire décrit le rapport entre la file d'attente réelle et le temps de transport.

$$\text{AR} = \frac{\text{AUBT}}{\text{AOET}} \cdot 100\% \quad (17)$$

- **Ratio du processus de production (PR)**: L'efficacité de la production en tenant compte du temps réel de configuration de l'unité, du temps de retard, du temps de transport et du temps d'attente. C'est le rapport entre l'APT sur toutes les unités de travail et tous les centres de travail impliqués dans un ordre de fabrication et le temps de production total d'un ordre de fabrication qui est l'AOET.

$$\text{PR} = \frac{\text{APT}}{\text{AOET}} \cdot 100\% \quad (18)$$

- **Débit (TR)**: L'indicateur de performance du processus en termes de quantité de bonne pièce produite d'une commande ( $GQ + RQ$  en supposant que les pièces retravaillées sont de bonne qualité) et le temps d'exécution réel (AOET), mesuré par le rapport de PQ et AOET. Étant donné que PQ est une mesure liée à la quantité, le débit appartient également à la catégorie de quantité.

$$\text{TR} = \frac{GQ + RQ}{\text{AOET}} \cdot 100\% \quad (19)$$

En utilisant les définitions ci-dessus, nous sommes en mesure de démontrer graphiquement les définitions des KPI. Un exemple est montré dans la figure 4, où les KPI sont présentés dans des cases pleines avec des polices italiques, et les éléments de support sont dans des ovals de tiret dans des polices régulières.

Cependant, les KPI ci-dessus ne fournissent que des informations de base sur les performances d'une machine ou d'une installation (d'un point de vue agrégé). Ils ne décrivent pas les interactions entre les machines et les systèmes de maintenance. Certaines mesures fondamentales essentielles à l'efficacité des opérations manquent encore. Par conséquent, les nouveaux KPI de base suivants sont présentés ci-dessous:

- **Taux de blocage (BL)**: La partie du temps d'inactivité d'un équipement en raison d'événements où les pièces ne peuvent pas aller en aval, ce qui indique l'influence de l'interruption de production depuis l'aval.
- **Taux de famine (ST)**: La partie du temps d'inactivité d'un équipement en raison d'événements dont les pièces ne peuvent pas arriver d'amont, ce qui indique l'influence d'une interruption de production depuis l'amont.

- **Travail en cours (WIP)**: La moyenne du nombre total de travaux dans le système à un moment donné. Parfois, cela fait également référence à l'occupation du tampon lorsque les machines ne contiennent pas de pièces.

Pour calculer ces nouveaux KPI, les éléments de support doivent également être développés. Plus précisément, le temps de blocage et le temps de famine doivent être surveillés.

- **Temps de blocage (BLT)**: Le temps d'inactivité d'un équipement lors d'événements où les pièces ne peuvent pas aller en aval.
- **Temps de famine (STT)**: temps d'inactivité d'un équipement lors d'événements où les pièces ne peuvent pas arriver en amont.
- **Capacité tampon (B)**: La capacité du tampon, c'est-à-dire le nombre maximal de parties qu'un tampon peut accueillir.

Ensuite, les rapports de blocage et de famine peuvent être calculés à l'aide de ces éléments.

$$ADET = BLT + STT, \quad (20)$$

$$BL = \frac{BLT}{PBT} \cdot 100\%, \quad (21)$$

$$ST = \frac{STT}{PBT} \cdot 100\%. \quad (22)$$

### 3.2.2 KPI de qualité

Certains indicateurs clés de performance importants liés à la qualité sont définis comme suit.

- **Ratio de rebut réel / planifié (SQR)**: La relation entre le SQ réel et le PSQ, indiquant la quantité de ferraille produite par rapport à la valeur attendue.

$$SQR = \frac{SQ}{PSQ} \cdot 100\%. \quad (23)$$

De toute évidence, une valeur inférieure de SQR est préférable car elle implique moins de rebut que prévu. Cependant, une valeur SQR basse constante peut indiquer que la PSQ est trop élevée, ce qui peut entraîner une allocation de ressources inefficace.

- **Taux de rebut (SR)**: la relation entre le SQ et le PQ.

$$SR = \frac{SQ}{PQ} \cdot 100\%. \quad (24)$$

- **Taux de reprise (RR)**: Le pourcentage de RQ parmi PQ.

$$RR = \frac{RQ}{PQ} \cdot 100\%. \quad (25)$$

- **Taux de chute (FR)**: La quantité décroissante pour une opération de production spécifique par rapport à la quantité produite lors de la première opération, mesurée par le rapport entre la quantité décroissante (calculée comme quantité produite sur la première séquence d'ordre de fabrication moins le QG sur la production actuelle ordre) et la quantité produite lors de la première opération.

$$FR = 1 - \frac{PQF}{PQ} \cdot 100\%. \quad (26)$$

De plus, dans la pratique, la qualité du premier temps et le taux d'achat de qualité sont généralement utilisés pour caractériser la performance qualité d'un processus de fabrication (voir Li et coll. 2008). Ainsi, ces deux KPI sont présentés ci-dessous:

- **Première qualité (FTQ)**: Le pourcentage de pièces de bonne qualité passant par le processus de fabrication dans la première fois.

$$FTQ = \frac{GQ}{PQF} \cdot 100\%. \quad (27)$$

- **Taux d'achat de qualité (QBR)**: le pourcentage global de pièces de bonne qualité après retouches.

$$QBR = \frac{GQ + RQ}{PQ} \cdot 100\%. \quad (28)$$

Notez que les pièces retravaillées sont incluses dans le numérateur puisqu'elles deviennent des pièces de bonne qualité après retouche. Un tel rapport est également appelé taux de qualité (QR). Cependant, le QR défini dans Norme internationale ISO 22400-2 (2014) n'inclut pas les pièces retravaillées.

