



HAL
open science

Mise en place du MES : Le témoignage d'un fournisseur aéronautique

Vincent Clivillé, Lamia Berrah, Laurent Foulloy, Claude Chapel

► To cite this version:

Vincent Clivillé, Lamia Berrah, Laurent Foulloy, Claude Chapel. Mise en place du MES : Le témoignage d'un fournisseur aéronautique. La 13ème conférence CIGI-Qualita'2019, Jun 2019, Montréal, Canada. hal-03500790

HAL Id: hal-03500790

<https://hal.science/hal-03500790>

Submitted on 22 Dec 2021

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.

Mise en place du MES : Le témoignage d'un fournisseur aéronautique

VINCENT CLIVILLE¹, LAMIA BERRAH¹, LAURENT FOULLOY¹, CLAUDE CHAPEL²

¹ LISTIC POLYTECH ANNECY-CHAMBERY
BP 80439 - 74944 ANNECY LE VIEUX, CEDEX - FRANCE
vincent.cliville, lamia.berrah, laurent.foulloy@univ-smb.fr

² NTN SNR ROULEMENTS
1 RUE DES USINES, 74010 ANNECY
claud.chapel@ntn-snr.fr

Résumé - Cet article traite globalement du rôle du MES (*Manufacturing Execution System*) dans le traitement de l'information utile au pilotage des processus industriels. Un intérêt particulier est donné à la fonctionnalité de ce progiciel qui est liée à l'intégration des indicateurs opérationnels de performance dans le Système d'Information (SI) de l'entreprise. Cette intégration devient de plus en plus nécessaire dans le contexte actuel, où une accélération de l'innovation et des temps de réponse ainsi qu'une exigence accrue du client sont observées. L'information est désormais nombreuse, diversifiée et rendue accessible en temps réel, offrant ainsi de nouvelles opportunités de pilotage. Après la présentation de quelques éléments de contexte autour de l'Industrie 4.0, une analyse historique du MES est établie, sur la base d'une revue de la littérature. Le témoignage de la société NTN-SNR Roulements, équipementier aéronautique, sur la mise en place du MES dans le cadre de son projet de digitalisation du *Manufacturing*, est décrit. Pour sa généralisation d'emploi, le TRS (Taux de Rendement Synthétique) est considéré le long de l'article à des fins d'illustration de l'intégration des indicateurs de performance. Enfin, un premier bilan de cette mise en place est dressé et des discussions et perspectives plus générales sont proposées.

Abstract - This paper globally deals with the MES (*Manufacturing Execution System*) role in the processing of industrial processes control information. A focus is made on the software functionality that is related to the integration of operational performance indicators into the Information System (IS) of the company. Such an integration becomes necessary in the current context, where innovation and response time are being accelerated and customer requirements are demanding. Information is thereby numerous, diversified and available in real time, leading thus to new control paradigm. A brief recall of the current context and its challenges is given first. Hence, an historical analysis of the MES, based on a literature review is proposed. Then, the implementation of the MES by NTN-SNR Roulements company, an aeronautics supplier, in its current Digital Manufacturing project is described. As it is well-known, the manufacturing OEE (Overall Equipment Effectiveness) performance indicator will be considered as an illustration of performance indicators integration. Some conclusions are consequently made concerning this industrial experience, before generally discussing and prospecting the operational performance expression evolution.

Mots clés – MES, Industrie 4.0, TRS, *Digital Manufacturing*, Équipementier aéronautique.

Keywords - MES, Industry 4.0, OEE, *Digital Manufacturing*, Aeronautics supplier.

1 INTRODUCTION

D'une manière générale, le pilotage des processus industriels peut être identifié à l'ensemble des actions qui permettent d'atteindre les objectifs fixés au système de production [Baker, 1998] [Foulloy et al., 2019]. Plus précisément, la norme ISO en propose la définition suivante. "Factory control is defined as the actuation of a plant to make products, using the present and past observed state of the plant and demand from the market" [ISO, 1986]. Il s'agit ainsi d'une part, de réaliser la transformation de produits conformément aux attentes des clients et, d'autre part, d'adapter le système de production aux évolutions de son environnement [Trentesaux et al., 2000]. Dans cette idée, conformément aux modèles d'entreprises de l'époque automatisée (Industrie 3.0), système de production et système de pilotage sont distingués, le

système de pilotage étant à son tour décomposé en, respectivement, un système de décision et un Système d'Information (SI) [Chen et al., 1997]. Le SI de l'entreprise contribue ainsi au pilotage en recueillant, stockant, analysant, transformant et restituant les données recueillies sur le terrain ; générant de ce fait les informations utiles au choix des actions de pilotage à mettre en œuvre [Reix et al., 2016].

Si cette vision reste valide dans son principe, elle est confrontée aujourd'hui à un contexte nouveau. Ce contexte est caractérisé par une profusion de l'information, conséquence de nouvelles approches de mise à disposition et de traitement des données (*Big Data*, *Cloud Computing*, *Data Sciences*, Intelligence Artificielle (IA)...) [Thoben et al., 2017] [Kumar, 2017], une innovation technologique accrue (*Internet of Things* IoT, réalité

augmentée...) [Liao et al., 2017] et des moyens de production innovants (*Cyber Physical Production Systems (CPPS)* [Oztemel and Gursev, 2018]).

Ces évolutions sont unanimement regroupées sous le vocable Usine du Futur - *Industry 4.0* [Kusiak, 2018]. Vue comme étant la 4^e révolution industrielle, l'Usine du Futur se définit par : "*the integration of complex physical machinery and devices with networked sensors and software, used to predict, control and plan for better business and societal outcomes*"¹ ou encore par : "*a new level of value chain organization and management across the lifecycle of products*" [Kagermann et al., 2013]. Elle est ainsi : "*a collective term for technologies and concepts of value chain organization*" [Hermann et al., 2016].

De nouvelles opportunités sont ainsi offertes aujourd'hui pour à la fois la production et le pilotage et, de façon plus générale, pour toutes les parties de l'entreprise. Certaines sont d'ores et déjà utilisées quand d'autres restent encore ressenties.

En particulier, initialement sous format papier jusqu'aux années 1970, le SI s'est progressivement informatisé grâce à la mise en place de bases de données et de logiciels fonctionnels tels que la GPAO, la GMAO... A la fin de la décennie 1980 sont apparus les progiciels intégrés tels que l'ERP - *Enterprise Resource Planning* pour la planification, puis dans les années 1990 le PLM - *Product Life cycle Management* pour les données relatives au produit et le MES - *Manufacturing Execution System* pour le suivi de production [Sadagopan, 2003] [Deuel, 1994] [Theodosiou and Sapidis, 2004]. L'utilisation de ces outils va se généraliser progressivement, l'ERP au début des années 2000 et le PLM au tournant des années 2010. Pour sa part le MES s'est relativement peu diffusé, de son apparition dans les années 1990 aux années 2010, le retour sur investissement pour ce progiciel étant difficile à justifier. Ce n'est que récemment que les entreprises ont massivement choisi de recourir au MES. L'accroissement des exigences des clients et les avancées permises par le 4.0 ont fait de ce retour au MES un acte quasi-intuitif. En effet, dans un contexte BtoB (*Business to Business*), les attentes des partenaires industriels en matière de traçabilité, de respect des délais de livraison, de maîtrise de la qualité produit et des processus ne peuvent désormais être satisfaites qu'avec l'assistance d'outils informatiques, en l'occurrence le MES, qui fournissent et traitent de données qui sont prélevées automatiquement sur les moyens de production. Ce sera le cas rencontré par la société NTN-SNR Roulements, fournisseur de roulements pour l'automobile et l'aéronautique. Dans ce sens, l'entreprise revisite actuellement son organisation industrielle, en mettant en œuvre son projet *Digital Manufacturing*, pour intégrer le 4.0 et faire ainsi face à une montée des exigences de ses donneurs d'ordre.

