HAL
open science

Le jumeau numérique dans le pilotage de performance

Amel Souifi, Zohra Cherfi, Zolghadri Marc, Maher Barkallah, Mohamed Haddar

To cite this version:

Amel Souifi, Zohra Cherfi, Zolghadri Marc, Maher Barkallah, Mohamed Haddar. Le jumeau numérique dans le pilotage de performance. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. hal-03296127

HAL Id: hal-03296127

https://hal.science/hal-03296127

Submitted on 22 Jul 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.

Le jumeau numérique dans le pilotage de performance

Amel Souifi
Laboratoire Quartz
SUPMECA, 3 Rue Fernand Hainaut
Saint Ouen– France
amel.souifi@supmeca.fr

Zohra Cherfi Boulanger
Laboratoire Roberval
60203 Compiègne cedex, France
Compiègne – France
zohra.cherfi-boulanger@utc.fr

Marc Zolghadri
Laboratoire Quartz
3 Rue Fernand Hainaut
Saint Ouen– France
marc.zolghadri@supmeca.fr

Maher Barkallah
LA2MP
Route Soukra Km 3.5, BP 1173, 3038
Sfax– Tunisie
maher.barkallah@enis.tn

Mohamed Haddar
LA2MP
Route Soukra Km 3.5, BP 1173, 3038
Sfax– Tunisie
Mohamed.Haddar@enis.rnu.tn

Résumé— La transition vers l'industrie 4.0 est supportée par plusieurs technologies telles que le jumeau numérique. Étant donné qu'il devrait être développé à des fins spécifiques, nous sommes intéressés par l'application du jumeau numérique pour le pilotage de performance. L'objectif de ce papier est d'identifier, à travers un état de l'art, les caractéristiques du jumeau numérique afin de motiver son utilisation pour le pilotage de la performance. Nous indiquons qu'un jumeau numérique d'un atelier de production comprend des jumeaux numériques de produits et de processus capables d'alimenter les systèmes de mesure des performances avec des données pertinentes. Ensuite, nous réalisons une correspondance entre un système de pilotage de performance et un jumeau numérique dans le but de montrer l'utilité de ce dernier. Et nous proposons un ensemble d'utilisations du jumeau numérique dans le pilotage de performance, inspiré des différents défis auxquels sont confrontés les systèmes de pilotage.

Mots-clés— Jumeau numérique, Pilotage de performance, atelier de production.

I. Introduction

La performance est exprimée en termes de résultat obtenu par rapport à un objectif préalablement fixé. Selon [1], performance, objectif et action sont des facettes différentes d'une même entité. Le pilotage de performance consiste à s'assurer que les objectifs de l'organisation ont été atteints de manière cohérente, efficace et efficiente [2]. Il permet à la direction de savoir dans quelle mesure l'organisation accomplit ses tâches et dans quelle mesure les objectifs de l'organisation sont atteints [3]. Les systèmes de pilotage de performance sont basés sur un système de mesure des performances, des règles de décision et des plans d'action pour corriger les performances réelles ou anticiper les baisses de performances futures. [4] a élaboré un cadre global pour les systèmes de pilotage afin de décrire leur structure et leur fonctionnement et de fournir une vue d'ensemble de leurs principaux aspects. Le cadre met en évidence douze questions principales nécessaires pour décrire les caractéristiques et l'utilisation des systèmes de pilotage de performance. Ces questions sont liées à la vision et à la mission de l'organisation, aux facteurs clés, à la structure, à la stratégie et aux plans, aux principales mesures de performance, aux objectifs, à l'évaluation des performances, aux systèmes de récompense, aux flux, systèmes et réseaux d'information, à l'utilisation du système de pilotage, au changement, à la force et la cohérence des liens entre les composants d'un système de pilotage.

La modélisation permet de représenter les différentes activités d'une entreprise de manière simplifiée et plus au moins fidèle à la réalité. L'évaluation des performances est l'un des objectifs de la modélisation, permettant l'association d'indicateurs aux différents processus de l'entreprise. Cette utilisation est motivée par le rôle de la modélisation dans la clarification du processus décisionnel et dans la compréhension, l'explication et l'anticipation des problèmes de performance du système contrôlé [5]. Une exigence importante dans le développement des modèles de simulation d'un atelier de production est de fournir aux parties prenantes des informations et des connaissances pour les aider à prendre des décisions [6]. Dans ce contexte, le jumeau numérique, en tant

que modèle de simulation, est un outil prometteur pour le pilotage de performance grâce à l'intégration des données et à la représentation en temps réel du système physique.