Ces KPI peuvent être liés par les relations suivantes.

$$FR = 1 - QBR - SR = 1 - PQF \quad (29)$$

$$FTQ = GQ \frac{FR}{PQF} = \frac{GQ \cdot PQ \cdot (1 - FR)}{PQ} \quad (30)$$

### 3.2.3 KPI de maintenance

En faisant la moyenne de tous les temps de réparation et de temps de fonctionnement dans les éléments de support, nous obtenons les indicateurs clés de performance clés suivants: • Temps

*moyen jusqu'à l'échec (MTTF) ou Temps moyen entre les pannes (MTBF): le TTF ou TBF moyen sur une longue période*

- *Temps moyen de réparation (MTTR): TTR moyen sur une longue période.*
- *Temps de fonctionnement moyen entre les pannes (MOTBF): OTBF moyenne sur une longue période.*
- *Temps de retard moyen (MDET): l'ADET moyen sur une longue période.*
- *Temps moyen d'installation (MSET): la moyenne AUST sur une longue période. Ensuite, la*

performance moyenne suivra également les relations similaires:

$$TTR = FE \cdot MTTR, \quad (31)$$

$$TBF = FE \cdot MTBF, \quad (32)$$

$$MTBF = MOTBF + MDET + MSET. \quad (33)$$

De plus, le taux de maintenance est défini comme:

- *Ratio de maintenance corrective (CMR): ampleur des tâches correctives avec toutes les activités de maintenance effectuées dans une unité de travail, calculée comme le rapport entre le temps total de maintenance corrective (CMT) et la somme du CMT et du temps de maintenance préventive (PMT).*

$$CMR = \frac{CMT}{PMT + CMT} \cdot 100\%. \quad (34)$$

### 3.3 KPI complets

En utilisant les KPI de base, les KPI complets sont définis.

- *OEE: Le produit de la disponibilité, de l'efficacité et du rapport qualité d'une machine (c.-à-d. QBR). C'est un indicateur de l'efficacité des machines, des centres de travail et des zones avec plusieurs machines ou un centre de travail entier.*

$$OEE = A \cdot E \cdot QBR. \quad (35)$$

- *Efficacité nette de l'équipement (NEE): similaire à OEE, mais il inclut le temps de configuration en modifiant le KPI de disponibilité par le rapport AUPT et PBT.*

$$NEE = \frac{AUPT}{PBT} \cdot E \cdot QBR. \quad (36)$$

- *Débit de ligne (LTR): Le débit de l'ensemble de la ligne de production, qui dépend de toutes les opérations, tampons, leurs positions et interactions. Dans le cas de capacités tampons finies, le calcul du LTR est une procédure complexe (voir Li et Meerkov 2009 pour plus de détails).*

## 4. Relations entre les KPI

Les KPI sont dérivés d'éléments de mesure. Puisqu'un élément peut être utilisé dans les définitions de plusieurs KPI, il est impossible que les KPI soient indépendants les uns des autres. Il existe deux types de relations. L'un est la relation d'identité des KPI en fonction de leurs définitions. L'autre est la pertinence avec des éléments de soutien partagés qui peuvent être obtenus par comparaison par paires. De toute évidence, les indicateurs de performance clés de différentes catégories ont de nombreuses relations et leur examen est une tâche importante, qui implique des efforts continus substantiels. Dans cet article, à des fins d'illustration, nous présentons plusieurs exemples de telles relations. Davantage de travail doit être effectué dans les recherches futures.

#### 4.1 Relations inhérentes

##### 4.1.1 Exemples de relations entre les KPI de production

Étant donné que l'AE indique à quel point la capacité planifiée de l'unité de travail, y compris la configuration et le temps de retard, est déjà utilisée, et que l'efficacité d'utilisation correspond à la productivité des unités de travail compte tenu de la configuration et du temps de retard, le produit en sera la disponibilité, montrant l'utilisation de la capacité d'une unité de travail pour la production. En d'autres termes,

$$A = \frac{APT}{PBT} \cdot 100\% = \frac{AUBT}{PBT} \cdot \frac{APTE}{AUBT} = AE \cdot UE. \quad (37)$$

Une telle équation peut également être révélée dans la figure 4. Selon la loi de Little (Petits et graves 2008), nous avons la relation entre l'occupation du tampon et le débit

et le temps qu'une pièce reste dans le tampon, c'est-à-dire

$$WIP = TR \cdot AQT. \quad (38)$$

Considérez les indices OEE et NEE. Puisqu'ils sont comparables avec la seule différence sur le temps de configuration, le rapport de l'OEE et du NEE sera égal au rapport de l'APT et de l'AUPT, qui est également la proportion complémentaire du SeR.

$$\frac{OEE}{NEE} = \frac{APT}{AUPT} = 1 - SeR. \quad (39)$$

##### 4.1.2 Exemple de relations entre les indicateurs de performance clés de qualité

Pour le flux de fabrication, une fois qu'un produit est fabriqué, il est soit qualifié, soit incompetent. Si la pièce est défectueuse, elle doit être mise au rebut ou retravaillée. Ainsi, la relation de conservation tient:

$$SR + RR \cdot N + QBR = SQ + RQ(N+1) + \frac{GQ}{PQ} = 1. \quad (40)$$

##### 4.1.3 Exemple de relations entre les KPI de maintenance

La catégorie de maintenance saisit les durées moyennes de panne et de fonctionnement. Selon Li et Meerkov (2009) et la théorie du processus de renouvellement (Ross 2014), les KPI de maintenance, tels que MTTF, MTTR et leur ratio MTTF

la disponibilité ou l'efficacité d'une installation de fabrication, qui peut également être définie par le rapport de AUBT et de PBT. Par conséquent, nous obtenons

$$AE = \frac{AUBT}{PBT} \cdot 100\% = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \cdot 100\%. \quad (41)$$