Le MES devient donc la solution d'une intégration, robuste et en temps réel, des informations utiles au pilotage opérationnel dans le SI global de l'entreprise. Parmi ces informations figurent celles retournées par les indicateurs de performance rattachés à la production, tels que le TRS (Taux de Rendement Synthétique), le *Lead time*, le Taux de qualité... Tout comme les autres informations « industrielles », le traitement des données constitutives des indicateurs, soit les données respectivement rattachées aux objectifs, aux mesures et aux expressions de

performance a été plus ou moins informatisé et centralisé. Ce mode de traitement, laissant une grande part à des saisies et traitements manuels, est souvent source de lenteur et d'erreur [Rößler and Abele, 2013]. Les indicateurs de performance ayant la spécificité d'incarner les boucles de décision, robustesse, traçabilité, temps réel et simplification de la structure de décision, conséquences de la mise en place du MES, prennent ainsi tout leur sens pour une réactivité instantanée [Karadgi, 2014] [Jung et al., 2015].

Cette étude traite de la mise en place du MES dans le contexte actuel (4.0), en vue d'une analyse des retombées de cette mise en place pour le traitement des indicateurs de performance. Dans ce sens, la section 2 de cet article est consacrée à la présentation du MES, de ses évolutions 4.0 ainsi que de son retour dans la pratique des entreprises. Un focus sur les fonctionnalités liées à l'intégration des indicateurs de performance est proposé. Le TRS étant retenu pour illustrer cette intégration, les notions essentielles relatives à cet indicateur sont brièvement rappelées en section 3. La mise en place du MES chez l'équipementier NTN-SNR Roulements est décrit en section 4. Cette mise en place donnera lieu à un bilan sur cette expérience et une discussion sur la pratique. L'évocation de quelques perspectives sur le traitement des informations liées aux indicateurs de performance et sur l'expression de la performance dans le contexte 4.0, de manière plus générale, conclura cette réflexion.

2 LE MES - MANUFACTURING EXECUTION SYSTEM

2.1 Généralités

Le terme MES pour *Manufacturing Execution System* est proposé par l'*American Institute of Advanced Manufacturing Research* à la fin des années 1980 [Kletti, 2007]. Le MES est défini comme étant : « *un système de contrôle de gestion et de suivi des travaux en cours dans l'atelier. Un M.E.S conserve la trace de toutes les informations de fabrication en temps réel, permet de recevoir des données en flux direct à partir des systèmes de contrôle/commande, de supervision machine et des opérateurs* »². Le but du MES est de renseigner directement le SI à partir des équipements et de renvoyer au(x) bon(s) endroit(s) et au(x) bon moment(s) l'information pour le pilotage. Pour ce faire, son rôle est de collecter les données de production, de les stocker, de les analyser par des techniques mathématiques appropriées (principalement statistiques) et de les synthétiser pour les diffuser ensuite aux niveaux décisionnels concernés [D'Antonio et al., 2017]. Les données traitées par le MES sont rassemblées dans une base de données unique. Le MES vient ainsi se substituer aux multiples applications logicielles dédiées et renforcer la fiabilité et la robustesse des données [Saenz de Ugarte et al., 2009].

D'abord déployé dans des industries axées sur la chimie et la pharmacie, ce progiciel s'est progressivement diffusé dans les grandes industries avant que son intérêt pour les PME n'apparaisse dans les années 2000 [Meyer et al., 2009]. Initialement centré sur la production [MESA, 1997], le MES s'est progressivement ouvert aux autres fonctions de l'entreprise comme le Service-Client, le SCM - management de la chaîne logistique, les Transports et les Entrepôts et d'une façon générale

¹ https://www.iiconsortium.org/docs/IIC_FACT_SHEET.pdf

² http://assises.club-mes.com/MES_manufacturing_execution_system.asp

à toute la chaîne de valeur. Le MES devient alors collaboratif [Wang et al., 2014] [D'Antonio et al., 2017].

Plus précisément, et en revenant à l'activité de production, le MES s'inscrit dans l'architecture de pilotage décrite par la pyramide CIM-Computer Integrated Manufacturing (figure 1) [Scheer, 1991]. Il permet l'échange d'informations entre le niveau organisationnel, communément supporté par un ERP, et les systèmes de contrôle de l'atelier SCADA-Supervisory Control And Data Acquisition, généralement composés de plusieurs applications logicielles, différentes et personnalisées [Boyer, 2009]. Il couvre le niveau 3 du modèle quand l'ERP couvre les niveaux 4 et 5 et SCADA couvre les niveaux 1 et 2 [Waldner, 1992].

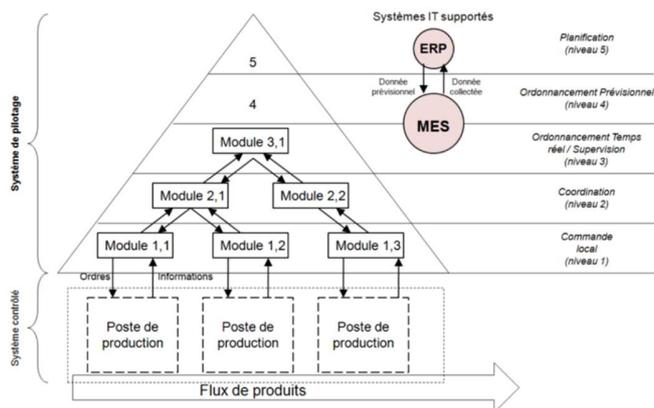


Figure 1. La pyramide CIM [Tran, 2018]

En résumé, le MES fonctionne et s'intègre de ce fait dans le SI en échangeant : des données sur les ressources de production avec SCADA, des données techniques avec le PLM et des données de flux avec l'ERP comme le montre la partie haute de la figure 2. L'interopérabilité nécessaire entre tous ces progiciels requiert généralement l'adoption, dans la pyramide, du langage commun UML - Unified Modeling Language [Moones 2015].

Le suivi de la production et l'analyse qui en est faite permet alors aux décideurs de lancer les actions d'amélioration pour augmenter la productivité, réduire le *Lead time* et d'une façon générale améliorer la performance du système de production³. Plus précisément, les trois objectifs du MES sont [Niel, 2007] :

- « le respect de la qualité de la production, d'un taux de productivité, en garantissant la sécurité des opérateurs et de l'environnement ;
- la conduite optimale, c'est-à-dire la recherche d'un dimensionnement ajusté des moyens de production mis en œuvre ;
- le retour d'expérience sur l'évolution des concepts des fonctions de contrôle/commande ».

Le MES offre 8 fonctionnalités [ISA95, 2014] [IEC62264, 2013] [Tran, 2018] (figure 2). C'est à partir de ces fonctionnalités que l'Ordonnancement, la Qualité, la Maintenance, l'Amélioration Continue... analysent les données et décident, chaque fonction pour ce qui la concerne, des actions à mener (modifier

³ Dans ce sens, Y. LARDANCHET directeur des ventes chez Siemens Software témoigne en 2018 : « Le MES, véritable outil de rationalisation et de standardisation des processus, de collecte de données fiables et de mesure de performances, constitue un levier pertinent aux besoins d'amélioration continue et s'impose comme le choix stratégique

l'ordonnancement, corriger une dérive dimensionnelle, intervenir de façon préventive, diminuer une taille de lot...).

Aux solutions sur mesure développées pour les premiers MES, se sont substituées cette dernière décennie des solutions génériques paramétrables. Mais tout comme les systèmes de GPAO ou d'ERP, le premier prérequis au déploiement du MES est la caractérisation du fonctionnement du système de production. Et de manière plus générale, la mise en place du MES est à la fois un projet informatique et organisationnel, qui dépend donc non seulement des outils logiciels pratiqués par l'entreprise mais aussi de son modèle organisationnel (classique, libéré, agile...) [Aubry, 2018].

