

	Proposition de sujet de thèse	Document	Page
		Date Avril 2024	1 / 7 Edition V1

1 DONNEES ADMINISTRATIVES

Unité de recherche	Département Conception, Optimisation et Modélisation en Mécanique – CO2M
Laboratoire	Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne – ICB – UMR CNRS 6303
Partenaire industriel	
Université	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Contacts	Directeur de thèse : Prof. Samuel GOMES (samuel.gomes@utbm.fr) – ICB/CO2M
	Co-directeur : Professeur Sebti FOUFOU – ICB/CO2M

2 SUJET DE RECHERCHE

Titre :

Méthodes et outils pour l'intégration de Systèmes Cyber-physiques aux Jumeaux Numériques Perceptifs-Cognitifs-Proactifs pour la Conception, la Simulation et l'Aide au Pilotage des installations – Application aux Systèmes Industriels 4.0 et aux Bâtiments Intelligents

Mots clés : Méthodes et outils de conception, Systèmes Cyber-physiques, Jumeaux numériques, Intelligence artificielle, Application : Smart Factory et Smart Building

3 CONTEXTE DE RECHERCHE

Les avancées dans les technologies de l'industrie 4.0 et des bâtiments intelligents ont permis l'émergence de nouveaux paradigmes de conception, de simulation et de pilotage. Les jumeaux numériques cognitifs, en tant qu'outils intégrés, offrent un potentiel immense pour améliorer l'efficacité opérationnelle, la prise de décision et la gestion des risques dans ces environnements complexes.

Les jumeaux numériques perceptifs-cognitifs-proactifs représentent une évolution avancée des jumeaux numériques traditionnels, intégrant des capacités supplémentaires pour la perception, la cognition et l'action proactive. Chacun de ces volets sont décrits ci-après :

- **Perceptifs** : Les jumeaux numériques perceptifs sont capables de percevoir et d'interpréter des données provenant de capteurs, de dispositifs IoT (Internet des objets) et d'autres sources, afin de représenter fidèlement l'état et le comportement d'un système réel. Ils utilisent des techniques telles que la collecte de données en temps réel, le traitement du signal et la vision par ordinateur pour capturer des informations sur l'environnement physique.
- **Cognitifs** : Les jumeaux numériques cognitifs vont au-delà de la simple représentation des données pour intégrer des capacités de raisonnement, d'analyse et de compréhension. Ils utilisent des algorithmes d'intelligence artificielle, tels que l'apprentissage automatique et les réseaux neuronaux, pour interpréter les données perçues, détecter les modèles, anticiper les comportements et prendre des décisions en fonction du contexte.
- **Proactifs** : Les jumeaux numériques proactifs vont encore plus loin en utilisant les informations perçues et les analyses cognitives pour prendre des mesures anticipatives et préventives. Ils peuvent simuler différents scénarios, évaluer les risques potentiels et recommander des actions pour optimiser les performances, prévenir les pannes ou répondre de manière proactive aux changements de l'environnement.

Les jumeaux numériques perceptifs-cognitifs-proactifs représentent une représentation virtuelle avancée d'un système réel, capable non seulement de percevoir et de comprendre son environnement, mais aussi d'anticiper et de réagir de manière proactive aux événements et aux défis potentiels. Ces capacités étendues en

	Proposition de sujet de thèse	Document	Page 2 / 7
		Date Avril 2024	Edition V1

font des outils puissants pour la conception, la simulation et la gestion des systèmes complexes dans divers domaines tels que l'industrie, les infrastructures urbaines et les services.

Pour assurer le fonctionnement des volets perceptifs et proactifs, il est nécessaire de coupler le jumeau numérique à des systèmes Cyber-Physiques (CPS). Les CPS sont des systèmes intégrés où des composants informatiques et des dispositifs physiques interagissent étroitement pour contrôler et surveiller des processus du monde réel. En effet, les systèmes cyber-physiques combinent des composants informatiques, tels que des capteurs, des actionneurs et des processeurs, avec des composants physiques, tels que des machines, des véhicules et des infrastructures, pour former un système intégré et interconnecté. Ces systèmes présents dans divers domaines tels que l'industrie manufacturière, les transports intelligents, la santé connectée et les villes intelligentes sont capables de percevoir, de communiquer, de calculer et d'agir sur l'environnement physique dans lequel ils opèrent.