#### 4.2 Relations par paires

La relation par paires peut être dérivée en vérifiant si l'élément de mesure apparaît sur le dividende ou le diviseur. Figure 5 résume ces relations. Les KPI sont affichés dans les lignes et les colonnes du tableau. Si deux KPI ont une relation directe via un élément de mesure, cet élément apparaîtra dans la cellule d'intersection de la ligne et de la colonne correspondantes. Le symbole + (ou -) en bas à gauche (respectivement en haut à droite) signifie que cet élément a une relation positive (respectivement négative) avec le KPI de cette ligne (respectivement, colonne). Certaines cellules ne contiennent qu'un seul symbole +, ce qui implique que les indicateurs de performance clés de la ligne et de la colonne correspondantes n'ont qu'une relation positive. Par conséquent, figure 5 indique clairement les relations par paires des indicateurs de performance clés, positifs ou négatifs, et leurs éléments intermédiaires.

#### 5. Dépendances entre les indicateurs de performance clés et leurs éléments de support

Étant donné que les KPI sont définis en fonction des éléments, le changement d'un élément peut entraîner une variation correspondante des KPI. Dans cette section, nous étudions l'impact d'un élément sur les KPI et présentons des exemples. Une telle enquête est effectuée à l'aide des formules présentées dans la section 3.

	AR	TR	AE	UE	OEE	NEE	A	E	QR	SeR	TE	PR
AR	*	AOET- / AOET-	AUBT+ / AUBT+	AUBT- / AUBT+								AOET- / AOET-
TR	AOET- / AOET-	*						PQ+ / PQ+	PQ- / PQ+			AOET- / AOET-
AE	AUBT+ / AUBT+		*	AUBT- / AUBT+	PBT- / PBT-	PBT- / PBT-	PBT- / PBT-					
UE	AUBT+ / AUBT-		AUBT- / AUBT+	*		APT- / APT+	APT- / APT+	APT- / APT+			APT+ / APT+	APT+ / APT+
OEE			PBT- / PBT-		*	E+ / E+	+	+	+			
NEE			PBT- / PBT-	APT+ / APT-	E+ / E+	*	PBT- / PBT-	+	+	AUPT- / AUPT+	APT+ / APT-	APT+ / APT-
A			PBT- / PBT-	APT+ / APT+	+	PBT- / PBT-	*	APT- / APT+			APT+ / APT-	APT+ / APT-
E		PQ+ / PQ+		APT+ / APT-	+	+	APT+ / APT-	*			APT+ / APT-	APT+ / APT-
QR		PQ- / PQ+			+	+			*			
SeR							AUPT+ / AUPT-			*		
TE				APT+ / APT+		APT- / APT+	APT+ / APT+	APT- / APT+			*	APT+ / APT+
PR	AOET- / AOET-	AOET- / AOET-		APT+ / APT+		APT- / APT+	APT+ / APT+	APT- / APT+			APT+ / APT+	*

Figure 5. Les relations par paires entre les KPI.

### 5.1 KPI de production et éléments de temps

Des exemples de dépendances entre les KPI de production et les éléments de temps de prise en charge sont présentés ci-dessous. Tout d'abord, considérez les éléments temporels du point de vue d'une machine ou d'une unité de travail.

- Lorsque AUST augmente, on obtient:
  - Les éléments temporels suivants augmenteront également: AUPT, AUBT, AOET et PBT.
  - Cependant puisque APT restera le même. En conséquence, nous avons:
    - \* Les KPI suivants sont également en augmentation: AE, AR, SeR et NEE.
    - \* Alors que les KPI suivants diminuent: A, TR, UE et OEE.
    - \* Ensuite, les autres KPI resteront les mêmes: E, PR et TE.
- Lorsque ADOT augmente, cela implique:
  - Les éléments temporels suivants augmenteront: AOET, AUBT et PBT
  - Il en résultera:
    - \* Augmentation des KPI suivants: AR et AE.
    - \* Diminution des autres KPI: A, PR, TE, TR et UE, ainsi que OEE et NEE.
- Lorsque APT augmente, alors:
  - Les éléments de temps suivants augmenteront: AOET, AUBT, AUPT et PBT
  - Cela conduira à:
    - \* Augmentation des KPI suivants: A, AR, AE, TE, UE et PR.
    - \* Diminution des autres KPI: E, SeR, TR, OEE et NEE.
- Lorsque AUBT (temps d'occupation de l'unité réelle) augmente, on obtient:
  - Les éléments temporels suivants augmenteront: AOET et PBT.
  - Cela entraînera également des changements dans les KPI suivants.
    - \* Ces KPI vont augmenter: AE et AR.
    - \* Bien que ces KPI diminuent: A, PR, TR, UE, OEE et NEE.
- Lorsque AUPT augmente, cela implique:

- Augmente les éléments de temps suivants: AUBT, AOET et PBT.
- En conséquence, les indicateurs de performance clés changeront.

\* Les KPI suivants augmenteront: AR, AR et NEE.

