

Contribution de la simulation à événements discrets à la durabilité des systèmes de production du futur

Meriem Kouki, Olivier Cardin, Pierre Castagna
LUNAM Université, IUT de Nantes – Université de Nantes,
2 avenue du Prof. Jean Rouxel – 44475
Carquefou – France
Meriem.kouki@univ-nantes.fr

Céline Cornardeau
Techteam
50 rue Jean Zay– 69800
Saint Priest, France

Résumé—*Les préoccupations actuelles du secteur industriel s'orientent vers l'industrie dufutur. Pour faire de cette transition un succès, la simulation à événements discrets est devenue un outil fiable pour supporter la prise de décision aussi bien dans la phase de conception que la phase de contrôle de cette nouvelle industrie. Cependant, les exigences et les défis de ces nouveaux systèmes de production guident de nouvelles réflexions dans le développement des modèles de simulation. Ce travail est un effort pour développer une nouvelle plateforme de simulation à événements discrets lié à l'énergie pour répondre aux nouvelles exigences de l'industrie de futur, particulièrement celles liées à la durabilité. Cette plateforme permettra une création rapide et facile de modèles de simulation pour prédire le comportement des systèmes à la fois en termes de production et de consommation énergétique.*

Mots-clés—*Simulation à événements discrets, consommation énergétique, industrie du future*

I. INTRODUCTION

Depuis des décennies les systèmes de production connaissent un progrès continu pour faire face aux défis majeurs liés au développement économique, sociétal, technologique et environnemental. Les industriels d'aujourd'hui sont confrontés à un marché fortement concurrentiel dû à la mondialisation. Ils sont conscients que la version classique du système de production et ses méthodes classiques ne peuvent plus persister dans l'économie turbulente d'aujourd'hui. Cela a donné lieu à la quatrième révolution industrielle précédée de trois autres. Grâce à ces révolutions, l'industrie a largement évolué dans ses aspects techniques, d'ingénierie, de planification, de conception pour aller vers des technologies plus avancées telles que la nano fabrication, la fabrication des semi-conducteurs et la production additive [1]. L'un des critères les plus pertinents de l'industrie du futur est la durabilité. L'industrie du futur devrait être respectueuse de l'environnement. Ceci, avec les autres critères émergents de cette industrie, rend sa conception et son contrôle assez complexe. Dans ce contexte, la simulation à événements discrets (SED) pourrait être un outil pertinent pour appuyer les décisions relatives à la conception et au contrôle de cette industrie du futur. Ce travail est donc un effort pour développer une plateforme de simulation à événements discrets liés à l'énergie nommée ERDES (Pour Energy Related

Discrete Event Simulation) qui pourrait être utilisée pour créer un modèle virtuel de cette industrie et lesimuler tout en tenant compte de sa consommation énergétique dans le but de l'améliorer. Ce travail est organisé comme suit. La prochaine section résume les enjeux majeurs du l'industrie du futur et explique notre motivation pour développer cette plateforme de simulation intégrant l'énergie pour aider à répondre à ces enjeux. La section 3 présente l'état de l'art concernant l'évolution de l'utilisation de la simulation avec l'évolution des exigences des systèmes manufacturiers. La section 4 explique le concept ERDES et son utilité. La section 5 donne un aperçu de l'environnement de développement et explique ses caractéristiques. Enfin, une conclusion est présentée pour résumer le travail.

II. CONTEXTE ET MOTIVATION

Aujourd'hui, de nombreux acteurs s'intéressent à « l'industrie du futur ». Aussi appelée « l'industrie 4.0 », « l'industrie intelligente », « l'industrie connectée », etc. De nombreuses désignations pour décrire le même phénomène : l'évolution des méthodes de production dans l'industrie. La transition vers cette industrie touche tous les phases du système de production : la conception, la gestion et le contrôle des produits et des procédés, les opérations de fabrication, les services et l'organisation. Tout cela pour un objectif unique : la rendre plus agile et flexible, moins coûteuse, plus respectueux de ses employés et plus respectueux de l'environnement grâce à un haut niveau d'automatisation et une intégration numérique de toute la chaîne de production [2].