En ce qui concerne le couplage des systèmes Cyber-Physiques avec les Jumeaux Numériques, il consiste à créer une liaison bidirectionnelle entre le système réel et sa représentation virtuelle :

- Du CPS au jumeau numérique : Les données collectées par les capteurs du CPS sont utilisées pour mettre à jour le jumeau numérique, permettant une surveillance en temps réel et une analyse de l'état du système. Les modèles de simulation peuvent également être utilisés pour prédire le comportement du système dans différentes conditions.
- Du jumeau numérique au CPS : Les informations et les analyses issues du jumeau numérique peuvent être utilisées pour optimiser le contrôle et la gestion du CPS. Par exemple, les recommandations de maintenance prédictive basées sur l'analyse du jumeau numérique peuvent être transmises au système réel pour prolonger la durée de vie des équipements et éviter les pannes.

En intégrant les jumeaux numériques dans les systèmes cyber-physiques, les organisations académiques, industrielles ou les collectivités peuvent bénéficier d'une meilleure visibilité, d'une prise de décision plus éclairée, d'une optimisation des performances et d'une réduction des coûts de maintenance et d'exploitation.

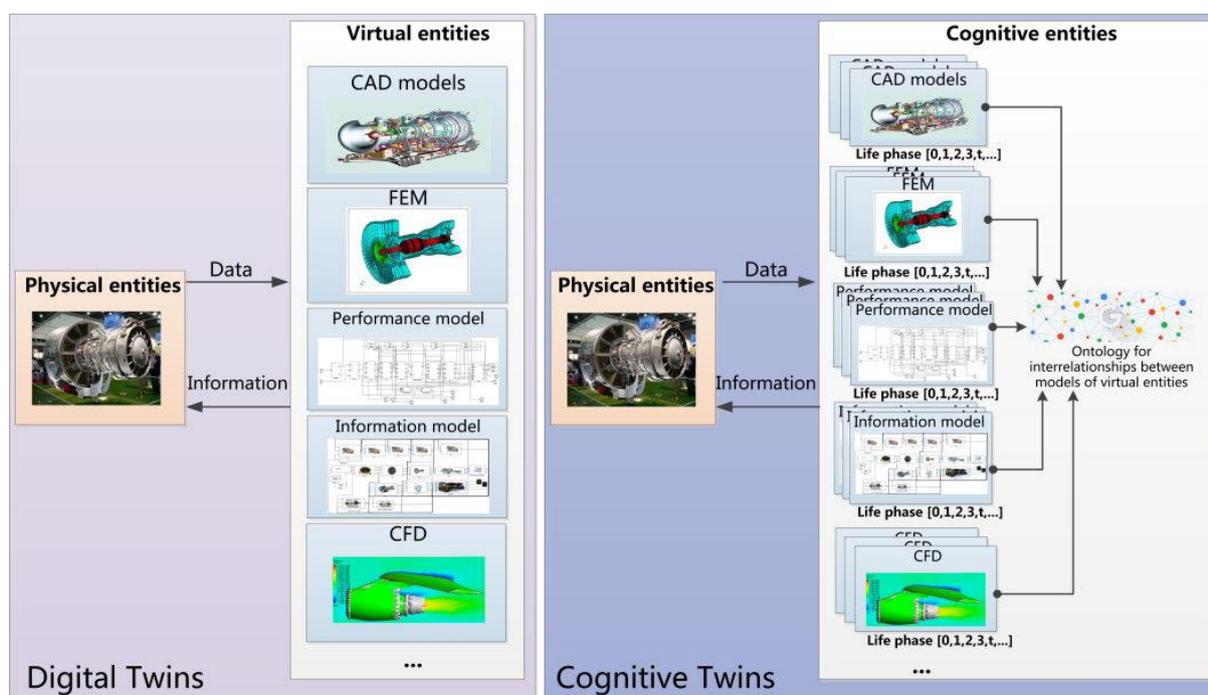


Figure 1 : Digital Twins vs Cognitive Twins [Lu et al., 2020]

	Proposition de sujet de thèse	Document	Page 3 / 7
		Date Avril 2024	Edition V1

4 OBJECTIFS DE RECHERCHE ET CONTRIBUTION ATTENDUE

Les travaux de recherche que nous proposons de mettre en place dans le cadre du contrat doctoral visent à explorer les méthodes et les outils dédiés à l'intégration des Systèmes Cyber-physiques aux jumeaux numériques perceptifs-cognitifs-proactifs pour la conception, la simulation et l'aide au pilotage, en se concentrant spécifiquement sur les îlots de fabrication pour l'Industrie 4.0 et les bâtiments intelligents pour la smart city.