\* Alors que les autres KPI diminueront: A, PR, SeR, TR, UE et OEE.

- Lorsque le PBT augmente, ces KPI diminuent: A, AE, OEE et NEE. D'un ordre de fabrication ou

d'un point de vue opérateur, on obtient:

- Lorsque l'AOET augmente, les KPI suivants augmenteront également: AE et TR.
- Lorsque l'APAT augmente, alors WE diminue.
- Lorsque APWT augmente, alors WE augmente également.

### 5.2 KPI de qualité et éléments de quantité

Des exemples de l'impact des éléments de quantité sur les KPI de qualité sont donnés ci-dessous.

- Lorsque SQ augmente, cela entraînera une augmentation de SQR et SR. De plus, il faudrait plus de temps de production pour répondre à la demande de commande. Ainsi, l'APT augmentera et tous les KPI relatifs changeront selon la section 5.1 .
- Lorsque le PSQ augmente, le SQR diminue.
- Lorsque GQ augmente, cela fera augmenter QR. En conséquence, le FR diminuera, mais l'OEE et le NEE augmenteront.
- Lorsque le RQ augmente, le RR augmente. De plus, il faudrait plus de temps de production pour répondre à la demande de commande. Ainsi, l'APT augmentera et tous les KPI relatifs changeront selon la section 5.1 .

### 5.3 KPI de maintenance et éléments de temps

Enfin, pour les éléments de maintenance, lorsque le TTF augmente ou que le TTR diminue pendant un intervalle de temps donné, cela entraînera une augmentation de l'OEE et du NEE.

### 5.4 Dépendances par paires

Les relations de dépendance ci-dessus peuvent être résumées dans un tableau, illustré dans la figure 6 . Dans un tel tableau, les lignes sont des éléments de mesure et les colonnes sont des KPI. Si un KPI est corrélé positivement (ou négativement) avec un élément, l'intersection de la ligne et de la colonne correspondantes sera marquée d'un symbole + (ou -). Notez que pour les relations directes, les symboles + \* ou - \* sont utilisés, tandis que pour les relations non directes, + ou - sont marqués.

## 6. Étude de cas

Pour illustrer le processus CI d'utilisation des KPI, une étude de cas sur une ligne de fabrication de portes dans une usine d'assemblage automobile est réalisée. Comme le montre la figure 7 , la ligne de porte comprend une série de 10 opérations (représentées sous forme de cercles), y compris le chargement de la partie intérieure, le soudage par points et le mariage intérieur, la crémaillère, le soudage PED (Directive sur les équipements sous pression), le mariage intérieur et extérieur, l'ourlet extérieur, la crémaillère, l'ourlet intérieur, poinçonnage et s'accrocher. Il y a 9 tampons (représentés par des rectangles) avec une capacité fi nie entre chaque paire de machines consécutives.

La ligne est synchronisée avec un temps de cycle de 39 secondes (AUPT pour une partie). Mais les machines ne sont pas fiables, sujettes à des pannes aléatoires. Ainsi, il n'y a pas de temps d'installation, mais avec un temps de panne (ou de réparation) et un temps d'inactivité (blocage ou famine). Indiquez le temps d'arrêt moyen (c'est-à-dire le temps moyen de réparation - MTTR) de la machine  $i$ ,  $i = 1, \dots, 10$ , comme  $T_{\text{aire } w n, j_0}$ , et le temps de fonctionnement moyen (c'est-à-dire le temps moyen entre les pannes - MTBF) comme  $T_{\text{vers le haut, } l}$ . Ces données KPI sont évaluées en continu grâce à la surveillance et à la collecte des éléments de temps TTR et TBF et FE sur la ligne de production. Table 1 fournit ces KPI ainsi que la capacité tampon  $B_{j_0}$ ,

$i = 1, \dots, 9$ .

Le but de cette étude est d'améliorer continuellement la productivité de la ligne de fabrication. Pour y parvenir, une approche d'amélioration basée sur les goulots d'étranglement est utilisée. En d'autres termes, en identifiant et en atténuant à plusieurs reprises l'ef fi cacité de la machine goulot d'étranglement (par exemple A) et l'OEE, le LTR peut être amélioré.

L'analyse des goulots d'étranglement est considérée comme le moyen le plus efficace d'améliorer les performances du système. La machine à goulot d'étranglement est celle dont l'amélioration conduira à la plus grande amélioration de toute la ligne, c'est-à-dire qu'elle entrave les performances de la ligne de la manière la plus forte. Comme introduit dans Li et Meerkov ( 2009 ), en mesurant et en comparant les rapports de blocage  $BL_{j_0}$  et la famine  $ST_{j_0+1}$

	WE	AR	TR	AE	UE	OEE	NEE	A	E	QR	SeR	TE	PR	SQR	SR	RR	FR	MOTBF	MTTF	MTTR	CMR		
PBT				-*		-*	-*	-*															
PRI						+	+		+														
APWT	+																						
AUPT		+	-	+	-	-	+	-			-*		-										
AUBT		+	-	+	-*	-	-	-					-										
AOET		-*	-*										-*										
APAT	-*																						
APT		+	-	+	+	-	-	+	-*		-	+	+										
ADET		+	-	+	-	-	-	-				-*	-										
AUST		+	-	+	-	-	+	-			+		-										
SQ						-	-			-				+	+								
PSQ														-*									
GQ						+	+			+					-	-	-*						
RQ						-	-			-					-	+							
PQ			+						+														
TTF																					+		
OTBF																						+	
TTR																						+	
FE																						-*	
CMT																							+
PMT																							-*

Figure 6. Les dépendances par paires des KPI sur les éléments de mesure.