Proposé en premier lieu par Michael Grieves dans une présentation sur la gestion du cycle de vie des produits (PLM) [7], le jumeau numérique est considéré comme un élément clé de l'industrie 4.0. La NASA a établi la première définition du jumeau numérique comme "une simulation intégrée multi-physique, multi-échelle, et probabiliste d'un véhicule ou d'un système qui utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, les mises à jour des capteurs, l'historique de la flotte, etc. pour refléter la vie de son jumeau volant [8]. Le jumeau numérique est utilisé pour modéliser et simuler l'état et le comportement de son jumeau physique en temps réel [9]. Il exploite les données en temps réel collectées sur le système physique pour choisir entre un ensemble d'actions afin d'optimiser le système de production et d'améliorer la productivité [10]. Il dispose d'informations sur le système ou le produit depuis sa conception jusqu'à son élimination [11] permettant une synchronisation entre le monde réel et le monde virtuel. [12] a déclaré que le cycle de vie d'un jumeau numérique est similaire à un cycle de vie de produit et qu'il comporte quatre phases : création, production, exploitation et élimination. De point de vue modélisation et simulation, le jumeau numérique est considéré comme la prochaine vague dans l'approche de modélisation, de simulation et d'optimisation [13].

Depuis la première introduction du concept de jumeau numérique, il a été utilisé pour différentes applications dans plusieurs domaines tels que la conception et la maintenance. Toutefois, de il y a un manque de travaux s'intéressant à son utilisation dans la mesure et le pilotage de performance. Dans ce papier, nous nous basons sur la littérature pour déterminer les spécificités du jumeau numérique afin d'identifier ses contributions possibles au pilotage de performance. Nous commençons par présenter certaines des applications industrielles du jumeau numérique. Ensuite, nous soulignons que le jumeau numérique d'un atelier de production peut être constitué de jumeaux numériques de produits et de processus. Ces jumeaux fournissent des données qui alimentent le système de mesure des performances pour une prise de décision plus éclairée. Ensuite, nous faisons une correspondance entre le jumeau numérique et les systèmes de pilotage de performance pour motiver son utilisation. Enfin, nous proposons quatre contributions possibles du jumeau numérique principalement : la simulation des performances du système, supporter le couplage entre pilotage proactif/prédictif et réactif, la visualisation des indicateurs clés de performance et la compréhension de l'interdépendance entre les différents mécanismes de contrôle dans une organisation.

II. Applications du jumeau numerique dans l'industrie

Le jumeau numérique est un élément clé de l'usine intelligente. Il permet d'intégrer des données provenant des différentes phases du cycle de vie du produit et de résoudre ainsi le problème des îlots d'information. Pour la phase de conception, [14] a proposé un modèle de référence de jumeau numérique pour la conception du processus d'assemblage intelligent. Ce modèle est également utilisé pour la mise en service virtuelle de nouveaux systèmes de fabrication. La mise en service virtuelle (Visual Commissioning VC) est le processus de vérification et de validation des systèmes par rapport à un modèle virtuel et non par rapport au système automatisé réel [15]. Le jumeau numérique supporte également l'optimisation itérative du schéma de conception en aidant les concepteurs à ajuster itérativement les attentes et à améliorer les modèles de conception, facilitant la conception de produits personnalisés [16]. [17] a souligné que le jumeau numérique permet de mieux comprendre la forme et les comportements émergents des systèmes et de réduire le facteur "je n'ai pas vu ça venir". Aussi, permet-il l'intégration de données massives générées par différents capteurs surveillant les actifs physiques. L'analyse de ces données permet de mieux planifier la maintenance [18]. En tant que modèle de simulation, le jumeau numérique permet de simuler différents scénarios afin d'optimiser les performances de son homologue physique [19]. Selon [20], le jumeau numérique favorise l'intégration horizontale et verticale. Pour [21], il réalise une cartographie interactive opportune et précise entre l'espace réel et virtuel, utile pour le contrôle de la qualité et l'optimisation de l'assemblage de produits complexes. [17] résume que le jumeau numérique possède deux rôles principaux : interrogatif car il fournit des informations sur l'état actuel et passé de son jumeau réel et prédictif vu qu'il assure la prédiction des performances futures du système. Mais le jumeau numérique peut également être proactif, capable de prendre des décisions basées sur les performances actuelles et futures du système.