La recherche sera menée en plusieurs étapes, comprenant une revue de la littérature approfondie, des études de cas, des expérimentations et des évaluations quantitatives et qualitatives existantes. Des méthodes de modélisation et de simulation avancées seront utilisées pour concevoir et développer les jumeaux numériques cognitifs, en tenant compte des spécificités des environnements industriels 4.0 et des bâtiments intelligents. Pour ce faire, il s'agit :

1. d'effectuer un état de l'art des jumeaux numériques perceptifs-cognitifs-proactifs et de leurs applications dans les systèmes de production industriels 4.0 et dans les bâtiments intelligents.
2. d'identifier les principaux défis et opportunités liés à l'intégration des jumeaux numériques cognitifs dans la conception, la simulation et l'aide au pilotage des îlots de fabrication et des bâtiments intelligents.
3. de développer des méthodes et des outils innovants pour la création, la gestion et l'exploitation des jumeaux numériques perceptifs-cognitifs-proactifs adaptés aux besoins spécifiques des environnements industriels 4.0 et des bâtiments intelligents.
4. d'évaluer l'efficacité et les performances des jumeaux numériques cognitifs intégrés dans des cas d'étude représentatifs d'îlots de fabrication de type industrie 4.0 et de bâtiments de type smart building.



Figure 2 : Basic Cognitive Digital Twins enablers [Kalaboukas et al., 2020]

Cette recherche contribuera à enrichir la compréhension des jumeaux numériques cognitifs et de leur potentiel dans les environnements industriels 4.0 et les bâtiments intelligents. Les méthodes et les outils développés pourront être utilisés par les praticiens et les chercheurs pour améliorer la conception, la simulation et le pilotage de ces environnements complexes, ouvrant ainsi la voie à des innovations significatives en matière d'efficacité opérationnelle, de durabilité et de gestion des risques.

	Proposition de sujet de thèse	Document	Page 4 / 7
		Date Avril 2024	Edition V1

L'originalité des travaux de recherche se situe d'abord dans le caractère générique des modèles et métamodèles proposés mais aussi dans l'hybridation entre modélisation numérique 3D des systèmes, mesure temps réel de grandeurs physiques, modélisation et gestion des connaissances, processus de cognition à base d'Intelligence artificielle, système d'aide à la décision pour l'hyperviseur humain et de système de commande des dispositifs physiques existants.

