**Title:** From Warehouse Management Systems to Digital Twins: Transition or Transformation?

**Abstract**

This article explores the conceptual and practical links between Warehouse Management Systems (WMS) and Digital Twins (DT), examining whether WMS can evolve into DTs. It introduces a structured evaluation framework to assess the characteristics of DTs and applies this framework to modern WMS. The work highlights the gaps and future directions necessary to bridge the two paradigms.

1. **Definition of a Digital Twin**

Plusieurs définitions de jumeaux numériques existent : une simulation multidisciplinaire intégrée d'un système physique, un modèle virtuel d'un actif physique, ou un reflet de la vie d'un produit en utilisant des capteurs [6]. Les jumeaux numériques sont considérés comme un outil polyvalent, applicable à différents domaines [6].

A Digital Twin is a virtual representation of a physical entity or system, synchronized in real-time with its physical counterpart and enabling continuous data flow and interaction. This connection allows for simulation, analysis, and informed decision-making throughout the lifecycle of the physical entity (Grieves & Vickers, 2017; Tao & Zhang, 2017). Digital Twins facilitate the integration of physical and digital systems, enhancing operational efficiency, predictive maintenance, and system resilience (Kritzinger et al., 2018).

The concept was first introduced by Grieves (2003) within the context of Product Lifecycle Management (PLM), emphasizing the duality between the physical product and its digital counterpart. Later, Grieves and Vickers (2017) refined the definition to highlight its role in addressing unpredictable emergent behaviors in complex systems.

Digital Twins have been adopted in various domains. For instance, in manufacturing, they enable real-time monitoring, optimization, and predictive analytics on production processes (Tao & Zhang, 2017). In smart cities, they support resource optimization and urban planning, while in healthcare, they model patient-specific treatment scenarios (Negri et al., 2017; Ivanov & Dolgui, 2021). Similarly, in warehousing and supply chain contexts, Digital Twins provide end-to-end visibility of inventory, simulate disruptions, and optimize logistics operations to enhance supply chain resilience (Ivanov & Dolgui, 2021; Negri et al., 2017).

As a categorical framework for understanding Digital Twins, Fuller et al. (2020) classify them into three primary types:

1. **Digital Models:** Representations of physical entities without a two-way connection.
2. **Digital Shadows:** Reflect changes in physical entities to the digital counterpart in real-time.
3. **Digital Twins:** Establish a bi-directional data exchange between the physical and digital components.

Il existe un manque d'uniformité dans la définition d'un jumeau numérique, ce qui rend essentielle l'élaboration d'un cadre de normalisation [1, 2, 3].

Les jumeaux numériques sont souvent considérés comme la prochaine étape de la simulation, car ils sont construits à partir de la création d'un environnement virtuel imitant le système physique et interagissant constamment avec lui [4].

Les jumeaux numériques sont vus comme un moyen de combler le fossé entre le monde physique et le monde numérique, permettant une boucle de rétroaction continue pour l'amélioration des produits et des processus [5].

***Caractéristiques essentielles :***

Données en temps réel : Les jumeaux numériques doivent utiliser des données en temps réel pour représenter fidèlement l'état de leur contrepartie physique [5, 7]. L'intégration de données robustes est essentielle pour une représentation d’haute-fidélité [7]. Les données en temps réel permettent la détection d'anomalies comportementales [8].

Intégration : Un jumeau numérique doit intégrer des données provenant de diverses sources et de différents niveaux, y compris des données de composants, de physique, de processus, de comportements et de règles [5, 7, 8]. L'interopérabilité entre différents systèmes et domaines est également essentielle [9].

Fidélité : La représentation virtuelle doit être fidèle à l'objet physique qu'elle représente [5, 7]. La fidélité fait référence à la précision et à l'exactitude avec lesquelles la représentation virtuelle d'un système, d'un objet ou d'un processus correspond à son équivalent physique. Il s'agit de la capacité du JN à refléter les caractéristiques, les comportements et les états du système physique qu'il représente. Un JN avec une haute fidélité est capable de simuler avec une grande précision le comportement de son homologue physique. Un niveau de fidélité trop élevé peut entraîner des coûts [10] et une complexité inutiles. Par exemple, un JN axé sur la consommation d'énergie d'une usine peut seulement exiger des données de consommation électrique [11].

Autonomie : Les jumeaux numériques doivent être capables de s'auto-surveiller, de s'auto-diagnostiquer, de s'auto-optimiser, et d'adapter leur comportement en fonction de l'environnement réel [6]. Une autonomie accrue est un aspect important pour les applications futures [5].

Capacité d'évolution continue : Les jumeaux numériques doivent être capables d'évoluer continuellement en s'adaptant aux changements de l'environnement physique [6, 4]. Ils doivent être capables d'apprendre et de s'améliorer avec le temps [5].

Bidirectionnalité : Un jumeau numérique doit permettre une communication bidirectionnelle entre le modèle virtuel et l'entité physique, cela inclut la transmission de données du système physique vers le jumeau virtuel, et vice versa [5]. Cette bidirectionnalité permet le contrôle en temps réel [3].

Modélisation Multimodale : Les jumeaux numériques doivent pouvoir intégrer des données multimodales, y compris des modèles physiques, des comportements, des règles, et des données de processus [10]. Cela implique de combiner des modèles physiques qui décrivent les propriétés et les comportements basés sur les lois de la physique, avec des données de processus qui capturent les aspects opérationnels et les performances du système. De plus, l'intégration de modèles comportementaux permet de saisir la façon dont le système réagit à différents stimuli, et des règles peuvent être incluses pour formaliser les procédures et les contraintes.

Adaptabilité : Les jumeaux numériques doivent pouvoir s'adapter aux changements de l'environnement, et maintenir leurs performances pour une utilisation efficace [5]. L'adaptabilité est une caractéristique essentielle des JN pour assurer leur pertinence dans des environnements dynamiques et changeants. Un JN adaptable doit être capable de modifier son comportement en réponse à des situations imprévues et atteindre ses objectifs [12]. Cela peut se traduire par la modification de modèles, de paramètres de contrôle, ou de la configuration du système physique. L'adaptabilité exige que le JN puisse **intégrer de nouvelles données, mettre à jour ses modèles, et ajuster ses prédictions** en temps réel [13]. Les techniques d'apprentissage automatique permettent aussi aux JN d'ajuster le comportement des systèmes avec un minimum de supervision [12]. La mise en œuvre de **modèles auto-adaptatifs** qui peuvent modifier leurs paramètres en fonction de l'évolution des conditions et des objectifs, permet de garantir que le JN reste pertinent au cours de son cycle de vie [12, 14]

Conscience du contexte : Le jumeau numérique doit être conscient de son environnement contextuel pour une meilleure adaptabilité [4]. La conscience du contexte permet au JN de comprendre et d'interpréter les données en fonction de son environnement physique et logique. Cette caractéristique implique que le JN doit être capable d'identifier les informations contextuelles pertinentes, de les traiter et de les utiliser pour adapter son comportement et ses décisions. La conscience du contexte va au-delà de la simple perception des données ; elle implique une compréhension des relations entre les données, les utilisateurs, leurs préférences, et l'environnement. La conscience du contexte est indispensable pour les JN qui doivent prendre des décisions autonomes et coopérer avec d'autres JN dans des environnements complexes tels que les usines intelligentes.