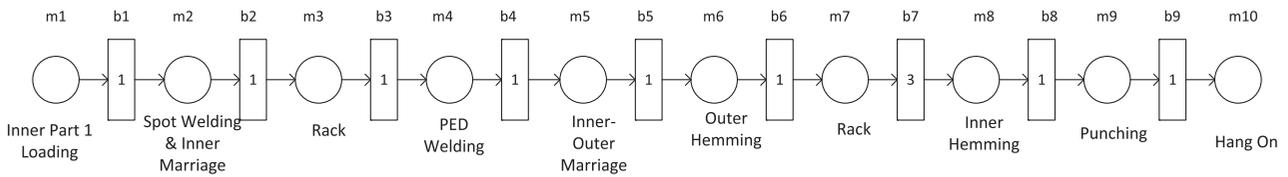


Figure 7. Disposition de la ligne de porte.

Tableau 1. KPI machine et tampon.

$m_i$	$T_{up, j_e}$ (min)	$T_{faire w n, j_e}$ (min)	$B_i$
1	155,917	2,733	1
2	74,883	4,8	1
3	17,567	1,683	1
4	268,067	4,042	1
5	492,3	41,23	1
6	836,583	27,15	1
7	628,742	4,242	3
8	249,05	1,7	1
9	479,05	17,133	1
dix	789,783	14,383	-

de machines consécutives  $j_e$  et  $j_e + 1$ ,  $i = 1, \dots, 9$ , une règle d'attribution de flèche peut être appliquée. Spécifiquement, les flèches sont attribuées de la machine amont à l'aval si  $BL_{j_e} > ST_{j_e + 1}$ , sinon, la direction doit être inversée. Ensuite, la machine qui n'a pas de flèches émanant est la machine à goulot d'étranglement. Une telle approche a été utilisée dans de nombreux fabricants

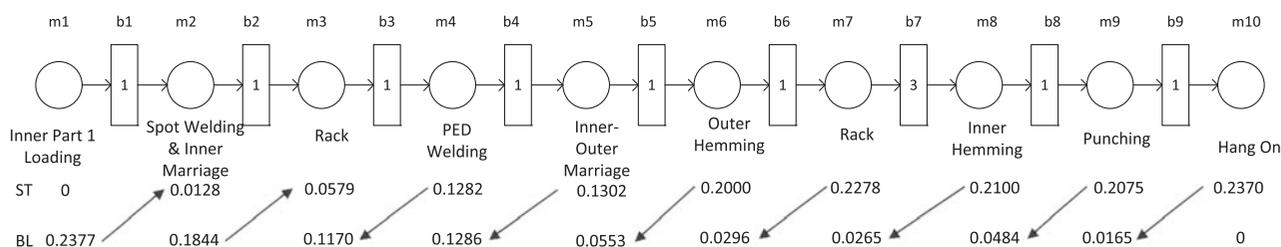
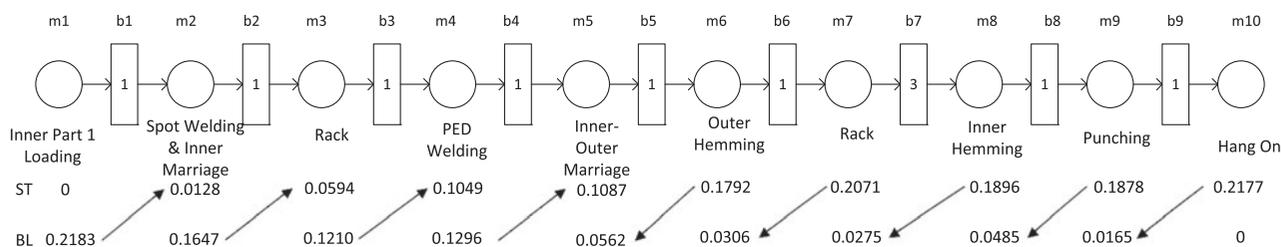


Figure 8. Identification des goulots d'étranglement de la ligne de porte.

Figure 9. Identification des goulots d'étranglement de la ligne de porte avec une réduction de 30% des temps d'arrêt  $m_3$ .

études de systèmes, voir des exemples et des études de cas introduits dans Li et Meerkov (2009), Kuo et coll. (1996), Chiang, Kuo et Meerkov (2001), Li (2004a), Li (2004b), Li (2013), Xie et Li (2012). L'illustration de l'approche d'analyse des goulots d'étranglement basée sur les flèches est présentée dans la figure 8. Comme on peut le voir, la machine  $m_3$  n'a pas de flèches émanant, ce qui est la machine à goulot d'étranglement. Le débit de la ligne est de 1,146 parties / min. Ainsi, comme mentionné dans la section 3, les ratios de blocage et de famine sont les KPI les plus critiques pour l'IC.

Afin d'améliorer le débit de la ligne de porte, une analyse hypothétique pourrait être effectuée pour atténuer l'impact des goulots d'étranglement. Spécifiquement, sur la base de l'étude de dépendance de KPI dans la section 5, le débit de la ligne est monotone décroissant en fonction des temps d'arrêt. Ainsi, réduire  $MT TR$  pourrait conduire à une augmentation de  $LT R$ . Ensuite, en utilisant la méthode d'analyse des performances pour la ligne exponentielle synchrone introduite dans Li et Meerkov (2009), en appliquant les données KPI dans le tableau 1 avec une réduction de 30% des temps d'arrêt de la machine à goulot d'étranglement  $m_3$ , nous obtenons que le débit du système augmente à 1,176 parties / min, ce qui représente une amélioration de 2,6%. Par conséquent, la machine à goulot d'étranglement est passée à  $m_5$  (voir la figure 9). Une amélioration supplémentaire peut être obtenue en répétant ce processus en se concentrant sur la machine  $m_5$ .