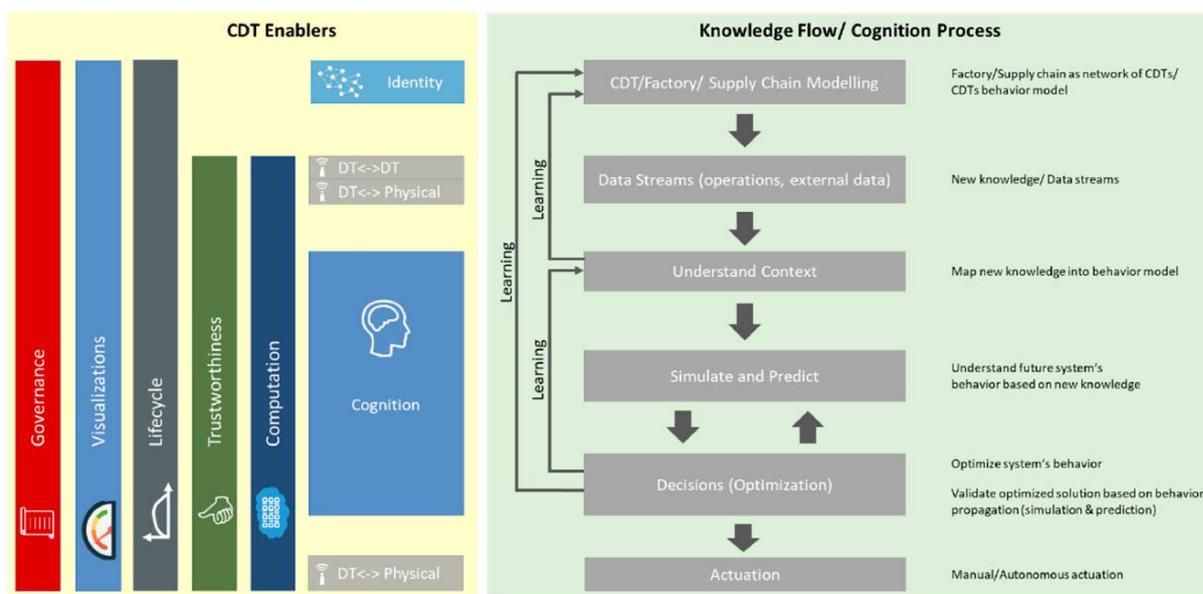


Figure 3 : Cognitive Digital Twins operational model [Kalaboukas et al., 2020]

5 OBJECTIFS DE RECHERCHE ET CONTRIBUTION ATTENDUE

Ce caractère générique des méthodes et outils qui seront développés dans le cadre de la thèse, devra être confronté à plusieurs cas d'application afin d'en expérimenter la robustesse. Ces différents cas d'application font d'ores et déjà l'objet de preuves de concept opérationnelles dont il faudra extraire les invariants. Les modèles et métamodèles élaborés serviront de creuset aux méthodes et aux futurs des outils à construire permettant de les redéployer dans plusieurs autres cas d'application.

Un projet de start-up est d'ores et déjà en réflexion, avec un porteur de projet identifié, et plusieurs nouveaux cas d'application sont en attente de déploiement. Le Pôle de compétitivité de la Région Grand-Est « Build and Connect » et plusieurs adhérents industriels regroupés au sein du « Club Smart Grid Grand-Est » est également en attente des résultats de la recherche qui seront réalisés.

6 CAS D'APPLICATION CIBLES POUR L'EXPERIMENTATION

Plusieurs cas d'application ont d'ores et déjà été ciblés pour développer le volet expérimental du projet de recherche proposé. Ces différents cas d'application disposent d'ores et déjà de preuves de concepts démontrant leur faisabilité et leur pertinence. Ces cas d'application seront utilisés pour expérimenter le caractère générique des méthodes et des outils développés, et pour valider leur déployabilité à plus grande échelle :

- La plateforme TITAN de l'UTBM, avec ses différents équipements dont des imprimantes 3D et 4D, qui conviendra de superviser en vue d'en optimiser le fonctionnement,

	Proposition de sujet de thèse	Document	Page 5 / 7
		Date Avril 2024	Edition V1

- La ligne pilote actuelle du Pôle Industrie 4.0 de l'UTBM à transformer en ligne d'assemblage reconfigurable 4.0, ou usine 4.0, à mettre en place dans le cadre du dispositif CMQ et du futur dispositif Crunch Industrie de l'UTBM