Le développement des jumeaux numériques est spécifique à l'application ou à l'équipement, il n'y a pas de méthode systématique pour leur conception ou leur mise en œuvre. Il est nécessaire d'établir une taxonomie pertinente dans le domaine. Les JNs exigent une collaboration entre divers domaines et les exigences des JNs sont liées aux données en temps réel, à la capacité d'intégration et à la fidélité. Le concept de JN est donc est encore large et dépend de l'étape du cycle de vie et du secteur industriel de l'application [7, 8, 9]. Les entreprises sont plus intéressées par des propriétés basées sur la valeur, tandis que les chercheurs se concentrent davantage sur les exigences technologiques [10].

***References:***

1. 1-s2.0-S2667344423000099-main.pdf
2. applsci-12-00669-v2.pdf
3. 978-3-030-01614-2\_19.pdf
4. applsci-13-06746-v2.pdf
5. 978-3-030-01614-2\_19.pdf
6. DT\_Survey\_Final\_Accepted\_v1.pdf
7. 978-3-030-01614-2\_19.pdf
8. 1-s2.0-S1367578820300560-main.pdf
9. PIIS2405844024025349.pdf
10. carachretistics.pdf
11. 1605271035\_1604658922\_AMRC\_Digital\_Twin\_AW.pdf
12. 1-s2.0-S0166361521001159-main-2.pdf
13. read please.pdf
14. should read 2.pdf

*Key features of Digital Twins:*

To curate a concrete checklist of what a digital twin is required to be, a review of conceptual models and state of the art digital twin applications was conducted. The following references were shortlisted:

**2020**

1. **Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges, and Open Research**
   * Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges, and open research. IEEE Access, 8, 108952–108971.
   * [DOI Link](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358)
2. **Digital Twins in Manufacturing and Simulation**
   * Discusses the role of simulation and real-time data integration in manufacturing.
   * *D. Wagg et al., ASME Journal of Risk, 2020.*
   * [Read Full Text](https://eprints.whiterose.ac.uk/158771/8/RISK-19-1039%20with%20cover%20form.pdf)

**2021**

1. **Autonomous, Context-Aware, Adaptive Digital Twins**
   * Examines the future direction of digital twins with a focus on context awareness and adaptability.
   * *K. Hribernik et al., Computers in Industry, 2021.*
   * [Read Article](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361521001159)
2. **Digital Twin Models in Industrial Operations**
   * Provides a systematic review of digital twin applications in industrial settings.
   * *T.Y. Melesse et al., IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2021.*
   * [Read PDF](https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/cim2.12010)

**2022**

1. **State of the Art and Future Directions of Digital Twins for Production Logistics**
   * Highlights challenges and future trends in integrating digital twins with logistics.
   * *M. Woschank, Applied Sciences, 2022.*
   * [Access PDF](https://www.mdpi.com/2076-3417/12/2/669/pdf)
2. **"Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions"**
   * This paper evaluates the application of digital twins across various domains, emphasizing their implementation challenges and adherence to fundamental principles.
   * [Read here](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X22000516)

**Digital Twin Evaluation Framework**

**1. Core Digital Twin Characteristics**

Digital Twins (DTs) are virtual representations of physical entities, enabling seamless bi-directional data exchange for real-time monitoring, simulation, and decision-making (Grieves & Vickers, 2017; Tao & Zhang, 2017). They allow for lifecycle management of systems, enhancing their operational, predictive, and resilience capabilities (Fuller et al., 2020).

**1.1 Physical-Virtual Representation**

**Physical Entity:**

* Is there a clearly defined real-world physical object/system?
* Are the entity’s boundaries and hierarchical levels (e.g., unit, system, system of systems) specified?
* Is the representation granular enough to capture detailed interactions (multi-scale systems)?

**Virtual Entity:**

* Does a virtual counterpart exist that mirrors the physical entity?
* Does the virtual representation include geometry, behavior, and functional rules?
* Is it updated in real-time or near-real-time?
* Are uncertainties or tolerances in the virtual model quantified and managed?

**Physical Environment:**

* Are environmental parameters (e.g., temperature, pressure, operational context) influencing the physical system captured?
* Is there consideration of environmental effects on DT behavior and performance (e.g., degradation, energy use)?

**Virtual Environment:**

* Does the virtual environment accurately reflect the physical environment?
* Is the underlying technology (e.g., cloud, edge computing, virtual reality) robust, efficient, and scalable?
* Are simulation parameters linked to real-world data and context?

**2. Connectivity and Synchronization**

A fundamental feature of DTs is their ability to maintain dynamic, bi-directional connections between physical and virtual entities. This involves ensuring synchronization through real-time or near-real-time data flows to support operational and strategic objectives (Hribernik et al., 2021; Liu et al., 2024).

**2.1 Bidirectional Data Flow**

**Physical-to-Virtual Connection:**

* Are real-time sensor data, operational data, and static attributes seamlessly transferred to the virtual model?
* Is the data quality assured (noise-free, continuous, redundant where needed)?
* Are legacy systems supported for data acquisition?

**Virtual-to-Physical Feedback:**

* Does the virtual entity directly influence the physical entity through control or actionable insights?
* Is there a mechanism for real-time decision-making feedback to optimize physical operations?

**2.2 Synchronization**

**State Synchronization:**

* Are physical and virtual entities synchronized regularly or in real-time?
* Does synchronization support both operational and strategic decision-making timelines?

**Historical and Predictive States:**

* Are historical, current, and predicted states reflected dynamically?
* Is predictive synchronization integrated with AI models to anticipate operational behavior?

**3. Simulation and Decision Support**

Digital Twins enable predictive and prescriptive capabilities through simulations, providing actionable insights and optimization strategies. These capabilities align with transitioning decision-making from reactive to proactive processes (Wagg et al., 2020; Ivanov & Dolgui, 2021).

**3.1 Simulation Capabilities**

**What-If Scenarios:**

* Can the system evaluate "what-if" scenarios for varying operational settings?
* Does it enable predictive and prescriptive analysis?