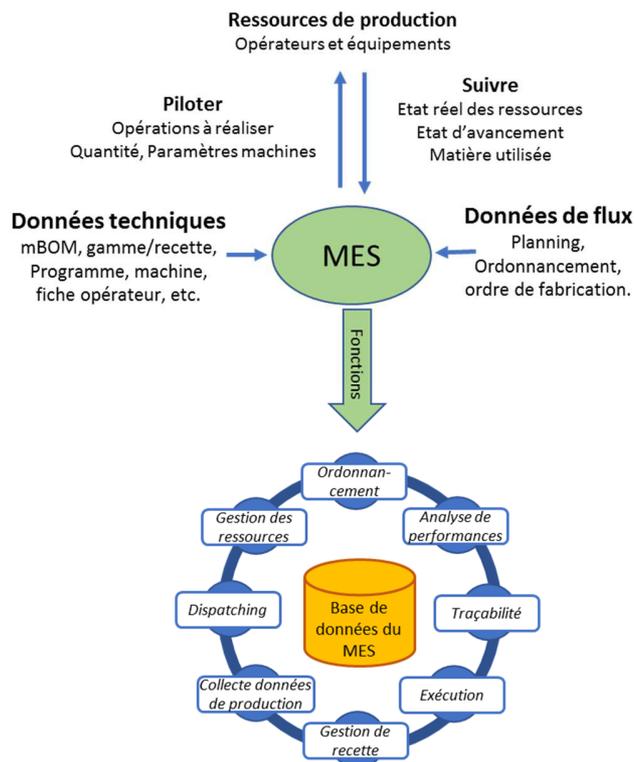


Figure 2. Environnement et fonctionnalités d'un MES selon l'IEC 62264

2.2 Le MES et le 4.0

Dans le 4.0, le système de production de l'entreprise est un CPPS qui s'inscrit dans l'Industrial IoT [Block 2018], avec un volume croissant d'informations à gérer, le fameux *Big Data*. Dans ce contexte de digitalisation générale de l'entreprise, tous les niveaux du pilotage sont concernés, au vu de l'exigence de cohérence entre les données échangées et les traitements effectuées (cf. figure 1). L'arrivée du 4.0 au niveau opérationnel se caractérise par la généralisation des objets connectés et des puces RFID qui permettent de connaître en temps réel l'état des équipements et la circulation des flux de produits [Gjeldum et al., 2018]. C'est dans ce cadre que le MES a opéré son retour depuis une dizaine

approprié pour une amélioration pérenne des processus de production ». <http://assises.club-mes.com/conferences/l-apport-du-mes-manufacturing-execution-system-dans-la-demarche-d-amelioration-continue-484639#.XFL4R2NCdEY>

d'années afin de fournir un socle commun aux remontées d'information opérées par SCADA et permettre un pilotage cohérent avec la planification de l'ERP [Kletti, 2007]. Dans un premier temps, la mise en place de ce MES s'est traduite par l'achat d'un progiciel dédié auprès d'un éditeur. Ceci a eu pour conséquence l'augmentation des capacités de stockage et de traitement de données de production. Cette solution est encore largement majoritaire, mais des alternatives voient le jour avec un hébergement des données dans des *Data Warehouses* d'une part et des traitements offerts par les *webservices* d'autre part, ce qui dans le vocabulaire 4.0 est rassemblé sous le vocable de *Cloud Computing* [Paritala et al., 2017] [Urbina Coronado et al., 2018]. Ces solutions ouvertes n'ont pas de limitation en matière de volume de données hébergées et offrent une souplesse dans le traitement d'information, ce qui permet des configurations plus fines du MES (figure 3). Un *Virtual MES* hébergé sur le *Cloud* va même jusqu'à être envisagé [Morariu et al., 2015] ; de même pour un MES décentralisé autonomisé pour chaque entité du système de production [Almada-Lobo, 2015]. Cependant les problèmes de Cyber sécurité, de coût de l'information stockée et d'architecture de telles solutions freinent la progression de ces solutions [Liao et al., 2017].

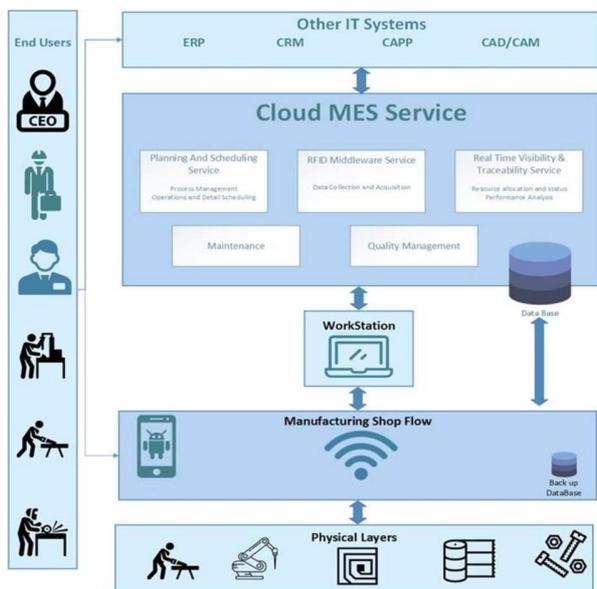


Figure 3. Le MES du 4.0 selon [Menezes et al., 2018]

2.3 L'intégration des indicateurs de performance

Une des fonctionnalités du MES est l'analyse de la performance (cf. figure 2). Cette analyse consiste en : *“The collection of activities that analyse and report performance information to business systems”* [IEC62264, 2013]. Avec le MES, l'entreprise dispose de « *moyens de capture, de transport, d'agrégation et de stockage ... déjà présents et localisés dans l'entreprise. La clé du succès consiste donc à identifier et à isoler les bonnes données, à les associer, à les travailler pour obtenir des indicateurs agrégés utiles à l'amélioration de la prise de décision et donc de la*

performance » [Tran 2018]. Le MES vient ainsi capturer et traiter les mesures, voire les comparer aux objectifs dans certains cas. De manière plus théorique, les traitements proposés par le MES et qui sont relatifs à l'analyse de la performance peuvent être considérés comme l'étape d'opérationnalisation de l'indicateur de performance, quand il est défini par le triplet (objectif, mesure, variable) [Fortuin, 1988] [Bitton, 1990] [Berrah et al., 2000]. Les premiers MES qui voient le jour se centrent sur des variables relatives aux volumes de production et au respect des délais de production. Le MES, qui n'était pas initialement conçu pour intégrer les indicateurs de performance, va connaître un nouvel essor et développer sa nouvelle fonctionnalité d'analyse de performance (cf. figure 2) et en particulier la collecte des mesures, le calcul, l'analyse et l'affichage d'indicateurs de performance [Ante et al., 2018], dans la mouvance des préceptes du management visuel [Bititci et al., 2016] [Zhou et al., 2018]. Les indicateurs de performance traités aujourd'hui par le MES couvrent l'ensemble des variables rattachées à la performance des processus de production. Parmi eux, nous pouvons citer le TRS, le Taux de qualité, le *Lead time*, le Taux de charge, le Taux de respect du programme de production, le Rendement matière, la Consommation d'énergie. Le TRS mérite d'être particulièrement distingué, étant considéré dans de nombreux MES, comme l'indicateur phare du système de pilotage au point que certains éditeurs communiquent autour de leur MES au moyen de ce seul indicateur⁴. Mais si le TRS se pose en incontournable de la performance industrielle, qu'en est-il de sa gestion dans le pilotage d'une entreprise intégrée, flexible, automatisée... une entreprise 4.0 [Kagermann et al., 2013] ? Et en quoi le MES peut-il en faciliter cette gestion ?