Pour représenter graphiquement une telle procédure CI, figure dix présente les étapes impliquées, depuis la surveillance des éléments de soutien, l'évaluation de base et complète des KPI, jusqu'à l'identification des goulots d'étranglement, l'amélioration des opérations et la réévaluation des KPI. Le processus revient à l'identification des goulots d'étranglement et répète les étapes.

## 7. Conclusions

Dans cet article, une structure hiérarchique est proposée pour catégoriser les indicateurs de performance clés et identifier et analyser leurs relations intrinsèques. Les indicateurs de performance clés et leurs éléments de mesure sont définis et classés en groupes à plusieurs niveaux. Les relations inhérentes et par paires entre les KPI sont explorées. Des exemples de dépendances entre les KPI et leurs éléments de mesure sont présentés. Une étude de cas sur une ligne de production de portes automobiles est présentée pour illustrer la procédure CI utilisant les KPI et leurs relations. Une telle structure fournit un outil utile aux ingénieurs de fabrication et aux gestionnaires pour mesurer, analyser et utiliser les indicateurs de performance clés pour le CI.

Dans les travaux futurs, les directions suivantes peuvent être suivies:

- Des indicateurs de performance clés plus utiles et leurs éléments de support doivent être introduits. En particulier, la plupart des KPI présentés ici ne concernent qu'une seule machine. L'étude des KPI pour un système de production en plusieurs étapes est importante. De même, les indicateurs de performance clés liés à l'énergie méritent également une étude approfondie.
- Une enquête plus approfondie sur les relations entre les indicateurs de performance clés et leurs dépendances avec les éléments de support doit se poursuivre. Le document actuel ne fournit qu'une partie de ces relations et des études plus approfondies sont nécessaires.

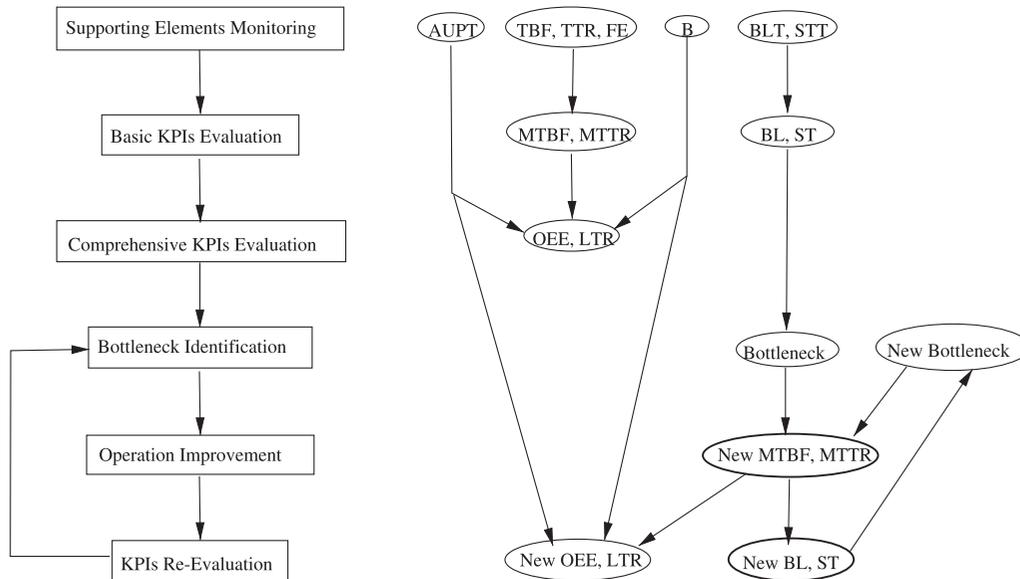


Figure 10. Illustration de la procédure CI.

- Appliquez les KPI développés sur le sol de l'usine. Utilisez les données collectées pour vérifier et valider les résultats obtenus à partir de l'étude et pour affiner les KPI et leurs relations. D'autres études de cas utilisant différents aspects des indicateurs de performance clés et des éléments de support devraient être réalisées.

#### Déclaration de divulgation

Aucun conflit d'intérêt potentiel n'a été signalé par les auteurs.

#### Le financement

Ce travail est soutenu en partie par le NIST [numéro de subvention 70NANB14H260]; NSF [numéro de concession CMMI-1063656].