**Optimization:**

* Are optimization algorithms applied to improve performance metrics (e.g., energy, logistics, costs)?
* Are trade-offs analyzed (e.g., sustainability vs. cost efficiency)?

**3.2 Decision-Making and Autonomy**

**Decision Support:**

* Does the system provide actionable insights for human operators?
* Is decision accuracy validated against physical outcomes?

**Autonomous Actions:**

* Can the system independently make and execute decisions within predefined parameters?
* Are feedback loops integrated to ensure continuous improvement and learning?

**4. Data Management and Integration**

DTs depend on robust data collection, integration, and processing frameworks to ensure seamless real-time operations. This includes IoT devices, cloud/edge computing, and compatibility with enterprise systems (Fuller et al., 2020; Woschank, 2022).

**4.1 Data Collection and Processing**

**Real-Time Data Integration:**

* Are IoT devices, sensors, and systems providing continuous, real-time data?
* Are data quality challenges (e.g., latency, inconsistencies) addressed?

**Data Fusion:**

* Are multiple data sources (dynamic sensor data, static data, predictive results) fused for holistic insights?
* Is data heterogeneity managed effectively?

**4.2 System Integration**

**Enterprise System Connectivity:**

* Is the DT connected to enterprise systems (ERP, MES, PLM, WMS)?
* Are standardized protocols (e.g., OPC UA, MQTT) adopted?

**Interoperability:**

* Does the DT support multi-domain collaboration and integration?
* Are standard frameworks or open architectures used to promote interoperability?

**5. Learning and Adaptability**

A mature DT leverages AI and machine learning to self-improve, recognize context changes, and adapt its models autonomously. This adaptability ensures scalability and relevance throughout its lifecycle (Hribernik et al., 2021; Liu et al., 2024).

**5.1 Context Awareness**

**Environmental Awareness:**

* Can the system dynamically recognize environmental changes?

**System Interaction :**

* Are component interactions, disruptions, and uncertainties incorporated into models?

**5.2 Learning Capabilities**

**AI and Machine Learning:**

* Is AI/ML used to predict, analyze, and optimize DT performance over time?
* Can it self-diagnose errors and update models autonomously?

**5.3 Scalability and Evolution**

**Dynamic Adjustments:**

* Can the system scale to include new equipment, functionalities, or processes?

**Lifecycle Management:**

* Is the DT applicable throughout the system lifecycle (design, operation, maintenance, end-of-life)?

**6. Fidelity and Validation**

DTs aim for high-fidelity representations while balancing computational efficiency. Validation ensures their trustworthiness and alignment with physical behaviors, critical for stakeholder confidence (Wagg et al., 2020; Melesse et al., 2021).

**6.1 Model Fidelity**

**Abstraction Level:**

* Is the fidelity appropriate for the DT’s goals and use case?
* Are computational constraints and trade-offs managed effectively?

**Trust and Confidence:**

* Is uncertainty quantified and visualized in results?
* Are outputs validated against physical behavior and benchmarks?

**6.2 Verification and Feedback**

**Model Validation:**

* Has the virtual model been rigorously verified?

**Continuous Improvement:**

* Are real-world outcomes used for model refinement and enhanced predictions?

**7. Digital Twin Services**

The functional utility of DTs is measured by their service capabilities, such as real-time monitoring, predictive maintenance, and operational optimization, aimed at enhancing the system's performance and resilience (Jones et al., 2020).

**Monitoring and Real-Time Feedback:**

* Does the system provide real-time monitoring of key metrics (e.g., energy, performance, errors)?

**Failure Analysis and Prediction:**

* Can the DT detect anomalies, predict failures, and propose corrective actions?

**Optimization and Control:**

* Is operational optimization enabled in real-time?

**Maintenance Services:**

* Does the system support predictive and prescriptive maintenance?

**8. Technological Readiness**

The deployment of DTs depends on the integration of advanced technologies such as IoT, cloud computing, AI/ML, and ensuring cybersecurity. Scalability and compliance with privacy standards are also critical considerations (VanDerHorn, 2021).

**Enabling Technologies:**

* Are advanced technologies like IoT, edge/cloud computing, AI/ML, big data, and 5G employed?
* Are new developments (e.g., blockchain for traceability) considered?

**Security and Privacy:**

* Are cybersecurity risks, data privacy, and evolving regulations addressed?

**Scalability:**

* Can the system handle increasing data volumes and expanding functionalities seamlessly?

More questions:

Haut du formulaire

**Digital Twin Maturity Assessment Questionnaire**

This questionnaire aims to evaluate the maturity of your system within the context of Digital Twins (DT), emphasizing essential characteristics and cognitive capabilities. Please answer the following questions considering your current system.

* **Virtual Representation:**To what extent does your system possess a **digital representation** of its physical counterpart [1-3]?
* Is this representation **static or dynamic** (updated in real-time or periodically) [1, 4]?
* Is the representation a **faithful replica** of the physical entity, or a **simplified representation** adapted for a specific use [1, 5]?
* What types of data are included in the digital representation (structural, alphanumeric, graphical, etc.) [6]?
* Is the digital representation a **model, a digital shadow, or a true digital twin** with bi-directional data flow [7]?
* **Data Collection and Integration:**How is **data** from your physical system collected and integrated into the digital twin [1, 8]?
* Do you use **sensors, IoT**, or other data sources [8-10]?
* Is data collection **continuous, periodic, or on-demand** [1, 11]?
* How do you manage **data quality** (preprocessing, noise removal, outlier handling) [5, 12]?
* Is there **synchronization** between the data of the physical system and the digital twin [13]?
* **Modeling and Simulation:**What type of models do you use to **simulate the behavior** of the physical system within the digital twin (physics-based, data-driven, machine learning, etc.) [14, 15]?
* Are your models **calibrated and validated** with real-world data [15]?
* How well does the **fidelity** of the simulation correspond to the actual behavior of the physical system [4]?
* Are the models **updated** with the most recent data [16]?
* **Analysis and Learning:**Does your system use **data analysis** techniques to identify patterns, detect anomalies, or predict failures [12]?
* Do you use **machine learning** methods to improve the performance of the digital twin [17, 18]?
* Is the digital twin capable of **learning from its experiences** and adapting to new situations [19]?
* Are the digital twin's models **updated** based on the learning results [20]?
* **Cognitive Capabilities:**To what extent can your digital twin **reason and make decisions autonomously** [21, 22]?
* Can the system **interact with other systems** and adapt to its environment [3, 23]?
* Does the digital twin possess **context awareness** (system state, operational environment, objectives) [24, 25]?
* Can the system **modify control parameters** of the physical system based on analysis [10, 21]?
* Are the decisions **interpretable and explainable** [12]?
* Does the system use AI methods such as **natural language processing (NLP)** for analysis or **neural networks** for fault detection [26]?
* **Applications and Benefits:**What are the **concrete applications** of your digital twin (predictive maintenance, process optimization, etc.) [2, 27]?
* What are the expected or observed **benefits** of using your digital twin (cost reduction, efficiency improvement, etc.) [2, 28]?
* How do you **evaluate the effectiveness** of your digital twin [29]?
* **Interoperability and Scalability:**Is your digital twin capable of **interacting with other systems** and platforms [30, 31]?
* Is the system designed to be **scalable** and adapt to future needs [32]?
* Do you use **standards** to ensure interoperability [33]?
* **Security and Data Privacy:**How is **data security** ensured during data collection, transfer, and storage [34, 35]?
* What **protective measures** are in place to guarantee data privacy [18, 36]?