3 QUELQUES ELEMENTS SUR LE TRS

Indicateur de productivité, le TRS est défini dans les années 1980 au Japon [Muchiri and Pintelon, 2008] et est progressivement adopté par les entreprises du monde entier. Sa simplicité de calcul, sa capacité de diagnostic, les nombreuses possibilités d'analyse liées au caractère agrégatif des causes de non-productivité, vont contribuer à sa diffusion et à son appropriation tant par les opérateurs que par l'encadrement (*i.e.* le *middle management*) des ateliers et usines [AFNOR, 2002, Ahuja, 2009].

Le TRS mesure le *ratio* entre la production réelle et la production maximum théorique d'un équipement de production pour une période donnée. Au-delà de ce rendement, le TRS renseigne sur les causes d'arrêts et pertes de production [Relkar and Nandurkar, 2012]. Plusieurs typologies de ces arrêts et pertes de production ont été proposées ; notamment les *6 big losses*⁵ de la TPM - *Total Productive Maintenance* [Ahuja, 2009] ou les 12 causes élémentaires d'arrêt de la norme française [AFNOR, 2002]. Initialement, cet indicateur a été attaché au terrain, destiné à l'opérateur censé être le plus à même d'identifier et de comprendre les causes d'arrêt et d'y remédier [Barbier et al., 1993].

Dans les années 1990, le TRS des entreprises était en moyenne de l'ordre de 30 à 40 %, ce qui explique que son augmentation soit devenue un objectif central dans les démarches d'amélioration menées et que cette amélioration ait dépassé le cadre du pilotage

⁴ <https://www.lighthouseystems.com/mes-software/oeo-software>, <https://www.ordinal.fr/en/mes-mom-performance-analysis-indicators-oeo-kpi.htm>

⁵ 1-Equipment failure, 2-Setup and adjustment loss, 3-Idling and minor stoppage, 4-Reduced speed, 5-Defects in process, 6-Reduced yield.

opérationnel et le périmètre de la Production. Les Méthodes, la Qualité et la Maintenance en auront une vision globale et pourront déployer des méthodes d'analyse plus élaborées, transversales à tous les équipements sur des causes comme les changements de série, les pannes, les rebuts...

Le TRS aura souvent été associé à la TPM, une démarche qui engage toute l'entreprise dans la recherche et l'élimination des causes d'arrêt [Nakajima, 1988]. Dans ce sens, les valeurs mesurées au cours de la décennie 1990 s'approchaient plutôt d'une valeur de 60 %. Toutefois, la difficulté à synthétiser le TRS pour un système de production ne positionne pas, au niveau stratégique, cet indicateur comme un indicateur clé. Un indicateur comme le Volume de production lui est alors préféré.

Dans les années 1990 apparaît le *reporting* d'information sur le TRS avec les feuilles de saisies manuelles, ¼ d'heure par ¼ d'heure par les opérateurs. Le traitement de ces saisies se faisait par l'encadrement (les responsables des lignes de production), chaque jour ou chaque semaine [Ayel and Davier, 2003]. Cette pratique a rencontré quelques difficultés, les plus notables ont concerné la qualité de la saisie. En effet, certains arrêts n'étaient pas saisis, certaines causes mal identifiées et certaines durées approximatives. De plus, le temps passé à tous les niveaux de l'entreprise pour saisir les données, les analyser et les communiquer pouvait représenter jusqu'à 10% du temps de travail de l'encadrement. Enfin, la prise en compte du TRS se faisait de manière isolée dans l'entreprise, sans qu'il ne soit possible d'en calculer une valeur agrégée ou de repérer de possibles liens entre le TRS des différents équipements [Loughlin, 2003] [Killeen et al., 2001].

Constatant les limites d'un traitement local, les années 2000 voient les entreprises automatiser leur TRS, c'est-à-dire identifier et saisir les causes d'arrêt, calculer et communiquer le TRS grâce à des logiciels *ad hoc*. L'idée était qu'une identification plus fiable des causes d'arrêt allait permettre d'atteindre des valeurs de TRS de l'ordre de 70 à 80 %. Dans la logique SCADA, des IHM (Interfaces Homme-Machines) ont été alors développées, pour les machines à commande numérique en particulier. La disponibilité de nombreuses données (par équipement) a rendu l'automatisation du traitement du TRS possible et a donné satisfaction au niveau de chaque équipement [Hedman et al., 2016] [Singh et al., 2013]. Afin d'assurer la cohérence globale, la suite logique de cette automatisation a été de choisir des progiciels intégrés, en l'occurrence le MES. Cette intégration a pris le temps de mûrir sur les années 2000.

4 LA MISE EN PLACE DU MES CHEZ NTN-SNR

4.1 Contexte

La société NTN-SNR Roulements résulte du rachat par NTN Corporation de la société SNR-Roulements en 2007. NTN Corporation a réalisé un Chiffre d'Affaires de plus de 5,4 milliards d'euros en 2017 et est l'un des leaders mondiaux en tant que concepteur, développeur et fabricant de roulements. NTN-SNR Roulements est présent sur les marchés de l'automobile, du ferroviaire, des énergies renouvelables et de l'aéronautique. L'entreprise emploie environ 6 000 personnes principalement en

Europe et compte 13 sites de production, dont 7 en France, situés principalement en Haute-Savoie.

Le site d'Annecy-Argonay est spécialisé dans les roulements « techniques » destinés à l'aéronautique et à l'astronautique. Ce site bénéficie depuis 3 ans d'investissements importants pour digitaliser la production conformément aux principes du 4.0. Dans ce cadre, le projet « *Digital Manufacturing* » a été mis en œuvre. Il concerne le système de production des roulements de moteurs aéronautiques, et en particulier ceux du nouveau moteur LEAP destiné aux nouvelles générations de moyen-courriers tels que le a320neo et le futur Boeing 737. La production à la commande (typique du secteur aéronautique) concerne à terme 5000 à 8000 roulements annuellement. Début 2019, la production est de l'ordre de 50 roulements par semaine et l'atelier prévoit de produire en 2020 une soixantaine de roulements par semaine, soit une augmentation de 20%. Ces objectifs seront révisés à la hausse pour dépasser les 100 roulements par semaine vers les années 2025.

Les exigences techniques du moteur LEAP sont multiples. Elles portent principalement sur, la diminution de la consommation et donc de la masse et des dimensions, la résistance aux conditions extrêmes et la réduction des coûts de maintenance.

Ces exigences techniques accrues demandent une forte évolution du métier de producteur de roulements, même si la pièce reste la même dans le concept. Le nouveau métier apparu engendre de nouveaux process, avec un certain caractère d'incertitude. La planification *a priori* ne peut être désormais que partielle.



Figure 4. Un roulement du moteur LEAP

Les caractéristiques de ces nouveaux roulements (4 par moteur LEAP) ainsi que la forte montée en charge ont conduit l'entreprise à concevoir un nouvel atelier avec 2 lignes de production dont les opérations principales sont les traitements thermiques (cémentation, traitement sous vide et nitruration), la rectification, l'usinage complexe, une nouvelle technologie de rupture pour la production de rouleaux, la métrologie et les contrôles non destructifs. Chaque ligne de production est consacrée à 2 familles de roulements dont un exemple est donné figure 4. Elle est subdivisée en opérations, chaque opération étant dédiée à une technique de production donnée (les traitements thermiques, l'usinage complexe...). La transitive entre les postes est partiellement robotisée, l'intention est de travailler à terme en flux tendu⁶.

Par ailleurs, amortir les moyens - équipements, robots et moyens de contrôle est un enjeu important (l'investissement est de

⁶https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/press-article/cp_le_bourget_2017_fr.pdf

plusieurs dizaines de millions d'euros) du nouvel atelier « LEAP », dont le pilotage a requis, pour l'ensemble des considérations précédentes, le recours à un nouveau dispositif.