III. Jumeau numerique d'un atelier de production

Dans cet article, nous adoptons le modèle conceptuel d'un atelier de production proposé par [22]. Il se compose de quatre éléments : L'atelier physique (Physical Shop-floor PS), l'atelier virtuel (Virtual Shop-floor VS), le système de service de l'atelier (Shop-floor Service System SSS) et les données du jumeau numérique de l'atelier (Shop-floor Digital Twin Data SDTD). L'atelier physique contient un ensemble d'entités telles que des machines, des matériaux et des êtres humains. L'atelier virtuel comprend des modèles statiques et dynamiques reflétant le fonctionnement de l'atelier physique. "Le SSS est une plate-forme de services intégrés, qui encapsule les fonctions du système d'information d'entreprise, des outils assistés par ordinateur, des modèles et des algorithmes, etc. en sous-services, puis les combine pour former des services pour des demandes spécifiques de PS et VS" [22]. Enfin, le module des données réalise l'intégration de données provenant de PS, VS et SSS. Il comprend également des méthodes de modélisation, d'optimisation et de prévision. Pour nous, le SDTD devrait également permettre de transformer les données brutes des trois autres composants en données intelligentes. En effet, les données ne sont pas toujours de qualité ou de valeur, et un traitement préalable permet d'extraire des informations pertinentes. Comme l'atelier physique est composé de processus utilisant des ressources pour obtenir des produits finis, l'atelier virtuel représentera les mêmes composants. Les modèles constituant l'atelier virtuel peuvent être des modèles de produits et de processus. La présence de ces modèles dépend des objectifs du jumeau numérique et du niveau de détail requis. De ce fait, il est nécessaire de définir et hiérarchiser les aspects nécessaires à modéliser pour atteindre

les objectifs prédéfinis. Ainsi, nous considérons que le jumeau numérique d'un atelier de production correspond à l'union des jumeaux numériques de produits et processus.

A. Jumeau numérique d'un produit

Les produits sont de plus en plus complexes. Par conséquent, un jumeau numérique de produit doit couvrir ses aspects point de vue du client et de l'entreprise. En fonction des informations disponibles, les produits peuvent être modélisés à différents niveaux d'abstraction. Le modèle de produit [23] est un modèle qui peut décrire toutes les informations qui représentent le produit au cours de son cycle de vie. Les modèles de produits peuvent inclure un modèle fonctionnel, d'exigences, de matériaux, de tolérance, d'assemblage, de forme, etc. [24].Il est important de prendre en compte les exigences et les intérêts des clients et de toutes les autres parties prenantes lors de la modélisation [23].

À l'ère de l'industrie 4.0, l'accent est mis sur les produits intelligents qui sont capables communiquer et d'interagir avec leur environnement et d'autres produits intelligents [25]. Ils peuvent s'identifier grâce à la RFID et décrire leurs propriétés, leur statut et leur historique [26]. Les produits intelligents sont également capables de collecter, traiter et produire des informations [27]. Le jumeau numérique d'un produit peut être décomposé en ensembles de sous-systèmes virtuels comme dans le cas de produits assemblés. Le modèle conceptuel de jumeau numérique donné par Grieves [17] (figure 1) confirme cet aspect.

Avec l'augmentation de la demande sur des produits personnalisés, la mesure et l'évaluation de la qualité des produits est un défi. Le jumeau numérique de produits est donc un outil efficace pour suivre différents produits tout au long de leur cycle de vie et intégrer des données provenant de différentes phases, ce qui permet de prévoir la durée de vie restante et les défauts du produit, d'évaluer sa qualité, de mesurer la satisfaction du client et de proposer des améliorations.

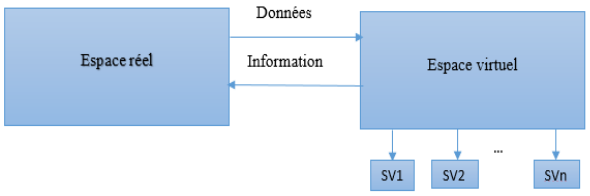

Figure 1. MODELE DU JUMEAU NUMERIQUE [16]

B. Jumeau numérique d'un processus

Un processus fait référence à la transformation des éléments d'entrée en sorties [28]. Un modèle de processus comprend des modèles de procédures de fabrication, des informations sur les attributs du processus (nom du produit, numéro de lot du produit et version du produit, etc.), des modèles d'actifs comme les modèles de machines [9] et les modèles pour des opérateurs humains. Les modèles des humains sont limités à certaines abstractions étant donné la difficulté de prédire les réactions humaines face à un événement.