Par conséquent, les principaux enjeux de l'industrie de l'avenir peuvent se résumer comme suit:

1 / L'enjeu de développement du marché : l'industrie du futur doit s'adapter à une grande variabilité des produits, tant en quantité qu'en fonctionnalités. Elle doit être aussi flexible et réactive que possible pour faire face à ce défi.

2 / Les enjeux technologiques : l'industrie du futur devrait intégrer des technologies avancées dans le but de la rendre plus compétitive. Le « Big Data », les systèmes cyber-physiques, la simulation, l'Internet des objets, le Cloud, la fabrication additive, la réalité augmentée, sont toutes des technologies avancées qui participeront à l'industrie du futur.

Certaines d'entre elles sont déjà utilisées dans les systèmes de production actuels montrant l'état de maturité de l'industrie de futur [3].

3 / les enjeux organisationnels : les nouvelles technologies ne sont pas suffisantes pour le développement d'une industrie plus performante et doivent accompagner par de



Figure 1. La réponse aux challenges des systèmes de production du futur par la SED intégrant l'énergie

nouvelles organisations plus performantes et plus fiables. Une organisation souple, reconfigurable et flexible avec un haut niveau de polyvalence est impérative pour atteindre les objectifs de l'industrie du futur.

4 / Les enjeux environnementaux : Préoccupée par l'environnement, l'industrie du futur doit intégrer des processus de production ayant une meilleure efficacité énergétique et environnementale. Cette efficacité doit être intégrée tout au long du cycle de vie du produit, de la conception à sa fin de vie.

5 / Les enjeux sociaux : le facteur humain est capital pour assurer le succès de l'industrie de futur. Il doit s'adapter au changement et aux évolutions technologiques pour être efficace dans ce contexte. Il doit être plus compétent et plus polyvalent.

Comme évoqué précédemment, l'industrie du futur doit répondre à plusieurs enjeux liés aux aspects économiques, technologiques, organisationnels, environnementaux et sociaux. Cela augmente la complexité de la gestion de cette industrie à la fois dans la phase de conception et de contrôle. Les décideurs de demain auront donc besoin d'outils plus fiables pour appuyer leurs décisions dans un environnement plus exigeant. Pour rendre la conception et le contrôle de l'industrie du futur un succès, la simulation à événements discrets pourrait être un outil fiable.

Cette technique a été citée parmi les piliers du progrès technologiques de l'industrie 4.0 [4]. La SED a été largement utilisée dans les systèmes de production, mais dans le futur, elle sera utilisée plus largement pour répondre à des nouvelles exigences et de nouvelles contraintes. Auparavant l'objectif principal était d'organiser la production avec ses différents flux (matériel, outils, opérateurs, etc.) en tenant compte des disponibilités des machines, des coûts de production, de l'encombrement, etc. Aujourd'hui, le développement de l'industrie du futur fait apparaître de nouvelles contraintes liées à une flexibilité et une réactivité accrues, à plus d'interconnexions entre les différentes composantes du système de production et à un besoin croissant de réduire la consommation d'énergie pour réagir efficacement aux problèmes environnementaux émergents. Ce travail est alors

un effort pour intégrer ces contraintes dans un nouveau cadre de SED. Il applique une approche flexible pour modéliser et simuler l'industrie du futur avec tous ses flux pertinents, y compris les flux d'énergie. La figure 1 montre qu'avec la méthodologie adoptée et l'intégration de la consommation d'énergie dans la SED, nous pouvons créer un modèle virtuel et évaluer sa performance en réponse aux différents enjeux de l'industrie du futur précédemment cités.