**Interpretation of Results:**

Based on the answers obtained, you can evaluate the maturity of your system within the digital twin paradigm. A system with a high score in the categories of analysis, learning, and cognitive capabilities will be considered more advanced in the digital twin concept, approaching cognitive digital twins [23, 27].

**References Used:**

* [37] Hribernik, K., Cabri, G., Mandreoli, F., & Mentzas, G. (2021).
* [14] Botti, V., & Giret, A. (2008).
* [38] Graham, M., Brahim, B., & Achour, N. (2015).
* [39] Giret, A., & Botti, V. (2004).
* [19] Hanaki, T. (2003).
* [24] Lee, J., Lapira, E., Yang, S., & Kao, A. (2013).
* [40] Hani, U., Franke, M., Hribernik, K.A., & Thoben, K.-D. (2017).
* [20] Barricelli, B.R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019).
* [5] Naseri, F. & Gomes, C (2023).
* [8] Ziade H, Ayoubi RA, Velazco R (2004).
* [41] Patton, Ron J., Frank, Paul M., & Clark, Robert N. (2013).
* [9] Price, Chris J., Snooke, N. A., & Lewis, S. D. (2006).
* [1] Harris, G., Hyre, A., Osho, J., Pantelidakis, M., Mykoniatis, K., & Liu, J. (2021).
* [2] Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023).
* [34] Dastres, R. & Soori, M (2021).
* [16] Jeong, D. Y., et al (2022a).
* [33] Laamarti, F., Badawi, H. F., Ding, Y., Arafsha, F., Hafidh, B., & Saddik, A. el. (2020).
* [36] Durão, L.F.C.S., Grotti, M.V.F., Maceta, P.R.M., et al. (2017).
* [4] Baroni, A.L., Guéhéneuc, Y.-G., & Albin-Amiot, H. (2003).
* [10] Haag (2019).
* [7] Cardin, O., Castagna, P., Couedel, D., Plot, C., Launay, J., Allanic, N., Madec, Y., & Jegouzo, S. (2019).
* [30] André, P., Azzi, F., and Cardin, O. (2019).
* [27] Melesse, T.Y., Di Pasquale, V., & Riemma, S. (2021).
* [25] Rosen, R., Fischer, J., & Boschert, S. (2019).
* [6] Wagg, D.J., Worden, K., Barthorpe, R.J., & Gardner, P. (2019).
* [15] Ewins, D. J. (2000).
* [21] Batterman, R. (2013).
* [42] Lu, Y., et al. (2020).
* [3] Nikolakis N, Alexopoulos K, Xanthakis E, Chryssolouris G (2019).
* [28] Barth L, Ehrat M, Galeno G, Holler M, Savic N (2022).
* [29] Dalibor, M., Michael, J., Rumpe, B., Varga, S., & Wortmann, A. (2020).
* [17] Min Q, Lu Y, Liu Z, Su C, Wang B (2019).
* [22] Rafsanjani, H.N., & Nabizadeh, A.H. (2023).
* [13] Cheng, J. (2023).
* [35] Park, J.H. (2024).
* [31] Negri, E., Fumagalli, L., & Garetti, M. (2015).
* [23] Tuhaise, V.V., et al. (2023).
* [11] Jiang, Y., et al. (2024).
* [18] D’Amico, D., Ekoyuncu, J., Addepalli, S., Smith, C., Keedwell, E., Sibson, J., & Penver, S. (2019).
* [12] Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020).
* [26] Yin, X., Zhu, Y., & Hu, J. (2021).

This questionnaire has been designed to provide a thorough assessment of your system's maturity in the field of digital twins.

***More references:Bas du formulaire***

***A new quantitative digital twin maturity model for high-end equipment***

A DT maturity model for high-end equipment is important to accu- rately evaluate the maturity level of DT and further develop an advanced DT.

A maturity model is a structured framework with several levels that describes the development of something, such as a DT, over its lifecycle. Each level in the maturity model has specific criteria or characteristics that need to be satisfied. a DT maturity model is important to accurately evaluate the maturity level of a DT and to further develop an advanced DT. The purpose of a maturity model is to evaluate the state or quality of a DT, ensure quality, avoid errors, and assess the capabilities of entities on a quantitative and comparable basis. It is also used to evaluate the deficiencies of existing DTs and provide guidelines for further improvement.

There is still a lack of a well-recognized and clear definition of DT maturity, and its capability domains are consequently not clearly classified. Hence, it is difficult to distinguish the maturity level of DT development and thus validate its effectiveness. In addition, other technologies such as physical simulations or condition monitoring based on real-time sensing data are also referred to as “DT technologies”. It is indeed an urgent task to build a DT maturity model that can be used to qualita- tively and quantitively evaluate the maturity of DTs of different high-end equipment.

With increasing interest in DT research, measuring maturity levels of DT will be a highly focused topic in the near future, which can be used to evaluate the deficiencies of existing DTs and provide guidelines for further improvement [19].

Une image contenant texte, capture d’écran, Police, nombre

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

Une image contenant texte, capture d’écran, Police, nombre

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

Une image contenant texte, capture d’écran, Police, nombre

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

6 maturity levels of DT, including the Basic Level (Level 1), the Connection Level (Level 2), the Integration Level (Level 3), the Perception Level (Level 4), the Interac- tion Level (Level 5), and the Autonomy Level (Level 6). The maturity levels of DT are improved gradually, i.e., the higher level satisfies all the requirements of the lower level. The characteristics and hierarchy of maturity levels of DT are schematically shown in Fig. 3. Detailed defi- nitions of each maturity level of DT are summarized below.