Comme un processus peut être décomposé en sous processus, son jumeau numérique peut être aussi décomposé en jumeaux de sous-processus. Nous illustrons cette décomposition à travers la figure 2. Si l'on considère un système opérant constitué de processus, transformant des matières premières en produits finis, eux-mêmes décomposés en sous processus, le jumeau numérique du système de production regroupera des processus virtuels, des matières premières virtuelles (MPV), produits finis virtuels (PFV) et produits semi-finis virtuels (PSFV). Les systèmes d'information et de décision relient le système opérant et son modèle. Les niveaux du jumeau d'un processus varient en fonction de la granularité des informations modélisées.

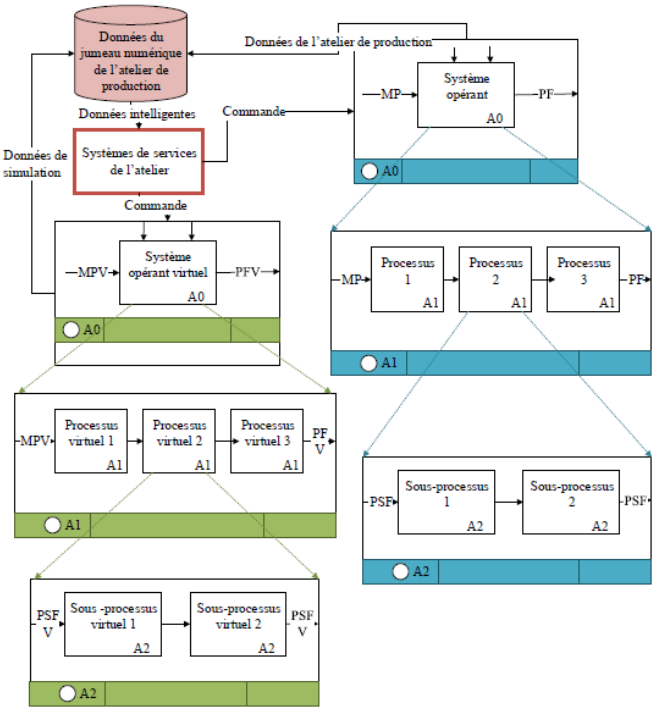

Figure 2. DIFFERENTS NIVEAUX D'UN JUMEAU NUMERIQUE DE PROCESSUS

Un système de mesure des performances est un composant essentiel des systèmes de pilotage de performance. Pour l'implémenter, il est essentiel de comprendre les activités et les processus clés d'une chaîne logistique [29]. Par exemple, le modèle SCOR (Supply Chain Operations Reference) propose une décomposition de la chaîne logistique en six grands processus (planification, approvisionnement, fabrication, livraison, retour et management) [30]. Chaque processus comprend des sous-processus auxquels sont associées des mesures de performance. Ces mesures sont liées à cinq attributs principaux : fiabilité, réactivité, agilité, coûts et efficacité de la gestion des actifs. Par conséquent, la cartographie des différents processus d'une organisation par le biais du jumeau numérique est une tâche importante permettant d'identifier et de hiérarchiser les indicateurs de performance clés pour chaque processus. Pour mesurer la performance d'un atelier de production, les modèles de produits et/ou de processus retenus dans le jumeau numérique dépendent de l'approche utilisée dans le système de mesure et des dimensions de performance sélectionnées.

IV. JUMEAU NUMERIQUE DANS LE PILOTAGE DE PERFORMANCE

A. *Correspondance entre jumeau numérique et système de pilotage de performance*

Afin de motiver l'utilisation du jumeau numérique pour le pilotage de performance, nous avons déterminé leurs points communs.

- Objectifs

Un modèle de simulation doit être développé pour un ensemble particulier d'objectifs. Ainsi, un modèle qui est valable pour un objectif donné peut ne pas l'être pour un autre [31]. Constitué d'un ensemble de modèles, le jumeau numérique doit répondre à des objectifs spécifiques. La définition et la déclaration des objectifs à atteindre constituent également l'étape initiale dans le pilotage de performance. Pour [32], le pilotage est utilisé pour améliorer les résultats d'une organisation en gérant les performances des équipes dans un cadre défini d'objectifs planifiés. Ces objectifs doivent être réalisables et déboucher sur des résultats tangibles [1].