III. L'EVOLUTION DES PROJETS DE SIMULATION

La simulation est une technique puissante pour prédire le comportement de systèmes complexes en phase de conception ou pour optimiser les performances du système existant. Cette technique a été utilisée depuis plusieurs décennies dans plusieurs domaines d'application (automobile, aéronautique, agriculture, transport, etc.) pour résoudre différentes problématiques. Auparavant, ces problématiques étaient principalement axées sur la conception générale du système, tels que la configuration et la disposition des installations, la manutention, le respect des deadlines, le dimensionnement des stocks, etc. Pour plus de détails sur l'utilisation de la simulation dans des travaux antérieurs le lecteur pourra se référer à [5].

L'utilisation de la simulation a ensuite évolué avec l'évolution des exigences du système de production. Dans le but de répondre à un marché instable et concurrentiel avec une réponse plus fiable aux changements de demandes, le système de production flexible a été développé. La fluctuation des demandes ainsi que d'autres incertitudes comme les défaillances de machines ont donné lieu à de nombreuses problématiques de planification des systèmes flexibles. La simulation a été probablement l'un des outils les plus utilisés pour supporter les problèmes d'ordonnement ainsi que les décisions en temps réel dans ces systèmes [6,7,8,9].

Récemment, une nouvelle contrainte a rejoint les préoccupations des industriels : la durabilité. Cette réflexion a été développée suite à une accélération du réchauffement climatique puis une exigence croissante en matière de protection de l'environnement. Le problème de la durabilité est de plus en plus discuté dans la littérature et la simulation

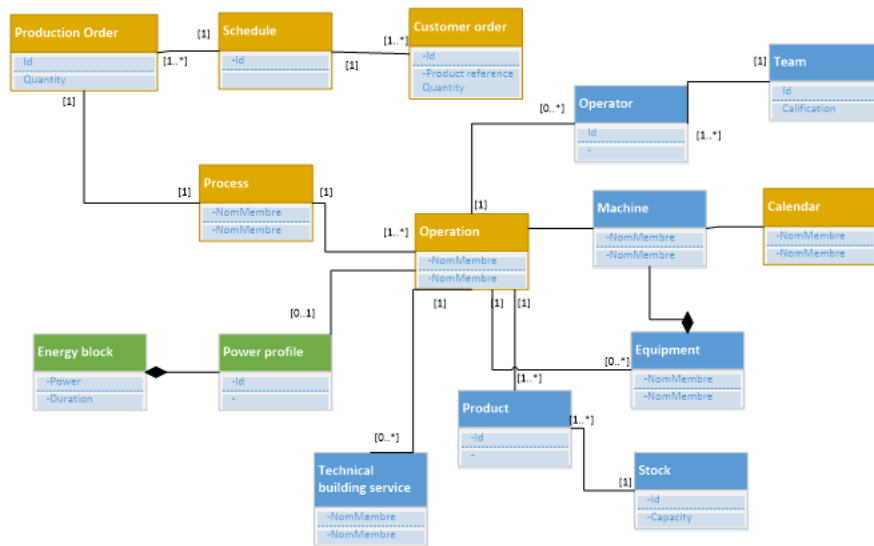


Figure 2. Les modules de la bibliothèque d'objets

y occupe une place importante. Heilala et al. [10] ont utilisé la simulation pour la conception d'un système de production durable. Ils ont présenté des méthodes pour calculer des indicateurs d'efficacité énergétique (EE), des émissions de CO₂ et d'autres impacts environnementaux dans un logiciel de simulation. L'objectif principal était d'évaluer les impacts environnementaux des systèmes de production en phase de conception. Page et Wohlgemuth [11] ont intégré la simulation à événements discrets (SED) dans un contexte d'écologie afin d'explorer les impacts environnementaux et économiques des décisions. Golzarpoor et al. [12] ont intégré la SED avec l'analyse du cycle de vie (ACV) pour modéliser et analyser les impacts environnementaux des produits pendant leur cycle de vie. L'utilisation de la simulation offre la possibilité d'analyser les causes et les effets de divers scénarios où le temps, les ressources et le caractère aléatoire des variables d'entrée affectent le résultat.