Basic Level (Level 1): At this level, the DT of high-end equipment should include some basic functions of DT. For example, control and data collection capabilities on key components of high-end equipment are required in the basic level to support the following maturity levels of DT (e.g., communication and integration).

Connection Level (Level 2): At this level, the DT of high-end equipment is supposed to implement communication technology (5G and IoT) on the key components to equip them with the ability of connection between the virtual and real worlds.

Integration Level (Level 3): At this level, the DT of high-end equip- ment should evolve from separate data acquisition and communication to an integrated implementation. For instance, during the manufacturing procedure, the DT with an integration level should complete digital and networking improvements to enable standardized data collection and sharing in the whole factory.

Perception Level (Level 4): At this level, the DT of high-end equipment has an operation monitoring system, management system, and other support systems, which are fully utilized to realize the perception of the real working condition of high-end equipment based on a knowledge database, expert database, historical database, and collected data.

Interaction Level (Level 5): At this level, the DT of high-end equipment should be able to take interaction between the environment and high-end equipment based on machine learning, deep learning, and other methods. Thus, DT can provide sharable knowledge and value, which may be used to design the working schedule of high-end equip- ment appropriately.

Autonomy Level (Level 6): At this level, the DT of high-end equipment should carry out automatic prediction and operation under different unknown working conditions. The DT of high-end equipment can autonomously make decisions to robustly maintain the safety of high-end equipment.

Une image contenant texte, capture d’écran, Site web, Page web

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

Some limitations and future work are provided as follows:

(1) The proposed dimensions and rubrics may not cover all aspects of the maturity of a DT of high-end equipment. New dimensions and rubrics may be added into the proposed DT maturity model for a wide application of DT maturity evaluation of high-end equipment.

(2)  The provided maturity scores are probably different from different experts even for the same rubric, and the number of experts will influence the final maturity score. Hence, it is an interesting task to quantify the uncertainty of the maturity score due to different numbers of experts, especially by a small number of experts, which is worth investigating in the future.

(3)  Future research may include the applications of the proposed DT maturity model on the DT of high-end equipment during its whole lifecycle.

***A Requirements Driven Digital Twin Framework: Specification and Opportunities:***

DTs are defined in [8] as software representations of components, assets, systems, and processes that are used to understand, predict, and optimize performance in order to achieve improved business outcomes. Considering this DT definition it can be argued that solutions in use today such as model-based process control (MBPC) and predictive maintenance (PdM) use DT technology [9]–[12], with the DT clients or users of the DT capability ranging from low level equipment, components and processes up through high level manufacturing execution systems (MESs) and enterprise resource planning (ERP) systems.

DTs will play an increasingly important role in manufacturing with a flexible DT infrastructure being an integral part of all manufacturing systems. Unfortunately, lack of consistent definitions of capability, structure, and form prevents us from being able to easily re-use, scale, extend, verify, validate, integrate, interchange, and maintain DT technology, approaches and solutions. Also, it does not allow us to develop a clear roadmap for achieving a DT vision. A frame- work for DT creation through operation and maintenance is needed that supports re-usability, extensibility, interoperation and interchangeability today and greater levels of autonomy in the future.

To date, no consensus has been reached on a DT definition in manufacturing. The DT label is often applied to any capa- bility that replicates some aspect of a system, e.g., simulation of anything in manufacturing. It is the opinion of the authors that most DT definitions either implicitly or explicitly state the following properties of a DT:

* It is some level of replica of a real thing.
* It exists in the cyber world, i.e., it is a software entity.
* It has a purpose of impacting an aspect of the environment in which its real counterpart exists, in a positive way, usually by serving one or more DT clients. This purpose can be broad or very refined and the impact mechanism can vary widely.
* It uses models to achieve its purpose.
* It incorporates some level of subject-matter-expertise (SME, which will also be used to refer to ‘‘subject- matter-expert’’ in this paper) in the solution. This could be as simple as defining the problem, or as complex as being an integral part of the model solution. Some efforts illustrate that the combination of SME and data provides more effective, robust and usable solutions in many manufacturing domains, than purely data-driven solutions [6], [9].
* It uses data to maintain some type of synchronization with its real counterpart. In most definitions, this data is collected in an operation environment.

In summary we can thus make the following statements on the state-of-the-art and trends for DTs in manufacturing:

* Many manufacturing industries are already successfully employing DT components, though these components have not been referred to as DTs until very recently.
* Most of the DTs in use in factory operation are dedi- cated DTs, each with a specific purpose such as predict- ing remaining useful life or optimizing product quality. A specific class or type of DT commonly has a specific objective (e.g., process optimization), pre-definition of operation environment (e.g., equipment, process, and other context), and defined methods or guidelines for development and deployment.
* DTs such as general equipment and software simula- tors are also available, with their purpose less directed (i.e., the capability being improved is not as succinctly specified, is not directly considered in the design of the simulator, or the capability is one of many to which the simulator can be configured to address), and capabil- ity boundaries usually not as well-defined [48]. These DTs are generally not used during actual manufactur- ing (e.g., they might be used for off-line analysis or planning); however, DTs that are more dedicated to a specific purpose, as described above, might be built from specific configurations using the general simulators and then applied during manufacturing.
* The quality, throughput and cost pressures in some industries have led to DT advancements and a require- ment that DTs be an integral part of factory solutions in many areas.
* There is often little coordination of DT technology between the DT application areas. As an example, model-based process control (MBPC) and model-based PdM literature bases rarely overlap.
* Manufacturing is beginning to explore and benefit from abstracting and combining DT solutions [49], [50].

A review of the state-of-the-art and trends also points to clear gaps in technology that, if filled, could lead to more effective solutions. One important gap is that most DT approaches today lack mechanisms that convey elements of prediction quality, such as prediction uncertainty and model accuracy, with respect to the application environment. There are exceptions including virtual metrology solutions that use a prediction accuracy metric such as reliance index to optimize MBPC gain or metrology sampling rates, and prediction confidence in maintenance prediction [51], [52], or PdM solutions that incorporate the cost of false and missed positives into the optimization of the prediction threshold at which action is taken [53]; these solutions illustrate the importance of incorporating prediction uncertainty aspects into the application environment. Another important gap is the lack of commonality of structure and behavior among DT types. Providing this commonality would lead to improved opportunities for combining DT capabilities and integrating them into manufacturing systems.

Moving forward we can say that the industry is already successfully deploying DT components, but there is a need to leverage this base of important research and development through a unified framework that supports DT creation, extension, exchange, reuse, and integration, while allowing for maximizing of DT intelligence.