- Données

Les données alimentant les différents modèles d'un jumeau numérique et le système de mesure des performances doivent être pertinentes (intelligentes). Dans le travail de [33], les données intelligentes sont définies comme étant des données de haute qualité, propres et de valeur. Pour nous, les données intelligentes doivent remplir quatre conditions: des données alignées avec les objectifs de l'entreprise, de qualité, en quantité suffisante et à un coût abordable. Le jumeau numérique permet l'intégration de données de simulation et de données de systèmes physiques qui peuvent être utilisées pour la mesure des performances.

- Caractéristiques

La décomposition du système de production en processus est l'une des approches utilisées pour identifier et mesurer les indicateurs clés de performance. Dans la même logique, le jumeau numérique est composé de modèles de produits et de processus à plusieurs niveaux.

B. *Contribution du jumeau numérique au pilotage de performance*

Sur la base de ce qui précède, nous pouvons définir quatre contributions possibles du jumeau numérique dans le pilotage de performance :

- Simulation des performances du système

Le jumeau numérique permet de simuler l'effet des actions nécessaires pour corriger ou améliorer les performances sur le système virtuel avant leur implémentation sur le système physique. Cette étape est répétée jusqu'à l'obtention de performances satisfaisantes. Une autre utilisation du jumeau numérique comme outil de simulation est la fixation d'objectifs de performance. En effet, lors de la définition des objectifs, il est possible de simuler le fonctionnement du système afin de vérifier le caractère réalisable de ces objectifs.

- Pilotage proactif/prédictif et réactif de performance

Dans [34], les auteurs proposent une expression temporelle de la performance. Ils affirment que la performance n'est plus limitée à une forme instantanée mais inclut une forme prédictive et une forme tendancielle. Ils définissent la performance instantanée comme étant le résultat de la comparaison entre l'objectif et la mesure à un instant de l'horizon considéré. La performance prédictive exprime, à un instant donné, l'expression de la performance qui serait atteinte à un instant futur de l'horizon. Quant à la performance tendancielle, elle donne une indication, sur un intervalle de l'horizon, de l'évolution de la mesure par rapport à l'évolution de l'objectif. Ce triplet (performance instantanée, performance tendancielle, performance prédictive) fournit, à un moment donné, non seulement l'expression d'une performance réalisée, mais aussi une idée de la façon dont la réalisation de l'objectif se dessine, au moment final de l'horizon ainsi que l'expression de la performance qui pourrait être réalisée. Le jumeau numérique fournit au système de mesure de performance des données en temps réel ou périodiques lui permettant de calculer la performance instantanée (figure 3). Les données du jumeau numérique permettent également de calculer la variation de la performance du système et de la comparer aux objectifs intermédiaires pour obtenir une performance tendancielle. Sur la base du modèle proposé par [17], un aspect clé du jumeau numérique est la collecte et la réutilisation de données historiques permettant l'estimation des performances futures. Basé sur des algorithmes d'intelligence artificielle, il permet de prévoir les perturbations du système de production, la dégradation de la qualité des produits, l'état des équipements, etc.

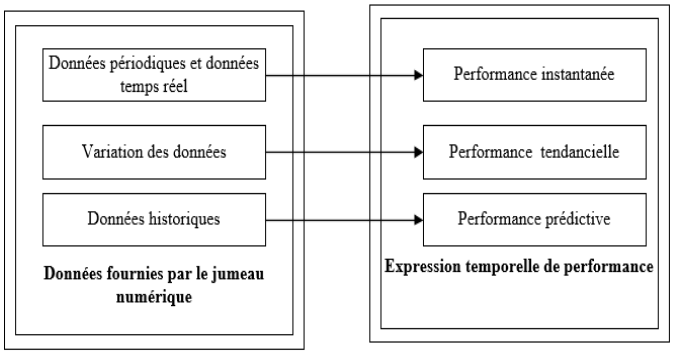

Figure 3. UTILISATION DE DONNEES PROVENANT DU JUMEAU NUMERIQUE POUR UNE EXPRESSION TEMPORELLE DE LA PERFORMANCE

Le jumeau numérique soutient ainsi l'évolution des systèmes de pilotage de performance. En raison des limites des systèmes de contrôle et de planification centralisés et des approches réactives considérées individuellement, les chercheurs s'intéressent aux architectures de planification et de contrôle intégrées qui regroupent des mécanismes locaux, réactifs et distribués couplés à des mécanismes de planification globaux et centralisés [35]. Dans ce contexte, le jumeau numérique permet de coupler le pilotage proactif/prédictif et réactif. Il permet de prévoir les performances futures du système de production, assurant ainsi un pilotage prédictif de performance. Si le jumeau numérique est capable de prendre des décisions de manière autonome, il contribue au pilotage