#### Références

- Ahmad, MM et N. Dhafr. 2002. «Établissement et amélioration des mesures des performances de fabrication». *Robotique et informatique Fabrication intégrée* 18 (3): 171-176.
- Arinez, J., S. Biller, K. Lyons, S. Leong, G. Shao, BE Lee et J. Michaloski. 2010a. "Analyse comparative du système de production, de l'énergie des procédés, et Performance énergétique des installations à l'aide d'une approche systémique." Actes du 10e atelier sur les mesures de performance pour les systèmes intelligents, 88–96, Baltimore, MD.
- Arinez, J., S. Biller, SM Meerkov et L. Zhang. 2010b. "Amélioration de la qualité / quantité dans un atelier de peinture automobile: étude de cas." *Transactions IEEE sur la science et l'ingénierie de l'automatisation* 7 (4): 755–761.
- Biller, Li et J. Marin, S. Meerkov et SM Zhang. 2010. «Goulots d'étranglement dans les lignes de série Bernoulli avec retouche.» *Transactions IEEE sur la science et l'ingénierie de l'automatisation* 7 (2): 208-217. Buzacott, JA et JG Shantikumar. 1993. *Modèles stochastiques des systèmes de fabrication*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. Chiang, SY, CT Kuo et SM Meerkov. 1998. «Goulots d'étranglement dans les lignes de production de Markovian: ASystemsApproach.» *Transactions IEEE sur la robotique et l'automatisation* 14 (2): 352–359.
- Chiang, SY, CT Kuo et S.M. Meerkov. 2000. «DT-goulots d'étranglement dans les lignes de production en série: théorie et application.» *IEEE Transactions sur la robotique et l'automatisation* 16 (5): 567-580.
- Chiang, SY, CT Kuo et S.M. Meerkov. 2001. «C-Bottlenecks in Serial Production Lines: Identification and Application.» *Mathématique Problèmes d'ingénierie* 7 (6): 543-578.
- Cooper, R. 1988. «L'augmentation des systèmes de coûts basés sur l'activité: Partie I - Qu'est-ce qu'un système de coûts basé sur l'activité?». *Journal of Cost Management*. (Printemps): 45–54.

- Cooper, R. 1988. «La montée des systèmes de coûts basés sur l'activité: Partie II - Quand ai-je besoin d'un système de coûts basé sur l'activité?». *Journal des coûts La gestion*. (Fall): 41–48.
- Cooper, R. 1988. «L'essor des systèmes de coûts basés sur les activités: Partie III - De combien d'inducteurs de coûts avez-vous besoin et comment les sélectionnez-vous?». *Journal de gestion des coûts*. (Hiver): 34–46.
- Cooper, R. 1989. «La montée des systèmes de coûts basés sur les activités: Partie IV - À quoi ressemble un système de coûts basé sur les activités?». *Journal des coûts La gestion*. (Printemps): 34–46.
- Cross, KF et RL Lynch. 1988. «La façon SMART de définir et de maintenir le succès.» *Revue nationale de productivité* 8 (1): 23–33. Dallery, Y. et SB Gershwin. 1992. «Manufacturing FlowLine Systems: A Review of Models and Analytical Results». *Systèmes de file d'attente* 12 (1): 3–94.
- Dixon, JR, AJ Nanni et TE Vollman. 1990. Le nouveau défi de la performance: mesurer les opérations pour une compétition de classe mondiale, Dow Jones-Irwin, Homewood, IL.
- Eccles, RG 1991. «Manifeste de mesure du rendement». *revue de Harvard business* 69: 131-137. Fisher, J. 1992. «Utilisation de mesures de performance non financière». *Journal de gestion des coûts*. (Printemps): 31–38. Gershwin, SB 1994. *Ingénierie des systèmes de fabrication*. Englewood Cliffs, NJ: PTR Prentice Hall.
- Ghalayini, AM 1997. «Un système intégré de mesure dynamique des performances pour améliorer la compétitivité de la fabrication.» *Journal international d'économie de la production* 48 (3): 207–225.
- Gomes, CF 2004. «Une analyse documentaire des mesures et mesures du rendement de la fabrication dans un contexte organisationnel: A Cadre et orientation de la recherche future. » *Journal of Manufacturing Technology Management* 15 (6): 511-530. Hayes, RH, SC Wheelwright et KB Clark. 1988. *Fabrication dynamique: création de l'organisation apprenante*. New York, NY: Presse libre.
- Norme internationale ISO 22400–1. 2014. *Systèmes d'automatisation et intégration - Indicateurs clés de performance (KPI) pour la fabrication Gestion des opérations - Partie 1: Aperçu, concepts et terminologie*. Genève: Organisation internationale de normalisation (ISO). Norme internationale ISO 22400–2. 2014. *Systèmes d'automatisation et intégration - Indicateurs clés de performance (KPI) pour la fabrication Gestion des opérations - Partie 2: Définitions et descriptions*. Genève: Organisation internationale de normalisation (ISO). Jacobs, D. et SM Meerkov. 1995. «Une propriété de la théorie des systèmes des lignes de production en série: l'améliorabilité». *Journal international de Science des systèmes* 26 (4): 755–785.
- Ju, F., J. Li, G. Xiao et J. Arinez. 2013. «Quality Flow Model in Automotive Paint Shops.» *Journal international de recherche sur la production* 51 (21): 6470–6483.
- Ju, F., J. Li, G. Xiao, N. Huang et S. Biller. 2014. «Un modèle de flux de qualité dans les systèmes de fabrication de batteries pour véhicules électriques.» *Transactions IEEE sur la science et l'ingénierie de l'automatisation* 11 (1): 230–244. Kaplan, RS 1983. «Mesurer les performances de fabrication: un nouveau défi pour Manageria.» *Recherche comptable. La comptabilité La revue* 58 (4): 686–705.
- Kaplan, RS 1984. «La comptabilité d'hier sape la production.» *revue de Harvard business* 62: 95-101. Kaplan, RS et DP Norton. 1996. *Traduire la stratégie en action - Le tableau de bord équilibré*. Boston, MA: École de commerce de Harvard Presse.
- Kuo, CT, JT Lim et SM Meerkov. 1996. «Goulots d'étranglement dans les lignes de production en série: une approche de la théorie des systèmes.» *Mathématique Problèmes d'ingénierie* 2 (3): 233-276.
- Li, J. 2004a. «Analyse des performances des systèmes de production avec des boucles de reprise.» *Transactions IIE* 36 (8): 755–765.
- Li, J. 2004b. «Analyse du débit dans les ateliers de peinture automobile: étude de cas.» *IEEE Transactions sur les sciences de l'automatisation et l'ingénierie* 1 (1): 90–98.
- Li, J. 2013. «Amélioration continue à l'usine de fabrication de Toyota: application des méthodes d'ingénierie des systèmes de production.» *Journal international de recherche sur la production* 51 (23–24): 7235–7249.
- Li, J., DE Blumenfeld, N. Huang et JA Alden. 2009. «Analyse du débit des systèmes de production: avancées récentes et sujets futurs.» *Journal international de recherche sur la production* 47 (14): 3823–3851.
- Li, J., DE Blumenfeld et SP Marin. 2008. «Conception du système de production pour une qualité robuste.» *Transactions IIE* 40 (3): 162-176.
- Li, J. et SM Meerkov. 2000. «Goulots d'étranglement en ce qui concerne les délais de livraison dans les lignes de production en série Pull.» *Mathématique Problèmes d'ingénierie* 5 (6): 479–498.
- Li, J. et SM Meerkov. 2009. *Ingénierie des systèmes de production*. New York, NY: Springer.
- Little, JDC et SC Graves. 2008. «La loi de Little. dans Building Intuition: Insights from Basic Operations Management Models et Principes, D. Chhajed et TJ Lowe Ed. » *Série internationale sur la recherche sur les opérations et la science de la gestion* 115: 81-100. Maskell, BH 1992. *Mesure de la performance pour une fabrication de classe mondiale: un modèle pour les entreprises américaines*. Cambridge, MA: Presse de productivité.
- Meerkov, SM et L. Zhang. 2010. «Inspection de la qualité des produits dans les lignes Bernoulli: analyse, goulots d'étranglement et conception.» *International Journal de recherche sur la production* 48 (16): 4745–4766.
- Meerkov, SM et L. Zhang. 2011. «Lignes de production Bernoulli avec coupleurs qualité-quantité: propriétés de monotonie et Goulots d'étranglement. » *Annales de la recherche opérationnelle* 182 (1): 119-131. Neely, A. 1995. «Conception du système de mesure du rendement.» *Journal international des opérations et de la gestion de la production* 15 (4): 80–116.
- Papadopoulos, HT, J. Browne et C. Heavey. 1993. *Théorie de la file d'attente dans l'analyse et la conception des systèmes de fabrication*. Londres, Royaume-Uni: Chapman et Hall.