DT framework requirements must be derived from and satisfy the general understanding of the definition of DTs, DTs in use today, near-term trends in DTs, and DTs of the future including the ultimate vision of DT frameworks in SM. The framework requirements from these sources are presented in the remainder of this section and summarized in Table 2. Note that in this section the term ‘‘class’’ is used to define a type of DT, with an ‘‘instance’’ being a single occurrence of that class. These terms will be more formally defined and used in Section IV.

Une image contenant texte, capture d’écran, Publication, journal

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

***A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications,***

***and Design Implications***

*Une image contenant texte, document, capture d’écran, menu

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.*

Both the physical and the digital twins must be equipped with networking devices to guarantee a seamless connection and a continuous data exchange either through direct physical communications or through indirect cloud-based connections.

Thanks to the seamless connection, the DT continuously receives dynamic (eventually sensed) physical twin data, which describe the physical twin status and change with time along its lifecycle, and dynamic environment data describing the surrounding environment status. Moreover, it continuously sends back to its physical twin, to the domain experts, and to other DTs in the environment, predictions and prescriptions for system maintenance and for function optimizations.

There are mainly three types of communication processes that need to be designed:

1. Between the physical and the virtual twin.
2. Between the DT and different DTs in the surrounding

environment.

1. Between the DT and domain experts, which interact

and operate on the DT, through usable and accessible

interfaces.

All the exchanged data must be stored in a data storage system, accessible by the digital twin. Together with dynamic data, the data storage contains historical static data, which reflect the physical twin memory and record historical information provided by human expertise or by past actions, and descriptive static data , which describe important characteristics of the physical twin that must not change over time (e.g. its requirements and constraints, in the case of a product or device [44]).

Moreover, since the DT continuously receives data from different sources, it must exploit proper ontologies for data comprehension and formalization. Ontologies are a well- established approach for leveraging data and information sources with semantics, thus providing a shared, machine- understandable vocabulary for information exchange among dispersed agents (e.g. humans and different machines) inter- acting and communicating in an heterogeneous distributed intelligent system [46], [99]–[103].

The DT must be able to treat high-dimensional data and must therefore be equipped with effective high- dimensional data-(de)coding and analysis techniques, as well as data fusion algorithms for integrating the multiple data sources and produce more consistent, accurate, and useful information than that provided by any individual data source.

DT technology encompasses a continuously improving AI, which refers to supervised/unsupervised learning algorithms, whose predictive capability is refined as they process the continuously received sensed data from the physical twin and the surrounding environment. This virtual (cognitive) brain applies descriptive, predictive, and prescriptive algorithms thus allowing to perform a set of tasks as an intelligent product.

Among AI algorithms, feature selection and feature extraction tasks reduce the data dimensionality while keeping the most informative data. This allows extracting and storing only the useful information (‘‘right data’’), thus reducing the cost for storage and the computational processing costs [66]. Feature extraction and selection is important for dealing with big data. Extracting the salient value and information associated with the continuously acquired and exchanged big data is important to enable effective real-time cyber- physical synchronization and the so called ‘‘closed-loop optimization’’ [44], [56]. Closed-loop optimization refers to the continuous exchange of data between the cyber and physical worlds to continuously optimize the physical side. The DT is a virtual model of the physical object with the potential of understanding changes in the status of the physical entity through sensing data, to analyze, predict, estimate and optimize changes. The physical entity should respond to the changes according to the optimized scheme received from the DT [53], should continuously send real-time data describing novel statuses, and then be ready to respond to novel optimizing ‘‘commands’’ received from the DT. Through such cyber-physical closed-loop optimization, DT technology could enable the performance improvement of the whole manufacturing process [44].

The DT characterizes, understands, clusters, and classifies the input data from the physical twin and/or the surrounding IoT environment, thanks to pattern recognition, unsupervised/supervised learning, and statistical applications [66]. This allows to detect changes and identify important patterns and trends by analyzing data.

The DT has self-adaptation and self-parametrization capabilities, which allow to resemble the physical twin during its whole lifecycle [67], [97]. This task might be easily and quickly accomplished, by developing a highly modular and parameterized DT. Modularity guarantees that changes in one module do not affect other modules. Parameterization guarantees an easy modification of DT status. Evolutionary algorithms [104], or stochastic optimization [59] may be used for choosing the parameter settings producing the best fit between the DT and its twin.

The DT exploits predictive analytics [105], [106] to predict future statuses and important changes (such as failures) in the product lifecycle.

The DT uses the result of descriptive and predictive techniques as input of prescriptive analytics [107] to make decisions relevant to its own destiny, by computationally determining a set of high-value alternative actions or decisions given a complex set of objectives, requirements, and constraints (described by the historical and static data). It eventually applies (stochastic) optimization algorithms to achieve the best outcome, while addressing uncertainty in the data [59].

Beyond applying predictive and prescriptive algorithms, the DT codes the computed prescriptions and optimization schema by exploiting proper ontologies and high- dimensional data-coding techniques. This allows sending feedback to both the physical twin and to other DTs in the whole environment. On the other side, end users may exploit interaction interfaces to access the computed information and to view the DT status.

Finally, the DT provides modeling and simulation applications for representing, in a realistic and natural way, both the current status of the physical twin, and different ‘‘what-if’’ scenarios.

***A comprehensive review of digital twin — part 1: modeling and twinning enabling technologies***

It is argued that, for a digital model, data flow between the physical space and virtual space is optional, or at the very most, achieved manually as shown in Fig. 2. For a digital shadow, data flow is unidirectional from physical to digital. But for digital twin, the data flow has to be bidirectional (see Fig. 2) (Kritzinger et al. 2018). When digital twin is used in control-related applications, the bidirectional data flow needs to be automatic, often enabled by monitoring and control software. For the application of digital twin to support decision-making, such as predictive maintenance, which will be reviewed in Sect. 5.2, however, the data flow from virtual to physical involves humans in the loop who carry out maintenance actions and, therefore, is not fully automatic but should be handled on time to avoid unexpected breakdown. Since it is difficult for the digital space to mirror all aspects of the physical space, a digital twin is always constructed for specific aspect(s) relevant to the engineering problem the digital twin is used to solve, and these aspect(s) need to be specified before the construction of the digital twin.

the proposed five- dimensional digital twin model consists of a physical sys- tem (PS), a digital system (DS), an updating engine (P2V), a prediction engine (V2P), and an optimization dimension (OPT)

Composants d'un jumeau numérique :

Les sources proposent un modèle de jumeau numérique à cinq dimensions :

1. Système physique (PS) : l'actif physique réel avec des capacités de détection qui permettent la collecte de données.

2. Système numérique (DS) : la représentation virtuelle du système physique, basée sur des modèles.

3. Moteur de mise à jour (P2V) : le processus qui met à jour l'état du modèle numérique en fonction des données du capteur du PS.