proactif. Mais cela dépend du niveau d'automatisation de la prise de décision. De plus, un jumeau numérique permet de passer d'un système de pilotage réactif basé sur des données historiques à un pilotage en temps réel facilité par l'intégration de données provenant de différentes sources telles que le système d'information, les capteurs RFID et les réseaux de capteurs et rendue possible par l'internet des objets (IoT) [36].

- Visualisation

Le jumeau numérique permet de visualiser l'évolution du système en temps réel ou quasi réel. Ainsi, les indicateurs de performance du système de production peuvent être affichés pour aider à la prise de décision. La présentation des données sur le jumeau numérique doit répondre à plusieurs conditions. En effet, selon [6], les systèmes de planification et de simulation doivent fournir des informations de manière proactive : le système de simulation doit détecter le besoin de l'utilisateur et fournir des informations adéquates. En outre, les informations doivent être non intrusives mais accessibles : les informations doivent être présentées de manière à ce qu'elles puissent être ignorées, mais qu'elles restent facilement accessibles en cas de besoin.

- Comprendre l'interdépendance entre les différents mécanismes de contrôle

[4] indique que la définition du système de pilotage de performance "comprend à la fois les mécanismes, processus, systèmes et réseaux formels utilisés par les organisations, ainsi que les contrôles informels plus subtils, mais importants". Cette définition souligne la présence de différents types de contrôles formels et informels dans une organisation. Le jumeau numérique permet l'intégration de données provenant des différentes phases du cycle de vie des produits et de différents composants de l'organisation. Il permet ainsi une vision globale et une compréhension des différents systèmes de contrôle fonctionnant en même temps dans la même organisation.

V. Conclusion

Le jumeau numérique se compose de plusieurs modèles statiques et dynamiques, principalement des modèles de produits et de processus. Ils permettent une réflexion du système physique en temps réel en intégrant des données provenant de différentes sources. Ces caractéristiques font du jumeau numérique un modèle de simulation prometteur pour la mesure et le pilotage de performance. D'un point de vue théorique, la contribution du jumeau numérique est évidente. Cependant, une étude empirique reste indispensable pour valider ce résultat.

VI. References

[1] L. Berrah, V. Clivillé, and L. Foulloy. "Industrial Objectives and Industrial Performance". Wiley Online Library, 2018.

[2] A. R. Suhardi."Renewal of performance management system in family company", Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 211, pp. 448– 454, 2015.

[3] K. Baird, H. Schoch, and Q. J. Chen. "Performance management system effectiveness in australian local government", Pacific Accounting Review, 2012.

[4] A. Ferreira and D. Otley. "The design and use of performance management systems: An extended framework for analysis", Management accounting research, vol. 20, no. 4, pp. 263–282, 2009.

[5] Y. Ducq. "Evaluation de la performance d'entreprise par les modèles", 2007.

[6] C. L. Constantinescu, E. Francalanza, and D. Matarazzo. "Towards knowledge capturing and innovative human-system interface in an opensource factory modelling and simulation environment", Procedia CIRP, vol. 33, pp. 23–28, 2015.

[7] M. W. Grieves. "Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises", International Journal of Product Development, vol. 2,no. 1-2, pp. 71–84, 2005.

[8] E. Glaessgen and D. Stargel. "The digital twin paradigm for future nasa and us air force vehicles", in 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA, 2012, p. 1818.

[9] J. Bao, D. Guo, J. Li, and J. Zhang. "The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing", Enterprise Information Systems, vol. 13, no. 4, pp. 534–556, 2019.

[10] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn. "Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification", IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018.

[11] G. N. Schroeder, C. Steinmetz, C. E. Pereira, and D. B. Espindola. "Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange", IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 30, pp. 12–17, 2016.

[12] K. Schutzer, J. de Andrade Bertazzi, C. Sallati, R. Anderl, and E. Zancul. "Contribution to the development of a digital twin based on product lifecycle to support the manufacturing process", Procedia CIRP, vol. 84, pp. 82–87, 2019.