4.2 Le pilotage

Le système de pilotage de l'entreprise baptisé *SysProd* et défini dans les années 1980 est fortement inspiré du *Toyota Production System*. Les objectifs portent sur la Qualité, la Productivité et le respect des Délais. Des indicateurs tels que le Taux de non Qualité, le TRS et le *Lead time* sont déployés dans tout le système de production (Figure 5).

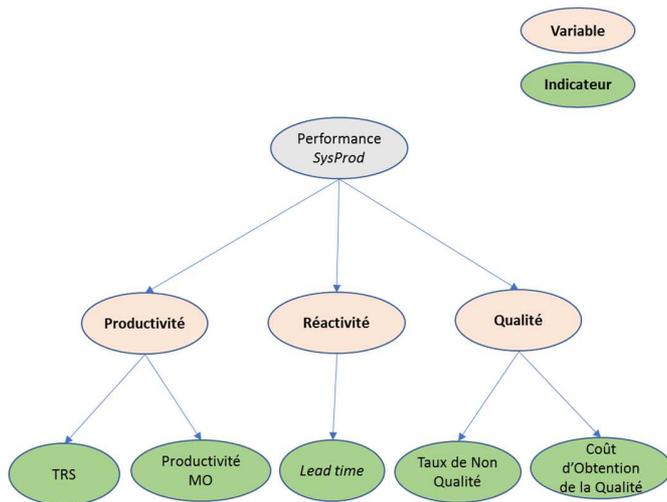


Figure 5. L'arbre d'objectifs dans *SysProd*

Au début des années 2000, 2 applications informatiques, développées en interne, configurent *SysProd* :

- *HistoProd*, dont l'objet est l'historisation de la production et qui donne accès à l'information aux opérateurs ainsi qu'à l'encadrement ;
- *Perform*, qui regroupe les données relatives à la production. Cette saisie reste manuelle et consiste en l'agrégation des données collectées par l'ensemble des opérateurs (de la production).

La pratique du TRS est généralisée sur tous les sites de l'entreprise. Aujourd'hui, chaque opération donne lieu à un suivi, à l'aide d'un formulaire précisant, s'il y a lieu, la cause d'arrêt ainsi que sa durée avec une précision de l'ordre du ¼ heure. Ces informations parviennent, grâce à *Perform*, à l'encadrement, qui les traite, les agrège pour chaque ligne de production et affiche en début de semaine la valeur obtenue. Des analyses complémentaires conformément à la norme sont réalisées et utilisées lors de l'animation hebdomadaire de la ligne.

Cohérente avec les besoins du pilotage des années 2000, la pratique de ces applications a progressivement souligné 2 points importants :

- l'intérêt de l'automatisation de la saisie de données à partir des automates en production pour éliminer la perte de temps ;
- la nécessité d'intégrer ces informations à des fins de traçabilité tant du produit que de la performance du processus de production.

En effet, le diagnostic posé par l'encadrement sur cette pratique peut se résumer comme suit :

- le caractère humain de l'identification des causes d'arrêt et de la saisie des données ne permettent pas de garantir la justesse des données obtenues ;
- le retour des indicateurs vers les opérateurs est très hiérarchique et ne va pas dans le sens de l'autonomie des opérateurs souhaitée par l'entreprise ;
- les analyses réalisées sont coûteuses en temps et dépendent de la disponibilité de l'encadrement.

L'idée a été alors de confier cette analyse de la performance pour le TRS et les autres indicateurs de performance à une solution intégrée, *i.e.* un MES. Ajoutons qu'au-delà d'assurer ses fonctionnalités (cf. figure 2), le MES permettra également de répondre aux attentes en matière de traçabilité, d'ordonnancement et de gestion de ressources (cf. figure 2). Cette mise en place a eu d'autant plus de sens dans le contexte du *Digital Manufacturing* dont les objectifs pour l'atelier sont :

- la productivité de MOD (Main-d'œuvre Directe) : « Une ligne, un opérateur » ;
- la réactivité de la ligne et le *Lead time* en visant une organisation des flux en *One piece flow* qui doit permettre de diviser par 4 le temps de traversée des pièces en production ;
- une exigence réglementaire dans le secteur de l'aéronautique, relative à la traçabilité tant des produits que du process ;
- la qualité des produits. Cet objectif se décompose lui-même en un sous-objectif relatif au Taux de rebut et en un sous-objectif lié au Coût d'obtention de la qualité (matérialisé par le 0 contrôle destructif).

Dans ce cadre et conformément à la pyramide CIM, l'entreprise a ainsi décidé, en 2015, d'investir dans un MES qui se substitue aux applications internes et s'intègre dans un SI global et cohérent, en complément des progiciels existants (ERP et PLM). L'atelier « LEAP » du site d'Annecy-Argonay devient dans ce sens un atelier pilote, avec un objectif de production tel que naturellement, le TRS a fait l'objet d'un suivi particulier.

Voyons maintenant comment le déploiement du MES et l'intégration du TRS ont été réalisées par l'entreprise.

4.3 Le déploiement du MES et l'intégration du TRS

La décision de déployer le MES sur le site pilote d'Annecy-Argonay pour l'atelier de production des roulements aéronautiques a donc été prise début 2015. La rédaction d'un cahier des charges et les consultations des prestataires ont été réalisées au cours de l'année 2015. Le *kick off* du projet a eu lieu en mai 2016. La première étape a consisté à établir un dossier de conception pour la fin de 2016. Le *framework* livré par le prestataire retenu a été paramétré durant l'année 2017, le projet a alors pris du retard pour cause, entre autres, de manque de maturité du *framework* et de la difficulté dans le travail conjoint entre l'entreprise et le prestataire de MES. Il a fallu par ailleurs repenser les autres piliers du SI et travailler leur interopérabilité. A titre d'exemple, le calcul des besoins réalisé par l'ERP a été automatiquement disponible pour le MES qui a pu alors mettre en œuvre immédiatement sa fonctionnalité d'Ordonnancement.

A l'issue de l'année 2017, le MES est paramétré pour recueillir directement les informations provenant des équipements connectés au sein du réseau informatique industriel. Les différentes pertes de production sont codifiées jusqu'au niveau des causes racines et permettent ainsi un traitement automatique qui fournit à tout instant le TRS avec le détail quantifié des causes de d'arrêt. Les analyses de ces données, pour l'heure, la

hiérarchisation des causes racines, sont réalisées de façon modulable (par équipement, par équipe, par période, par type de roulement).

L'année 2018 a vu le déploiement du MES en « pré-production ». Il s'est agi en fait de doubler le système existant (saisie manuelle avec les applications *HistoProd* et *Perform*) en utilisant le MES. Cette phase a permis de détecter les erreurs de paramétrages, de former les opérateurs et l'encadrement et de développer les interfaces adaptées à leur utilisation. La pré-production a été utilisée également pour revenir sur l'amélioration des points diagnostiqués et mesurer les implications organisationnelles de cette mise à disposition généralisée des informations de suivi. En effet, si le risque d'erreurs de saisie et les temps de traitement ont diminué et l'autonomie des opérateurs a augmenté, l'encadrement en revanche s'interroge sur son rôle avec ce nouveau dispositif. A titre illustratif, la figure 6 donne la fenêtre de suivi hebdomadaire de la production de l'opération de rectification.