Lorsqu'il d'agit du respect de l'environnement, la consommation énergétique devient un élément qui doit être considéré sérieusement. Herrmann et Thiede, [13] ont utilisé la SED pour modéliser le système de production avec toutes ses interactions et sa dynamique en tenant compte de sa consommation énergétique. L'objectif principal de leur approche était d'améliorer l'efficacité énergétique dans les systèmes de fabrication à la fois en phase de conception et de contrôle. La SED a été également utilisé pour prédire la consommation énergétique spécifique aux produits [14] et de leurs variantes [15]. Ces travaux et d'autres [16, 17] avaient un objectif unique : simuler les flux d'énergie et de produit dans un cadre unique pour améliorer l'efficacité énergétique dans les systèmes de production. La problématique principale et commune à ces travaux était la collecte de données pour alimenter les modèles de simulation avec les données de consommation énergétique nécessaires [18]. Avec la transition vers l'industrie 4.0, les modèles de simulation seront plus précis et plus efficaces grâce à un niveau plus élevé de précision et une disponibilité accrue des données d'entrée liées à la production et à l'énergie. Dans cette industrie, les

systèmes connectés aussi appelés « système cyber-physiques » (SCP) seront en mesure de fournir des informations en temps réel sur leur état actuel ou même sur leurs consommations d'énergie. Cependant, l'émergence des SCP, qui sont au cœur de l'industrie du futur, a provoqué plus de complexité et de nouvelles problématiques. Les SCPs désignent une nouvelle génération de systèmes dotés non seulement de capacités physiques mais aussi d'aptitudes au traitement de l'information [19]. Avec ces systèmes, la simulation a évolué pour intégrer la dynamique de la communication avec la dynamique physique permettant la co-simulation [20, 21, 22].

IV. CONCEPT ET EXIGENCES

Auparavant, l'efficacité d'une solution était basée principalement sur la productivité et la qualité. Aujourd'hui, la conception et le contrôle de l'usine du futur seront plus complexes à cause des nouveaux challenges et de nouvelles exigences. Cela a guidé de nouvelles réflexions dans le développement de modèles de simulation. Sur la base de ces exigences (figure 1), nous proposons une plateforme de simulation flexible et modulaire qui peut servir d'outil d'aide à la décision pour la conception de l'usine du futur ou pour son contrôle ultérieurement tout en tenant compte de sa consommation d'énergie. Ce cadre ERDES peut répondre à ces exigences comme suit :

- Le système de production du futur doit être plus flexible et plus réactif, il doit s'adapter au changement. La solution proposée permettra donc de créer un modèle flexible qui pourrait être capable de simuler un éventuel changement avec un effort mineur dans son ajustement.
- Le système de production du futur intégrera des technologies avancées. La solution proposée permettra de tester l'intégration de ces technologies et même évaluer leur efficacité énergétique. Elle peut également aider à concevoir et à dimensionner des installations techniques selon des besoins de productivité mais aussi d'efficacité énergétique.

- Le système de production du futur aura besoin d'une organisation efficace. Le cadre de simulation proposé permettra donc de tester plusieurs scénarios pour aider à faire des choix vers une solution performante (rentable et respectueuse de l'environnement). Le concept de modélisation choisi permettra un couplage facile avec des programmes d'ordonnement prenant en compte des contraintes énergétiques.
- Le système de production du futur doit respecter l'environnement. Il est donc nécessaire d'intégrer les aspects environnementaux au modèle. Ici, nous sommes limités à l'intégration de la consommation d'énergie étant le premier facteur qui contribue au changement climatique. Le cadre ERDES actuel permettra de prédire le comportement énergétique d'un système au cours du temps, ce qui constitue une étape importante vers l'efficacité énergétique.
- Malgré le niveau élevé d'automatisation dans les systèmes de production du futur, le facteur humain reste une composante pertinente de ce système et contribuera à son succès. Le cadre de simulation actuel propose donc d'intégrer le facteur dans l'analyse de ces systèmes et d'étudier son influence à la fois sur la productivité et sur la consommation énergétique.