4. Moteur de prédiction (V2P) : le processus par lequel le système numérique prédit l'état futur du système physique, afin de permettre une prise de décision proactive.

5. Dimension d'optimisation (OPT) : cette dimension soutient les quatre autres dimensions en optimisant la collecte de données, la modélisation, l'estimation d'état et la prise de décision. L'optimisation peut être hors ligne ou en ligne.

Exigences fondamentales d'un jumeau numérique

Modélisation précise : le jumeau numérique doit reproduire fidèlement le comportement et les caractéristiques de l'actif physique.

Connectivité et flux de données bidirectionnel : Le jumeau numérique doit être constamment synchronisé avec le système physique grâce à un flux de données bidirectionnel.

Les données issues des capteurs (P2V) permettent de mettre à jour le modèle numérique.

Le modèle numérique fournit des prédictions et des décisions (V2P) qui influencent le système physique, notamment via les actionneurs.

Estimation d'état et prédiction : le jumeau numérique doit être capable de suivre l'état actuel du système physique et de prévoir son évolution future.

Optimisation : le jumeau numérique permet d'optimiser les décisions et les actions, en prenant en compte différents aspects, tels que la collecte des données, la modélisation, la prise de décision, etc.. L'optimisation peut être faite hors ligne ou en ligne.

Gestion de l'incertitude (UQ) : les jumeaux numériques doivent tenir compte de diverses sources d'incertitude et utiliser des méthodes probabilistes.

***Digital twin-enabled synchronized construction management: A roadmap from construction 4.0 towards future prospect***

A digital twin has several key functions:

Real-time Monitoring of Resource Status and Project Progress: Digital twins enable stakeholders to monitor the current state of resources and the progress of construction projects using real-time data collected by IoT devices. This allows for a clear view of the physical environment and the status of various components within it.

Cyber-Physical Interoperation: They facilitate a bidirectional exchange between the physical and digital worlds, allowing for real-time control and optimization. This is a core function that distinguishes digital twins from simple digital models.

Virtual Modeling, Simulation, and Verification: Digital twins allow for virtual modeling and the simulation of different scenarios before any physical implementation, which can help in identifying issues and optimizing processes. They also enable verification of designs and processes without physical prototypes.

Operational Guidance and Alerts: During the implementation phase, digital twins provide real-time operational guidance and alerts to managers and workers, which enhances efficiency and accuracy.

Predictive Capabilities: They can forecast future states and emergency events by using predictive algorithms, which allows stakeholders to be proactive rather than reactive. This helps in risk mitigation and better planning.

Data-Driven Decision Making: The data collected and processed by digital twins enables informed and optimized decision-making. The ability to analyze data helps in identifying patterns and trends that can lead to better management of projects.

Collaboration and Information Sharing: Digital twins facilitate information sharing among all stakeholders via cloud computing, which allows for better coordination and collaboration. This ensures that all parties involved in a project have access to the most up-to-date information.

Optimization of Resource Allocation and Scheduling: They help in optimizing resource allocation and scheduling, which improves the efficiency and sustainability of the construction process.

Support for Synchronized Management: The Synchronized Digital Twin (SDT) model, emphasizes the importance of both vertical (between physical and digital) and horizontal (among resources) synchronization for optimized management.

Enhance Safety and Quality: By utilizing data from computer vision and industrial wearables, digital twins help in ensuring safety and maintaining high quality standards on site.

Enable Distributed Optimization: By dividing large tasks into subtasks, digital twins enable multiple optimization processes that can improve project efficiency and resource utilization.

Support Multi-Domain Collaboration: They allow for collaborative efforts across different domains and stakeholders by providing shared digital twins with the relevant information.

Transition from Stochasticity to Determinacy: Digital twins help transition from relying on estimates to using real-time data, making project parameters more deterministic, thus improving decision-making and efficiency.

Improve Dynamics and Resilience: Digital twins can adapt to changing parameters and constraints in real-time, making projects more resilient to disruptions and ensuring optimal performance.

These functions collectively contribute to a more efficient, sustainable, and human-centric construction industry. The use of digital twins marks a paradigm shift towards cyber-physical integration and interoperation in the construction sector.

***Characterising the Digital Twin: A systematic literature review***

Une image contenant texte, document, capture d’écran, Police

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

***Enabling technologies and tools for digital twin***

Une image contenant texte, nombre

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

***Digital twin paradigm: A systematic literature review***

*Architecture et composants :*

* Le DT comprend trois couches principales : la **couche physique, la couche réseau et la couche informatique**.
* La **couche physique** comprend les entités physiques, telles que les machines ou les produits.
* La **couche réseau** connecte le domaine physique au domaine virtuel12. Elle partage des données et des informations.
* La **couche informatique** comprend les entités virtuelles qui émulent les entités réelles, y compris les modèles basés sur les données et l'analyse, les modèles basés sur la physique, les services et les utilisateurs.
* Le DT intègre des **capteurs, des actionneurs et des systèmes de communication embarqués** pour enregistrer les états en temps réel.
* Il utilise des **protocoles de communication** tels que OPC UA et MT-Connect.
* Il utilise des **modèles basés sur les données** (machine learning, réseaux neuronaux)
* Il comprend différents **types de modèles** : géométriques, physiques, comportementaux, d'informations collaboratives et de prise de décision
* Le DT a pour **caractéristiques** : l'évolutivité, l'interopérabilité, la fidélité, la dynamicité et la modularité.

**Caractéristiques importantes du DT :**

* **Synchronisation** entre les systèmes physiques et cybernétiques
* **Intégration de données en temps réel**
* **Modélisation comportementale** de l'espace physique
* **Capacité d'émulation**
* **Capacité de simulation**
* **Adaptabilité et évolution** avec le système réel
* La **précision**, la **fiabilité**, et l'**actualité** des données et des informations qu'il contient

Ces éléments permettent de comprendre que le jumeau numérique est plus qu'une simple copie virtuelle. C'est un outil dynamique et interactif qui permet de modéliser et d'optimiser les systèmes physiques tout au long de leur cycle de vie.

***A comprehensive survey of digital twins: Applications, technologies and security challenges***

*DT components*

A. **A digital representation** of a system or a PO can include detailed information about its design, manufacturing, and operational characteristics.

B. **Sensors and other data collection devices** gather data about the physical object or system, such as its location, performance, and condition.

C. **A software platform** that can process and analyze the data collected from the sensors and other data collection devices to create a detailed and accurate representation of the PO or system.