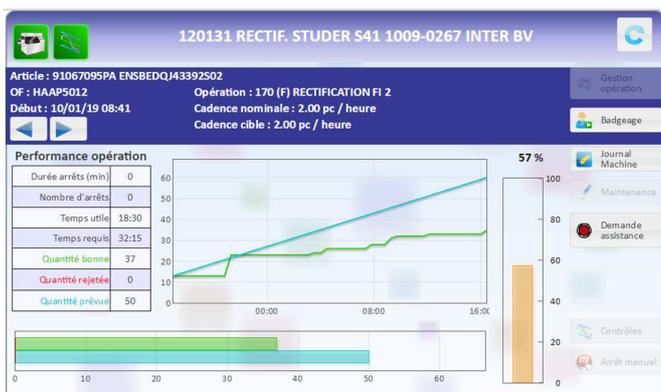


Figure 6. Le suivi de production de l'opération de rectification par le MES (source MES/NTN-SNR)

Concernant le TRS, il a été défini comme indicateur prioritaire et à ce titre sa valeur est directement accessible sur la fenêtre d'accueil du suivi de chaque opération. Nous pouvons observer qu'il prend la valeur de 57 % avec un temps utile de 18h30 pour un temps requis de 32h15.

Au-delà de la quantité produite, des informations complémentaires sur le TRS sont également disponibles en figure 7. Il s'agit de la ventilation des causes d'arrêt conformément à la norme AFNOR et de l'évolution du TRS sur les jours de la semaine. Nous pouvons observer que les changements de série occupent 71 % de temps requis, l'inactivité (attente de pièces) 5% et donc le temps de production est de 24 %. Ceci s'explique par la volonté de travailler avec des tailles de lot réduites combinées à un temps de changement de série assez long, ce qui est confirmé par les valeurs quasi-nulles du TRS pour 3 des 5 jours de la semaine. En outre, la production des 20 roulements du mardi correspond à un TRS de 58%. Le poste considéré est donc capacitaire ; les objectifs futurs de 100 roulements par semaine sont atteignables.

Le début d'année 2019 est marqué par l'abandon des anciennes applications et le pilotage effectif par le MES. Chaque opérateur est désormais autonome sur son poste et prend ses décisions de production (date de lancement, taille de lot) en fonction des objectifs de production de la semaine. De façon complémentaire, il analyse ses causes de non-performance pour y remédier, seul ou au sein de son équipe avec son encadrement. Concernant le TRS,

chaque arrêt ou type d'arrêt (micro-arrêts, ralentissement de cadence...) donne lieu à une analyse de l'évènement et à des actions locales collectives, qui peuvent concerner par exemple la synchronisation des postes ou le dimensionnement des en-cours. Un état des lieux pratique du MES est prévu à la fin du mois janvier 2019.

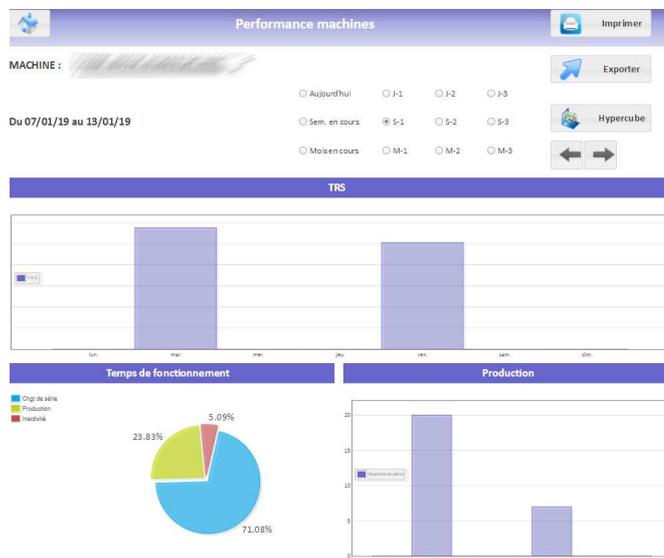


Figure 7 : Le détail du TRS pour une opération (source MES/NTN-SNR).

4.4 Un premier bilan et des perspectives pour l'entreprise

Rappelons que la mise en place du MES dans la société NTN-SNR Roulements s'inscrit dans le cadre du projet *Digital Manufacturing*, avec des attentes spécifiques relatives à l'atteinte des objectifs globaux de ce projet (cf. § 4.2). Bien que le MES ne soit réellement opérationnel que depuis très peu de temps, l'entreprise a pu malgré tout dresser un premier bilan. Si les objectifs associés à la mise en place du MES sont atteints, la quantification de leur impact sur les objectifs du projet est en cours d'analyse. Cette quantification reste délicate dans la mesure où l'atteinte des objectifs fait intervenir des aspects qui vont au-delà du pur traitement d'information offert par le MES. Toutefois, cette réflexion sur la quantification des impacts ouvre des perspectives quant à la gestion du projet *Digital Manufacturing* tel un projet d'amélioration de la performance. Une telle identification permettra le recours aux outils traditionnellement utilisés dans ce contexte (Roue de Deming, planification, système d'indicateurs de performance...).

Concernant le TRS, traçabilité, automatisation, réduction d'erreurs, autonomie d'opérateurs, gain de temps sont désormais acquis (cf. § 4.2). En conséquence :

- le TRS est disponible pour chaque équipement de l'atelier et concerne au total une trentaine d'opérateurs ;
- le TRS peut être calculé sur le poste en cours, sur des périodes paramétrables de la journée à l'année ; avec une extension envisagée à un calcul par ligne ;
- un affichage graphique est généré, visualisant l'évolution de l'indicateur sur une durée variable avec une périodicité elle-même variable.

Autant de nouveautés dans la mise à disposition de cet indicateur. Ces nouveautés peuvent être plus généralement résumées en deux

mots-clés : instantanéité et automatisation. Gestion des goulets, ordonnancement et réduction des temps de changement de série, supervision des lignes, diagnostic des postes peu productifs prennent actuellement une nouvelle dynamique sur le site.

Ce nouveau paradigme du pilotage homme-machine ouvre selon nous de nouvelles perspectives en matière de vision systémique des lignes et du TRS. Décomposition d'objectifs et définitions de systèmes d'indicateurs de performance mi-homme mi-machines feront sans doute évoluer les modèles proposés [Ducq et al., 2001] [Bititci et al., 2001] [Berrah and Foulloy, 2013] [Foulloy et al., 2019].

Par ailleurs, une exploitation plus générale de l'ensemble des indicateurs, actuellement en cours d'implémentation, est celle d'une correction automatique des dérives. L'idée est alors de procéder, avec une intervention humaine réduite, aux corrections des paramètres de production tels que les conditions de coupe, la température de four, la concentration en carbone d'une atmosphère contrôlée, les correcteurs d'outils coupants...

Enfin, un certain nombre d'enseignements de la mise en place du MES aura également été tiré. En particulier, d'un point de vue managérial, cette mise en place aurait requis un accompagnement des acteurs afin de permettre, d'une part une appropriation de l'outil et, d'autre part, une adaptation plus juste du *framework* aux spécificités du système de production. Une manière de conduire le changement revient à associer à de tels projets une gouvernance « métier ». De plus, au terme de ce projet, l'idée d'une élaboration d'un cahier des charges « complet » avant le lancement du projet semble moins pertinente au responsable du SI. Le choix d'une méthode agile inspirée de *Scrum*⁷ lui paraîtrait mieux adapté sachant la difficulté à établir le périmètre du projet et l'impossibilité de recueillir des informations fiables sur un produit et un process encore en phase de développement.

Concernant l'extension au secteur automobile, les compétences acquises tant par le service SI que par le site d'Annecy-Argonay ainsi que la prise en compte des observations précédentes permettront de mener le déploiement du MES dans un délai compris entre 12 et 18 mois, délai considérablement raccourci par rapport aux 3 années du projet actuel. Bien sûr, les spécificités de ce secteur telles que les gros volumes et les exigences de productivité conduiront à adapter le *framework* et en particulier à envisager des solutions *Big Data*, les volumes d'information étant multipliés par 1000 et davantage pour les données de l'automobile.