Le concept adopté pour développer cette solution de simulation intégrant l'énergie est basé sur les opérations. Dans ce travail, un système de production est considéré comme un ensemble d'activités décrites par un processus. Ce processus est une succession d'opérations organisées en série ou en parallèle avec de multiples choix (utilisation d'opérateur, de composant, d'énergie, etc.) pour le rendre aussi générique que possible. Ce concept a été choisi pour offrir une grande flexibilité au modèle. Donc, il sera capable de s'adapter facilement au changement. Le changement du système flexible et reconfigurable peut être simulé et testé en agissant sur les séquences d'opérations. Comme chaque opération demandant de l'énergie est associée à un profil de puissance, les résultats de la simulation comprendront, en plus des résultats liés à la production, des résultats liés au profil de puissance totale, la consommation d'énergie totale, les pics de charge, etc.

V. DÉVELOPPEMENT DE LA PLATEFORME DE SIMULATION

Le développement d'un modèle de simulation est le passage du modèle conceptuel au modèle informatisé qui peut virtuellement reproduire le comportement d'un système. Plusieurs logiciels de simulation ont été développés pour créer ce modèle et pour décrire le système avec le niveau de précision requis pour résoudre un problème prédéfini. Cette description inclut souvent les flux physiques (produits, machines, outils, etc.) et les flux d'information (Kanban, ordres, etc.). Dans le présent travail, nous avons ajouté le flux d'énergie pour créer une plateforme de simulation intégrant l'énergie dans l'environnement ARENA®.

A. Environnement de simulation

ARENA® est un logiciel de simulation largement utilisé par la communauté de modélisation et de simulation. Le logiciel propose plusieurs bibliothèques standards (modules configurables) qui peuvent être utilisés pour construire un modèle avec un haut niveau de complexité. Néanmoins, il peut être difficile voir insatisfaisant de développer un modèle qui répond à un besoin spécifique si une fonction nécessaire n'est pas incluse dans le logiciel notamment la considération de la consommation énergétique. ARENA® offre alors la possibilité de créer des bibliothèques d'objets personnalisés avec des composants de modélisation réutilisables appelés modules. Cela permet de doubler les logiques facilement ce qui est l'un des points forts d'ARENA®. Le but principal du travail actuel est alors de développer une bibliothèque d'objets qui permettra de construire facilement et rapidement un modèle ERDES.

B. Conception de la bibliothèque d'objets

Suivant le concept décrit dans la section 4, l'élément de base de la bibliothèque est le module « Opération ». Cette réflexion est due à la nécessité de développer une plateforme de simulation de qualité qui répond à plusieurs critères de flexibilité, de réutilisation, de facilité d'utilisation et de la possibilité de collaborer avec des programmes d'ordonnement sous des contraintes énergétiques. Comme le système de production est l'interaction entre plusieurs éléments interdépendants, chaque opération de production peut interagir avec un ou plusieurs de ces éléments. Ainsi, le module « Opération » a été créé avec plusieurs options qui peuvent être commutées ou non par l'utilisateur. Ce module rend le modèle très flexible et facile à ajuster pour répondre à un changement possible dans le système de production. En effet, l'activité de fabrication présentée par un module "processus" est décrite par une succession de "Opération" configurés selon le comportement réel du système. Lors de la conception de la bibliothèque d'objets, les modules ont été classés en 3 catégories, toutes avec une relation directe ou indirecte avec le module « opération ».

La figure 2 illustre ces catégories dans un diagramme de classes UML. Les modules sont de couleurs différentes selon la catégorie à laquelle il appartient : modules organisation de production en jaune, modules ressources en bleu clair et modules de consommation d'énergie en vert.