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. WMF. The 2020 World Manufacturing Report: Manufacturing in the Age of Artificial Intelligence. Available online: https://worldmanufacturing.org/wp-content/uploads/WorldManufacturingForum2020_Report.pdf (accessed on 13 February 2021).
2. Pearson, H.; Noble, G.; Hawkins, J. Redistributed Manufacturing Workshop Report; EPSRC-Engineering and Physical Sciences Research Council, 2013. Available online: <https://epsrc.ukri.org/newsevents/pubs/re-distributed-manufacturing-workshopreport/> (accessed on 13 February 2021).
3. Deloitte. Business Ecosystems Come of Age. 2017. Available online: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/platform-strategy-new-level-business-trends/DUP_1048-Business-ecosystems-come-of-age_MASTER_FINAL.pdf (accessed on 18 January 2021).
4. EFFRA. Factories 4.0 and Beyond: Recommendations for the Work Programme 18-19-20 of the FoF PPP under Horizon 2020. 12 September 2016. Available online: https://www.effra.eu/sites/default/files/factories40_beyond_v31_public.pdf (accessed on 23 October 2020).
5. ElMaraghy, H.; Schuh, G.; Piller, F.; Schönsleben, P.; Tseng, M.; Bernard, A. Product variety management. CIRP Ann. 2013, 62, 629–652. [CrossRef]
6. Kiritsis, D. Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things. Comput. Des. 2011, 43, 479–501. [CrossRef]
7. Schuh, G.; Rebutisch, E.; Dölle, C.; Mattern, C.; Volevach, G.; Menges, A. Defining Scaling Strategies for the Improvement of Agility Performance in Product Development Projects. Procedia CIRP 2018, 70, 29–34. [CrossRef]
8. IDC. IDC Manufacturing Insights; IDC: Needham, MA, USA, 2014.
9. McKinsey. Industry4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector, McKinsey Digital. 2015. Available online: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/industry-four-point-o-how-to-navigae-thedigitization-of-the-manufacturing-sector> (accessed on 1 October 2020).
10. CGI. CGI Client Global Insights 2018 for Manufacturing, Summary. 2018. Available online: <https://www.cgi.com/en/media/white-paper/manufacturing-client-global-insights-2018> (accessed on 2 February 2021).
11. Grieves, M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. White Paper 2014, 1, 1–7.
12. Tao, F.; Qi, Q.; Wang, L.; Nee, A. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. Engineering 2019, 5, 653–661. [CrossRef]
13. Gartner. Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. 2018. Available online: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-15-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2019> (accessed on 16 September 2020).

	Proposition de sujet de thèse	Document	Page
		Date Avril 2024	6 / 7 Edition V1

14. Qi, Q.; Tao, F.; Zuo, Y.; Zhao, D. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access* 2018, 6, 3585–3593. [CrossRef]
15. DIGICOR. DIGICOR H2020 Project: Decentralized Agile Coordination across Supply Chains; DIGICOR. Available online: <https://www.digicor-project.eu/> (accessed on 12 November 2020).
16. Heutger, M.; Kuechelhaus, M. Digital Twins in Logistics: A DHL Perspective on the Impact of Digital Twins in the Logistics Industry; DHL, 2019. Available online: <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twins-inlogistics.pdf> (accessed on 12 December 2020).
17. Rojas, R.A.; Rauch, E. From a literature review to a conceptual framework of enablers for smart manufacturing control. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 104, 517–533. [CrossRef]
18. Kritzinger, W.; Karner, M.; Traar, G.; Henjes, J.; Sihm, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC Papers OnLine* 2018, 51, 1016–1022. [CrossRef]
19. Minerva, R.; Lee, G.M.; Crespi, N. Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. *Proc. IEEE* 2020, 108, 1785–1824. [CrossRef]
20. Grieves, M.; Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*; Springer: Berlin, Germany, 2017; pp. 85–113.
21. Rozanec, J.; Lu, J.; Rupnik, J.; Skrjanc, M.; Mladenic, D.; Fortuna, B.; Zheng, X.; Kiritsis, D. Actionable Cognitive Twins for Decision Making in Manufacturing. 23 March 2021. Available online: <https://arxiv.org/pdf/2103.12854v1.pdf> (accessed on 24 March 2021).
22. Lu, J.; Zheng, X.; Gharaei, A.; Kalaboukas, K.; Kiritsis, D. Cognitive twins for supporting decision-makings of Internet of Things systems. In *Proceedings of the 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*, Belgrade, Serbia, 1–4 June 2020.
23. P. Industrie4.0. RAMI4.0: A Reference Model for Digitalization. 9 August 2018. Available online: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html> (accessed on 24 November 2020).
24. Cheng, J.; Zhang, H.; Tao, F.; Juang, C.-F. DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing. *Robot. Comput. Manuf.* 2020, 62, 101881. [CrossRef]
25. Qi, Q.; Tao, F.; Zuo, Y.; Zhao, D. Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. *Procedia CIRP* 2018, 72, 237–242. [CrossRef]
26. Tao, F.; Zhang, H.; Liu, A.; Nee, A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2019, 15, 2405–2415. [CrossRef]
27. Lu, Y.; Liu, C.; Wang, K.I.-K.; Huang, H.; Xu, X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robot. Comput. Manuf.* 2020, 61, 101837. [CrossRef]
28. Ellis, S.; Hand, L.; Ortis, I.; The Future of the Supply Chain: Disrupt or to Be Disrupted. IDC Sponsored by Oracle. September 2018. Available online: <https://www.oracle.com/a/ocom/docs/industries/idc-disrupt-or-be-disrupted-wp.pdf> (accessed on 7 February 2021).
29. Schützer, K.; Bertazzi, J.D.A.; Sallati, C.; Anderl, R.; Zancul, E. Contribution to the development of a Digital Twin based on product lifecycle to support the manufacturing process. *Procedia CIRP* 2019, 84, 82–87. [CrossRef]
30. Kalaboukas, K.; Lioudakis, G.; Koukovini, M.; Papagiannakopoulou, E.; Morabito, G.; Dellas, N.; Zacharias, M.; Quattropani, S.; Samarotto, M.; Jermol, M.; et al. Cognitive Logistics Operations through Secure, Dynamic and ad-hoc Collaborative Networks: The COG-LO Project. In *Proceedings of the 6th International Physical Internet Conference*, 9–11 July 2019, London, UK.
31. Suhail, R.; Hussain, R.; Jurdak, R.; Hong, C.S. Trustworthy Digital Twins in the Industrial Internet of Things with Blockchain. 2020. Available online: <https://arxiv.org/abs/2010.12168> (accessed on 15 February 2021).