5 DISCUSSIONS CONCLUSIVES

Cet article aura traité de la mise en place du MES chez un équipementier aéronautique, amené, par les exigences de ses clients et de l'environnement, aux évolutions industrielles actuelles. Cette mise en place a en effet répondu aux besoins de globalité, d'accélération et de fiabilité exprimés par l'entreprise et a donc préparé le système de production à un fonctionnement 4.0. Aujourd'hui, l'entreprise continue dans ce sens, entend souscrire au « *Smart Manufacturing* » et continuer à se doter des moyens et techniques d'IA désormais accessibles pour les industriels [Tao et al., 2018] [Küfner et al., 2018].

Rendre les indicateurs disponibles à tout instant et ce, de manière automatique, représente un nouvel enjeu pour le pilotage.

Quelques perspectives de recherche peuvent être dégagées concernant en particulier la performance industrielle et son expression. Nous distinguerons les perspectives respectivement attachées à l'expression instantanée de la performance, à la dimension temporelle de cette performance et la prise en compte de l'aspect « système » de cette même performance.

Le modèle actuel pour formaliser l'expression de la performance instantanée repose sur la comparaison d'une mesure à un objectif par un traitement mathématique ou cognitif [Ducq et al., 2001] [Vernadat et al., 2013] [Berrah et al., 2018]. La question de la mesure et de son intervalle de temps d'acquisition était jusqu'ici peu posée sachant des mesures acquises *a posteriori* sur des durées de l'ordre de la journée ou plus. La révolution de l'acquisition temps réel, autorise désormais des intervalles de temps beaucoup plus courts, ce qui questionne les conditions à respecter pour que l'expression de performance ait un sens. Ainsi, le calcul d'un TRS à la minute n'a de sens que si l'opération de production ne dure pas plus que quelques secondes. Calculer un TRS chaque heure quand un changement de série dure une journée aura également peu de sens. Le modèle d'expression de la performance sera revisité afin de tenir compte de cette nouvelle possibilité d'acquisition des mesures qui renforce la dynamique quand l'intervalle d'acquisition se réduit. Cela conduit à considérer une succession de valeurs plutôt qu'une expression de performance moyenne établie sur une période plus longue [Snatkin et al., 2013]. Les modèles de régression utilisés pour exprimer tendances et prédictions pourront également être enrichis.

Au-delà d'un raffinement de ces modèles, d'autres possibilités d'analyse temporelles seront permises par le stockage des historiques d'expressions de performance. Les techniques de fouille de données, aujourd'hui plus accessibles avec le développement de nouveaux outils d'IA, sont une piste intéressante pour révéler des chroniques de performance. Dans le contexte de grands volumes de production tels que dans l'automobile, l'idée est d'observer les phénomènes de production afin d'identifier des séquences d'évènements types conduisant à des problèmes de production. L'identification puis la reconnaissance de telles séquences conduira à prédire les problèmes à venir, par exemple des pannes, non-qualités, dérèglages... et donc les anticiper.

Enfin, de nombreux travaux menés depuis plus de trente ans ont montré que les indicateurs de performance font « système » [Neely et al., 1995] [Bititci et al., 2001] [Clivillé et al., 2007]. L'organisation et le comportement de ces systèmes ont donné lieu à des modèles qualitatifs ou quantitatifs basés sur des analyses cognitives. Aujourd'hui, la masse des données collectées et stockées ouvre de nouvelles possibilités d'analyse relevant du *Data Analysis*, complémentaires aux analyses cognitives. Ainsi la connaissance du TRS d'un équipement sur une période étendue et la connaissance de la valeur des différentes informations collectées sur le système de production permettra de compléter l'analyse des causes racines de dysfonctionnement par des études multivariées. Pour répondre à la question : de quoi dépend le TRS ? D'une façon générale les possibles « interactions » entre indicateurs de performance peuvent être identifiées grâce à des outils d'IA appropriés et permettre de mieux interpréter les

⁷ *Scrum* signifie mêlée en anglais. Le lecteur intéressé pourra trouver plus d'information dans [Aubry, 2018].

informations fournies. Rappelons que la relation entre le TRS d'une ligne et celui de ces équipements n'est exprimable facilement que pour un comportement déterministe qui ne correspond pas au comportement observé des équipements. Notre collaboration avec l'entreprise s'inscrit ainsi dans ces perspectives. Mais il est d'ores et déjà avéré que le client de la société NTN-SNR Roulements demande aujourd'hui, et exigera demain, que l'entreprise garantisse la productivité de ses lignes de production à l'instar de ce qu'il exige aujourd'hui en qualité et en traçabilité. L'accélération du changement est une autre vérité pour l'entreprise.

6 REFERENCES

- AFNOR (2002). NF E60-182 : Moyens de production - Indicateurs de performances - Taux de rendement synthétique (TRS) - Taux de rendement global (TRG) - Taux de rendement économique (TRE).
- Ahuja, I. (2009). *Total Productive Maintenance*. Springer, London.
- Almada-Lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management* 3(4).
- Ante, G., F. Facchini, G. Mossa, and S. Digiesi (2018). Developing a key performance indicators tree for lean and smart production systems. *IFAC-PapersOnLine* 51(11), 13 – 18. 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018.
- Aubry, C. (2018). *SCRUM - Pour une pratique vivante de l'agilité (5e édition)*.
- Ayel, A. and B. Davier (2003). *Le TRS indicateur de la performance : Un guide pratique à l'usage des responsables de production*. Centre techniques des industries mécaniques.
- Baker, A. D. (1998). A survey of factory control algorithms that can be implemented in a multi-agent heterarchy: Dispatching, scheduling, and pull. *Journal of Manufacturing Systems* 17(4), 297 – 320.
- Barbier, C., R. Dapere, and C. Huber (1993). *Zéro panne par topomaintenance*. Stratégie entreprise, Maxima.
- Berrah, L., V. Clivillé, and L. Foulloy (2018). *Industrial Objectives and Industrial Performance: Concepts and Fuzzy Handling*. Wiley-ISTE.
- Berrah, L. and L. Foulloy (2013). Towards a unified descriptive framework for industrial objective declaration and performance measurement. *Computers in Industry* 64(6), 650–662.
- Berrah, L., G. Mauris, A. Haurat, and L. Foulloy (2000). Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach. *Computers in Industry* 43(3), 211–225.
- Bititci, U., P. Cocca, and A. Ates (2016). Impact of visual performance management systems on the performance management practices of organisations. *International Journal of Production Research* 54(6), 1571–1593.
- Bititci, U. S., P. Suwignjo, and A. S. Carrie (2001). Strategy management through quantitative modelling of performance measurement systems. *International Journal of Production Economics* 69(1), 15–22.
- Bitton, M. (1990). *Ecograi : méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performances pour organisations industrielles*. Thèse de doctorat en automatique, Université de Bordeaux I.
- Boyer, S. A. (2009). *Scada: Supervisory Control And Data Acquisition* (4th ed.). USA: International Society of Automation.
- Chen, D., B. Vallespir, and G. Doumeingts (1997). Grai integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology. *Computers in Industry* 33(2), 387 – 394. Co-Operation in Manufacturing Systems, CIM at Work.
- Clivillé, V., L. Berrah, and G. Mauris (2007). Quantitative expression and aggregation of performance measurements based on the MACBETH multi-criteria method. *International Journal of Production Economics* 105(1), 171–189.
- Deuel, A. (1994). The benefits of a manufacturing execution system for plantwide automation. *ISA Transactions* 33(2), 113 – 124.
- Ducq, Y., B. Vallespir, and G. Doumeingts (2001). Coherence analysis methods for production systems by performance aggregation. *International Journal of Production Economics* 1, 23–37.
- D'Antonio, G., J. Sauza Bedolla, and P. Chiabert (2017). A novel methodology to integrate manufacturing execution systems with the lean manufacturing approach. *Procedia Manufacturing* 11, 2243–2251. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy.
- Fortuin, L. (1988). Performance indicators, why, where and how? *European Journal of Operational Research* 34, 1–9.
- Foulloy, L., V. Clivillé, and L. Berrah (2019). A fuzzy temporal approach to the overall equipment effectiveness measurement. *Computers & Industrial Engineering* 127, 103 – 115.
- Gjeldum, N., M. Mladineo, M. Crnjac, I. Veza, and A. Aljinovic (2018). Performance analysis of the rfid system for optimal design of the intelligent assembly line in the learning factory. *Procedia Manufacturing* 23, 63 – 68. “Advanced Engineering Education & Training for Manufacturing Innovation” 8th CIRP Sponsored Conference on Learning Factories (CLF 2018).
- Hedman, R., M. Subramanian, and P. Almström (2016). Analysis of critical factors for automatic measurement of OEE. *Procedia CIRP* 57, 128–133. Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- Hermann, M., T. Pentek, and B. Otto (2016, Jan). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 3928–3937.
- IEC62264 (2013). *IEC 62264-1:2013: Enterprise-control system integration – Part 1: Models and terminology*. International Organization for Standardization.
- ISA95 (2014). *Enterprise - Control System Integration, Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management*. International Society of Automation.
- ISO (1986). The Ottawa Report on Reference Models for Manufacturing Standards, ISO TC184/SC5/WG1 N51, Version 1.1.
- Jung, K., K. Morris, K. W. Lyons, S. Leong, and H. Cho (2015). Mapping strategic goals and operational performance metrics for smart manufacturing systems. *Procedia Computer Science* 44, 184 – 193. 2015 Conference on Systems Engineering Research.
- Kagermann, H., W. Wahlster, and J. Helbig (2013, April). Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0 – securing the future of german manufacturing industry. Final report of the industrie 4.0 working group, acatech – National Academy of Science and Engineering, München.
- Karadgi, S. (2014). *A Reference Architecture for Real-Time Performance Measurement*. Springer International Publishing.
- Killeen, D., P. Gaboury, and D. Paccard (2001, Oct). Managing, measuring and improving equipment capacity and overall equipment efficiency (oe) using iplus. In *2001 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing. ISSM 2001. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37203)*, pp. 25–28.
- Kletti, J. (2007). *Manufacturing Execution Systems — MES*. Springer.
- Kumar, S. P. L. (2017). State of the art-intense review on artificial intelligence systems application in process planning and manufacturing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 65, 294 – 329.
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research* 56(1-2), 508–517.
- Küfner, T., T. H.-J. Uhlemann, and B. Ziegler (2018). Lean data in manufacturing systems: Using artificial intelligence for decentralized data reduction and information extraction. *Procedia CIRP* 72, 219 – 224. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- Liao, Y., F. Deschamps, E. de Freitas Rocha Loures, and L. F. P. Ramos (2017). Past, present and future of industrie 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research* 55(12), 3609–3629.