- Modules d'organisation de la production : ces modules permettront de décrire la façon dont la production sera organisée pour répondre aux commandes des clients. Les commandes clients génèrent un calendrier de production avec une liste d'ordres de production avec toutes les informations requises. Chaque ordre de production est associé à un processus décrit par une succession d'opérations. Le module calendrier est également considéré parmi les modules d'organisation de la production pour indiquer les temps de marche et d'arrêt de la production.

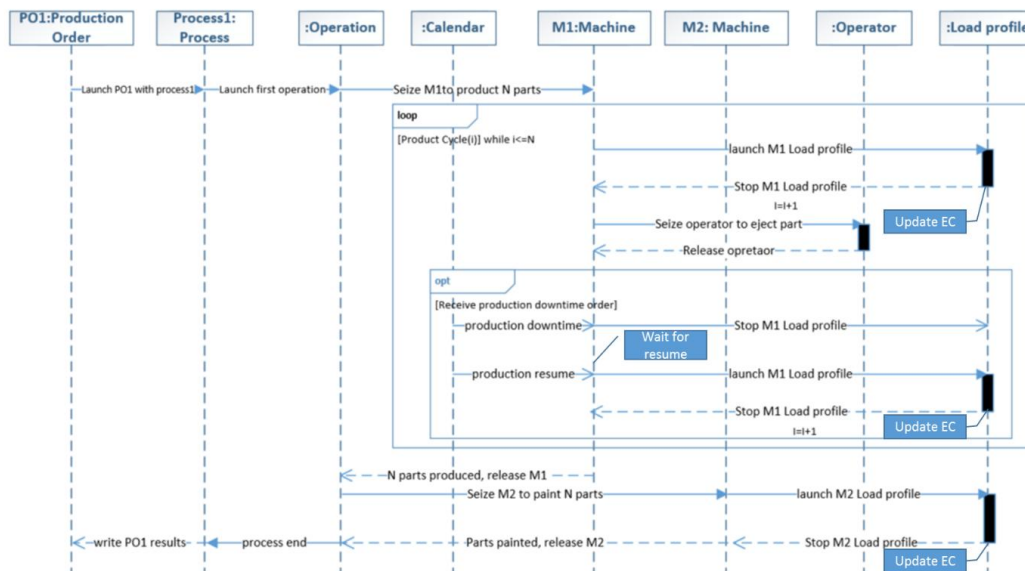


Figure 3. Interaction entre les modules- Diagramme de séquence

- Modules de ressources : cela comprend les ressources matérielles et humaines nécessaires à l'exécution d'une opération de production. Une opération peut nécessiter une machine, un opérateur, un outil ou des utilités (air comprimé, système de refroidissement, etc.). Les étapes du processus peuvent être divisées selon le niveau de détails souhaité.
- Modules de consommation d'énergie : ces modules permettront de gérer la consommation d'énergie liée à l'activité de production, y compris l'activation / désactivation du profil de puissance associé, la génération du profil de puissance totale et la mise à jour de la consommation totale d'énergie.

C. Exemple

Dans cette section, l'utilisation de la bibliothèque d'objets est illustrée par une étude de cas simple. Le diagramme de séquence présenté dans la figure 3 décrit la collaboration des modules pour simuler la réponse du système à un ordre de fabrication. Ce schéma est utile pour montrer l'aspect dynamique du modèle et mettre en avant les interactions entre les différents objets dans un ordre chronologique. Pour simplifier la lecture, seuls les modules pertinents sont présentés dans le diagramme. Dans cet exemple, le système de production est composé de deux machines. La première met en forme les pièces et la seconde les peint. La première machine (M1) a une capacité unitaire et la seconde (M2) a une capacité N. Ensuite, les pièces sont stockées dans une file d'attente à la sortie de M1 pour être peintes par lot par M2. Alors que M1 a besoin d'un opérateur pour éjecter des pièces, M2 est complètement automatisée.