	Proposition de sujet de thèse	Document	Page
		Date Avril 2024	7 / 7 Edition V1

32. Defining Governance (IoG). Available online: <https://iog.ca/what-is-governance/> (accessed on 17 January 2021).
33. Nochta, T.; Badstuber, N.; Wahby, N. On the Governance of City Digital Twins—Insights from the Cambridge Case Study; Centre for Digital Built Britain. 2019. Available online: <https://doi.org/10.17863/CAM.41083> (accessed on 14 January 2021).
34. Otto, B.; Jurgens, J.; Schon, J.; Auer, S.; Menz, N.; Wenzel, S.; Cirullies, J. Industrial Data Space: Digital Sovereignty over Data. 2016. Available online: <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/fields-of-research/industrial-data-space/whitepaperindustrial-data-space-eng.pdf> (accessed on 6 February 2021).
35. Schroder, J.; Held, B.; Neuhaus, F.; Kasser, M.; Klink, C.; Tatomir, S. Fast Forwarding Last-Mile Delivery—Implications for the ECOSYSTEM; McKinsey&Company, 2018. Available online: <https://www.mckinsey.com/~{}media/mckinsey/industries/travel%20logistics%20and%20infrastructure/our%20insights/technology%20delivered%20implications%20for%20cost%20customers%20and%20competition%20in%20the%20last%20mile%20ecosystem/fast-forwarding-last-mile-delivery-implications-for-theecosystem.pdf> (accessed on 19 December 2020).
36. Saracco, R. Available online: <https://cmte.ieee.org/futuredirections/2020/07/17/the-economics-of-the-digital-transformationxii/> (accessed on 17 July 2020).
37. Joerss, M.; Neuhaus, F.; Schroder, J. How Customer Demands Are Reshaping Last-Mile Delivery; McKinsey&Company, 19 October 2016. Available online: <https://www.mckinsey.com/industries/travel-logistics-and-infrastructure/our-insights/how-customerdemands-are-reshaping-last-mile-delivery#> (accessed on 15 March 2021).
38. Jinzhi Lu, Xiaochen Zheng, Ali Gharaei, Kostas Kalaboukas, Dimitris Kiritsis, “Cognitive Twins for Supporting Decision-Makings of Internet of Things Systems” Int Conf Industry 4.0 APM2020, 2020.
39. Ahmad Ali Hakam Dani, Suhono Harso Supangkat, Fetty Fitriyanti Lubis, Gusti Bagus Baskara Nugraha, Rezky Kinanda and Irma Rizkia, Development of a Smart City Platform Based on Digital Twin - Technology for Monitoring and Supporting Decision-Making, Sustainability, 2023