- Papadopoulos, HT et C. Heavey. 1996. «Théorie de la file d'attente dans l'analyse et la conception des systèmes de fabrication: classification des modèles pour les lignes de production et de transfert. » *Journal européen de recherche opérationnelle* 92 (1): 1–27. Rakar, A., S. Zorzut et V. Jovan. 2004. «Évaluation des performances de production au moyen de KPI.» *Procédure du contrôle* 6–9. Rodriguez, RR 2009. «Relations quantitatives entre les indicateurs de performance clés pour soutenir les processus décisionnels».
- Ordinateurs dans l'industrie* 60 (2): 104–113. Ross, SM 2014. *Introduction aux modèles de probabilité*. 11e éd. Amsterdam, Pays-Bas: Academic Press. Sarkis, J. 1997. «An Empirical Analysis of Productivity and Complexity for Flexible Manufacturing Systems». *Journal international de*
- Économie de la production* 48 (1): 39–48.
- Suwigno, P. 2000. «Modèles quantitatifs pour le système de mesure du rendement». *Journal international d'économie de la production* 64 (1): 231–241.
- Tempelmeier, H. et H. Kuhn. 1993. *Systèmes de fabrication flexibles: aide à la décision pour la conception et l'exploitation*. NewYork, NY: John Wiley & Sons.
- Viswanadham, N., et Y. Narahari. 1992. *Modélisation des performances du système de fabrication automatisé*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Halle.
- Wang, J., J. Li, J. Arinez, S. Biller et N. Huang. 2010. «Séquencement des produits par rapport à la qualité dans les systèmes de fabrication flexibles avec les opérations par lots. » *Transactions IEEE sur la science et l'ingénierie de l'automatisation* 7 (4): 776–790.
- Wang, J., J. Li et N. Huang. 2012. «Indicateurs de l'amélioration de la qualité et de la séquence des goulots d'étranglement dans les systèmes de fabrication flexibles avec Batch Productions. » *Journal international de recherche sur la production* 50 (22): 6388–6402.
- Wang, J., J. Li, J. Arinez et S. Biller. 2013. «Transitions de goulots d'étranglement de qualité dans les systèmes de fabrication flexibles avec les productions par lots.» *Transactions IIE* 45 (2): 190–205.
- Xie, X. et J. Li. 2012. «Modélisation, analyse et amélioration continue des systèmes de production alimentaire: étude de cas lors d'un rasage de viande et ligne d'emballage. » *Journal of Food Engineering* 113 (2): 344–350. Zhou, M. Et K. Venkatesh. 1999. *Modélisation, simulation et contrôle de systèmes de fabrication flexibles: approche APetri Net*. Singapour: World Scientific Publishing Company.

Les droits d'auteur de International Journal of Production Research sont la propriété de Taylor & Francis Ltd et son contenu ne peut être copié ou envoyé par courrier électronique à plusieurs sites ou publié sur une liste de diffusion sans l'autorisation écrite expresse du détenteur des droits d'auteur. Cependant, les utilisateurs peuvent imprimer, télécharger ou envoyer des articles par courrier électronique pour un usage individuel.