La première interaction est créée pour simuler l'arrivée d'un Ordre de Fabrication (OF) et pour transmettre toutes les informations requises relatives à cet OF (référence produit, quantité, processus, etc.). Le module « processus » est en charge de définir la séquence d'opérations à exécuter pour compléter l'OF. Il transmettra alors l'entité à la première

opération. Le troisième message simule la saisie de M1 pour exécuter la première opération. Cette opération sera exécutée autant de fois que le nombre de pièces à produire est atteint. Le profil de puissance correspondant est lancé à chaque cycle de production et la consommation d'énergie totale est actualisée à chaque fin d'opération. A la réception d'un ordre d'arrêt du calendrier, la machine est arrêtée et on arrête donc le profil de puissance associé. La fin de ce temps d'arrêt générera une nouvelle requête pour reprendre la production et donc réactiver le profil de charge. Notons la possibilité de maintenir le préchauffage d'une machine durant les périodes d'arrêt calendrier.

La libération de M1 débloquera la transition vers la deuxième opération du processus. Une nouvelle requête de saisie M2 est générée. Un second profil de puissance associé à M2 est lancé jusqu'à la fin de l'opération. Le dernier message sera envoyé comme réponse à l'OF pour écrire les résultats de production (heure de fin, occupation des machines, consommation d'énergie totale, etc.).

VI. CONCLUSIONS

Dans ce travail, nous avons développé un cadre de simulation intégrant l'énergie qui pourrait être un outil fiable pour supporter les décisions lors de la conception ou la commande des systèmes de production tout en tenant compte de leur consommation énergétique. Le point de départ de cette réflexion était les nouveaux défis de l'industrie du futur et par conséquent la façon d'adapter les modèles de simulation à ces exigences. Cela a été achevé par le développement d'une nouvelle plateforme de SED intégrant l'énergie. Ce cadre propose un ensemble de modules configurables. Cette plateforme permet de créer rapidement et facilement des modèles de SED liés à l'énergie en utilisant un ensemble de modules interconnectés. L'objectif principal était de garantir une grande flexibilité et modularité aux modèles de simulation qui peuvent alors faire face à la flexibilité accrue des systèmes de production de demain avec un simple ajustement du

modèle. Notons que ce travail a été développé dans le cadre du projet ECOTHER, financé par la BPI et regroupant une dizaine d'industriels dans le domaine de la production de produits en élastomère.