[13] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen. "About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing", IFAC-PapersOnLine, vol. 48, no. 3, pp. 567–572, 2015.

[14] Y. Yi, Y. Yan, X. Liu, Z. Ni, J. Feng, and J. Liu. "Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study", Journal of Manufacturing Systems, 2020.

[15] M. Ayani, M. Ganeback, and A. H. Ng. "Digital twin: Applying emula- ¨ tion for machine reconditioning", Procedia CIRP, vol. 72, pp. 243–248, 2018.

[16] Q. Qi and F. Tao. "Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison", Ieee Access, vol. 6, pp. 3585–3593, 2018.

[17] M. Grieves and J. Vickers. "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems", in Transdisciplinary perspectives on complex systems, Springer, 2017, pp. 85–113.

[18] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal. "Digital twin: Values, challenges and enablers", arXiv preprint arXiv: 1910.01719, 2019.

[19] T. Y. Melesse, V. Di Pasquale, and S. Riemma. "Digital twin models in industrial operations: A systematic literature review", Procedia Manufacturing, vol. 42, pp. 267–272, 2020.
[20] R. Stark, C. Fresemann, and K. Lindow. "Development and operation of digital twins for technical systems and services", CIRP Annals, vol. 68, no. 1, pp. 129–132, 2019.
[21] Y. Ma, H. Zhou, H. He, G. Jiao, and S. Wei."A digital twin-based approach for quality control and optimization of complex product assembly", in 2019 International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM), IEEE, 2019, pp. 762–767.
[22] F. Tao and M. Zhang. "Digital twin shop-floor: A new shopfloor paradigm towards smart manufacturing", Ieee Access, vol. 5, pp. 20 418–20 427, 2017.
[23] P. Nilsson and B. Fagerstrom. "Managing stakeholder requirements in ¨ a product modelling system", Computers in Industry, vol. 57, no. 2, pp. 167–177, 2006.
[24] F.-L. Krause, F. Kimura, T. Kjellberg. S.-Y. Lu, L. Alting, H. Elmaraghy, W. Eversheim, K. Iwata, N. Suh, V. Tipnis, et al., "Product modelling", CIRP annals, vol. 42, no. 2, pp. 695–706, 1993.
[25] M. Abramovici, P. Savarino, J. C. Gobel, S. Adwernat, and P. Gebus. "Systematization of virtual product twin models in the context of smart product reconfiguration during the product use phase", Procedia CIRP, vol. 69, pp. 734–739, 2018.
[26] Schmidt, Rainer, et al. "Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results." International Conference on Business Information Systems. Springer, Cham, 2015.
[27] P. Zheng, T.-J. Lin, C.-H. Chen, and X. Xu. "A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems", Journal of Cleaner Production, vol. 201, pp. 657–667, 2018.
[28] M. Laguna and J. Marklund. "Business process modeling, simulation and design". CRC Press, 2013.
[29] H. Balfaqih, Z. M. Nopiah, N. Saibani, and M. T. Al-Nory. "Review of supply chain performance measurement systems: 1998–2015", Computers in Industry, vol. 82, pp. 135–150, 2016.
[30] APICS. "Supply chain operations reference model SCOR version 12.0", 2017.
[31] A. M. Law, W. D. Kelton, and W. D. Kelton. "Simulation modeling and analysis". McGraw-Hill New York, 2000, vol. 3.
[32] A. Giannopoulos. "Performance management as a process of promoting innovation in software industry", Procedia-Social and Behavioral Sciences, vol. 175, pp. 401–407, 2015.
[33] D. Garcıa-Gil, J. Luengo, S. Garcıa, and F. Herrera. "Enabling smart data: Noise filtering in big data classification", Information Sciences, vol. 479, pp. 135–152, 2019.
[34] L. Berrah, L. Foulloy, and H. Hamadmad. "Définition d'une expression temporelle de la performance industrielle". 11e Congres International De Génie Industriel - CIGI2015, Québec, Canada, 2015.
[35] O. Cardin, D. Trentesaux, A. Thomas, P. Castagna, T. Berger, and H. B. El-Haouzi. "Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures: State of the art and future challenges", Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 28, no. 7, pp. 1503– 1517, 2017.
[36] C. Zhuang, J. Liu, and H. Xiong. "Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 96, no. 1-4, pp. 1149–1163, 2018.