- Loughlin, S. (2003). A holistic approach to overall equipment effectiveness (OEE). *Computing Control Engineering Journal* 14(6), 37–42.
- Menezes, S., S. Creado, and R. Y. Zhong (2018). Smart manufacturing execution systems for small and medium-sized enterprises. *Procedia CIRP* 72, 1009 – 1014. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- MESA (1997). MES explained: A High Level Vision, White paper #6. MESA International.
- Meyer, H., F. Fuchs, and K. Thiel (2009). *Manufacturing Execution Systems (MES): Optimal Design, Planning, and Deployment*. McGraw-Hill.
- Morariu, O., T. Borangiu, and S. Raileanu (2015). vmes: Virtualization aware manufacturing execution system. *Computers in Industry* 67, 27–37.
- Muchiri, P. and L. Pintelon (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research* 46(13), 3517–3535.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Preventative Maintenance Series. Productivity Press.
- Neely, A., M. Gregory, and K. Platts (1995). Performance measurement system design: a literature review and research agenda. *International Journal of Operations and Production Management* 48(4), 80–116.
- Niel, E. (2007). Conduite des systèmes industriels – Présentation, Référence AG3500 v1. In *Techniques de l'ingénieur*.
- Oztemel, E. and S. Gursev (2018, Jul). Literature review of industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Paritala, P. K., S. Manchikatla, and P. K. D. V. Yarlagadda (2017). Digital manufacturing- applications past, current, and future trends. *Procedia Engineering* 174, 982–991.
- Reix, R., B. Fallery, M. Kalika, and F. Rowe (2016). *Systèmes d'information et management - 7e édition*. Vuibert.
- Relkar, A. S. and K. N. Nandurkar (2012). Optimizing & analysing overall equipment effectiveness (OEE) through design of experiments (doe). *Procedia Engineering* 38, 2973–2980.
- Rößler, M. P. and E. Abele (2013, jun). Uncertainty in the analysis of the overall equipment effectiveness on the shop floor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 46, 012019.
- Sadagopan, S. (2003). Enterprise resource planning. In H. Bidgoli (Ed.), *Encyclopedia of Information Systems*, pp. 169 – 184. New York: Elsevier.
- Saenz de Ugarte, B., A. Artiba, and R. Pellerin (2009). Manufacturing execution system – a literature review. *Production Planning & Control* 20(6), 525–539.
- Scheer, A.-W. (1991). *CIM. Computer Integrated Manufacturing - Towards the Factory of the Future*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Singh, R., D. B. Shah, A. M. Gohil, and M. H. Shah (2013). Overall equipment effectiveness (OEE) calculation - automation through hardware & software development. *Procedia Engineering* 51, 579–584.
- Snatkin, A., K. Karjust, J. Majak, A. Aruvälia, and T. Eiskop (2013). Real time production monitoring system in sme. *Estonian Journal of Engineering* 19(1), 62–75.
- Tallon, P. P. and A. Pinsonneault (2011, June). Competing perspectives on the link between strategic information technology alignment and organizational agility: Insights from a mediation model. *MIS Q.* 35(2), 463–484.
- Tao, F., Q. Qi, A. Liu, and A. Kusiak (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* 48, 157 – 169. Special Issue on Smart Manufacturing.
- Theodosiou, G. and N. S. Sapidis (2004). Information models of layout constraints for product life-cycle management: a solid-modelling approach. *Computer-Aided Design* 36(6), 549 – 564.
- Thoben, K.-D., S. Wiesner, and T. Wuest (2017). "industrie 4.0" and smart manufacturing—a review of research issues and application examples. *International Journal of Automation Technology* 11(1), 4–16.
- Tran, N. H. (2018). *Extension des systèmes MES au diagnostic des performances des systèmes de production au travers d'une approche probabiliste Bayésienne*. Ph. D. thesis.
- Trentesaux, D., P. Pesin, and C. Tahon (2000, Dec). Distributed artificial intelligence for fms scheduling, control and design support. *Journal of Intelligent Manufacturing* 11(6), 573–589.
- Urbina Coronado, P. D., R. Lynn, W. Louhichi, M. Parto, E. Wescoat, and T. Kurfess (2018). Part data integration in the shop floor digital twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. *Journal of Manufacturing Systems* 48, 25 – 33. Special Issue on Smart Manufacturing.
- Vernadat, F., L. Shah, A. Etienne, and A. Siadat (2013). VR-PMS: a new approach for performance measurement and management of industrial systems. *International Journal of Production Research* 51(23-24), 7420–7438.
- Waldner, J. B. (1992). *CIM: Principles of Computer-integrated Manufacturing*. John Wiley & Sons.
- Wang, H., L. Liu, Y. Fei, and T. Liu (2014). A collaborative manufacturing execution system oriented to discrete manufacturing enterprises. In Y. Luo (Ed.), *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, Cham, pp. 277–285. Springer International Publishing.
- Zhou, F., X. Lin, X. Luo, Y. Zhao, Y. Chen, N. Chen, and W. Gui (2018). Visually enhanced situation awareness for complex manufacturing facility monitoring in smart factories. *Journal of Visual Languages & Computing* 44, 58 – 69.