VII. REFERENCES

- [1] Esmaeilian, B., Behdad, S., Wang, B., 2016. The evolution and future of manufacturing: A review. *J. Manuf. Syst.* 39, 79–100. doi:10.1016/j.jmsy.2016.03.001
- [2] Usine du futur? Industrie du futur?, 2016. available online on http://www.limousin.cci.fr/usine-du-futur-industrie-du-futur.html?file=tl_files/cci-limousin/contenus/PDF/Pole%20Strategie%20et%20Innovation/Monographie%20-%20Usine%20du%20Futur.%20v2.pdf (last accessed 10/10/2016).
- [3] Schumacher, A., Erol, S., Sihn, W., 2016. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP, The Sixth International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2016)* 52, 161–166. doi:10.1016/j.procir.2016.07.040
- [4] Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M., n.d. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries [WWW Document]. www.bcgperspectives.com. URL https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/ (accessed 11.8.16).
- [5] Smith, J.S., 2003. Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *J. Manuf. Syst.* 22, 157–171.
- [6] Cardin, O., Castagna, P., 2009. Using online simulation in Holonic Manufacturing Systems. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 22, 1025–1033.
- [7] Frantzen, M., Ng, A.H.C., Moore, P., 2011. A simulation-based scheduling system for real-time optimization and decision making support. *Robot. Comput.-Integr. Manuf., Conference papers of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing Intelligent manufacturing and services* 27, 696–705. doi:10.1016/j.rcim.2010.12.006
- [8] Heilala, J., Montonen, J., Järvinen, P., Kivikunnas, S., Maantila, M., Sillanpää, J., Jokinen, T., 2010. Developing simulation-based Decision Support Systems for customer-driven manufacturing operation planning, in: *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter*. Presented at the Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter, pp. 3363–3375. doi:10.1109/WSC.2010.5679027
- [9] Mahdavi, I., Shirazi, B., Solimanpur, M., 2010. Development of a simulation-based decision support system for controlling stochastic flexible job shop manufacturing systems. *Simul. Model. Pract. Theory* 18, 768–786. doi:10.1016/j.simpat.2010.01.015
- [10] Heilala, J., Vatanen, S., Tonteri, H., Montonen, J., Lind, S., Johansson, B., Stahre, J., 2008. Simulation-based sustainable manufacturing system design, in: *Simulation Conference, 2008. WSC 2008. WSC 2008. Winter*. Presented at the Simulation Conference, 2008. WSC 2008. Winter, pp. 1922–1930. doi:10.1109/WSC.2008.4736284
- [11] Page, B., Wohlgenuth, V., 2010. Advances in environmental informatics: integration of discrete event simulation methodology with ecological material flow analysis for modelling eco-efficient systems. *Procedia Environ. Sci.* 2, 696–705.
- [12] Golzarpoor, H., González, V., Poshdar, M., Golzarpoor, H., González, V., Poshdar, M., 2013. Improving construction environmental metrics through integration of discrete event simulation and life cycle analysis. *ISARC Proc. 2013 Proceedings of the 30th ISARC, Montréal, Canada*, 130–139.
- [13] Herrmann, C., Thiede, S., 2009. Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol., Life Cycle Engineering* 1, 221–229. doi:10.1016/j.cirpj.2009.06.005
- [14] Rahimifard, S., Seow, Y., Childs, T., 2010. Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 59, 25–28. doi:10.1016/j.cirp.2010.03.048
- [15] Kohl, J., Spreng, S., Franke, J., 2014. Discrete event simulation of individual energy consumption for product-varieties. *Procedia CIRP* 17, 517–522.
- [16] Kruse, A., Uhlemann, T.H.-J., Steinhilper, R., 2015. Simulation-based assessment and optimization of the energy consumption in multi variant production, in: *Decoupling Growth from Resource Use. Proceedings 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, p. 6.
- [17] Wilson, J., Arokiam, A., Belaidi, H., Ladbrook, J., 2016. A simple energy usage toolkit from manufacturing simulation data. *J. Clean. Prod.* 122, 266–276. doi:10.1016/j.jclepro.2015.11.071
- [18] Kouki, M., Cardin, O., Castagna, P., Cornardeau, C., 2017. Input data management for energy related discrete event simulation modelling. *J. Clean. Prod.* 141, 194–207. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.061
- [19] Baheti, R., Gill, H., 2011. Cyber-physical systems. *Impact Control Technol.* 12, 161–166.
- [20] Al-Hammouri, A.T., 2012. A comprehensive co-simulation platform for cyber-physical systems. *Comput. Commun.* 36, 8–19. doi:10.1016/j.comcom.2012.01.003
- [21] Ben Khaled, A., Ben Gaid, M., Pernet, N., Simon, D., 2014. Fast multi-core co-simulation of Cyber-Physical Systems: Application to internal combustion engines. *Simul. Model. Pract. Theory* 47, 79–91. doi:10.1016/j.simpat.2014.05.002
- [22] Zhang, Z., Eyisi, E., Koutsoukos, X., Porter, J., Karsai, G., Sztipanovits, J., 2014. A co-simulation framework for design of time-triggered automotive cyber physical systems. *Simul. Model. Pract. Theory* 43, 16–33. doi:10.1016/j.simpat.2014.01.001