D. **A user interface** is an essential component of a digital twin system, allowing users to interact with the DT and access its information. A user interface enables users to interact with the digital twin to view its status, run simulations, or change its configuration. A user interface typically includes a visual display of the DT, such as a 3D model or dashboard, and interaction tools like buttons, sliders, and other controls [42]. A user interface can also run simulations or change the DT’s configuration by adjusting parameters or testing different scenarios. This helps users understand how the physical twin would behave in other conditions and identify potential issues or opportunities for improvement.

E. **Communication** allows the DT to be connected to other systems, such as enterprise systems, cloud-based services, or other DTs [85]. The communication procedures that must be developed for DT fall into three main categories: between the domain user experts who interact with the DT through Human-Machine Interface (HMI), between the DT and the physical twin, and between DTs within the same virtual environment or in nearby settings [65].

F. **Data Storage and Processing:** Data is the backbone of digital twins. Some experts have expanded the original digital twin concept to include data and services [46,83]. All data that is exchanged must be stored in a data repository accessible to DT, which results in a significant storage demand [72]. This data can include historical data, metadata, and derived data [42]. To manage high-dimensional data effectively, digital twins employ advanced techniques for handling, analyzing, and decoding high-dimensional data and algorithms for merging multiple data sources to produce more accurate and valu- able information [43,86,87].

G. **Statistical and AI algorithms** can analyze data and provide in- sights, predictions, and recommendations. Digital twins also depend on AI to adapt and improve as new data is generated. To reduce the cost of storage and computation, the preferred AI techniques should be able to minimize data dimensionality while still preserving the most valuable data for the DT [44,88]. DTs use statistical applica- tions, pattern recognition, and unsupervised/supervised learning to process and analyze data from the physical twin and its surrounding environment. It enables the detection of changes and the identifi- cation of patterns and trends [42].

H. **Security and access control components** are essential to ensure the integrity and confidentiality of the data and the design [89, 90]. Security and access controls ensure the data and system integrity and confidentiality. Some examples of security and ac- cess control components in the DT system include authentication and authorization elements, intrusion detection and prevention components, and data leakage prevention components [91–93].

**DT functional layers:** Data Acquisition Layer - Data Synchronization Layer - Data Modeling Layer - Data Visualization Layer

Une image contenant texte, reçu, capture d’écran, Police

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

*Questionnaire d'Évaluation du Jumeau Numérique*

Ce questionnaire est divisé en plusieurs sections pour évaluer différents aspects du jumeau numérique. Veuillez répondre à chaque question en utilisant l'échelle suivante :

1 : Pas du tout d'accord

2 : Légèrement d'accord

3 : Modérément d'accord

4 : D'accord

5 : Tout à fait d'accord

Section 1 : Composants et Structure

1.Le système possède-t-il une représentation numérique détaillée de son objet physique, incluant sa conception, sa fabrication et ses caractéristiques opérationnelles ?

2.Le système utilise-t-il des capteurs et d'autres dispositifs de collecte de données pour obtenir des informations sur son objet physique ?

3.Le système possède-t-il une plateforme logicielle capable de traiter et d'analyser les données collectées pour créer une représentation précise de l'objet physique ?

4.Le système comprend-il une interface utilisateur permettant aux utilisateurs d'interagir avec le jumeau numérique et d'accéder à ses informations ?

5.Le jumeau numérique a-t-il la capacité de communiquer avec d'autres systèmes, services cloud ou d'autres jumeaux numériques ?

6.Le système possède-t-il un stockage de données accessible au jumeau numérique pour toutes les données échangées ?

7.Le système utilise-t-il des algorithmes d'IA et statistiques pour analyser les données, fournir des prédictions et améliorer le jumeau numérique ?

Section 2 : Couches Fonctionnelles

1.Le jumeau numérique possède-t-il une couche d'acquisition de données qui collecte les données du système physique ?

2.Le jumeau numérique possède-t-il une couche de synchronisation des données qui assure la mise à jour en temps réel de la représentation virtuelle avec les données de l'objet physique ?

3.Le jumeau numérique possède-t-il une couche de modélisation qui utilise des modèles numériques pour spécifier le comportement, les états et les formes géométriques ?

4.Le système utilise-t-il des technologies de traitement et de stockage de données appropriées pour chaque couche fonctionnelle (ex: edge, fog, cloud computing)?

Section 3 : Exigences Opérationnelles

1.Le jumeau numérique assure-t-il la confidentialité des données, en empêchant tout accès non autorisé ?

2.Le jumeau numérique garantit-il l'intégrité des données, en empêchant toute altération non autorisée ?

3.Le jumeau numérique assure-t-il la disponibilité des données, en restant accessible et opérationnel en cas de dysfonctionnement ?

4.Le jumeau numérique est-il interopérable, c'est-à-dire capable de communiquer et d'échanger des informations avec d'autres systèmes et appareils ?

5.Le jumeau numérique est-il composables, en permettant de combiner ses composants pour former des systèmes plus complexes?

6.Le jumeau numérique est-il hétérogène, capable d'intégrer des composants de différents fournisseurs et plateformes?

7.Le jumeau numérique est-il scalable, capable de s'étendre et de s'adapter à un nombre croissant de composants et d'utilisateurs?

8.Le jumeau numérique est-il fiable, en fonctionnant correctement et avec précision ?

9.Le jumeau numérique est-il prédictible, capable d'interpréter son état, son comportement et ses fonctionnalités de manière quantitative et qualitative ?

10.Le jumeau numérique a-t-il une compositionnalité qui permet de comprendre le comportement global du système à partir du comportement de ses composants?

11.Le jumeau numérique est-il précis, en alignant étroitement ses résultats avec les effets réels ou calculés ?

12.Le jumeau numérique est-il robuste, capable de maintenir une configuration stable et de fonctionner malgré les défaillances ?

13.Le jumeau numérique est-il durable, capable de fonctionner efficacement tout en renouvelant ses ressources ?

14.Le jumeau numérique est-il résilient, capable de continuer à fonctionner et à fournir des services fiables même en cas de problèmes ?

15.Le jumeau numérique est-il reconfigurable, capable de modifier ses configurations en réponse à des pannes ou des demandes ?

Section 4 : Logiciel de Création et Outils

1.Le système a-t-il été développé en utilisant des plateformes logicielles appropriées pour la création de jumeaux numériques (ex: Simio, AWS IoT TwinMaker, Siemens NX software)?

2.Le système utilise-t-il des outils open-source pour la création et la gestion du jumeau numérique (ex: Ditto Project, iTwin.js)?

Section 5 : Sécurité

1.Le jumeau numérique a-t-il été développé en tenant compte de la sécurité dès sa conception ?

2.Le système prend t'il en compte les vulnérabilités potentielles comme l'augmentation de la connectivité, l'isolation et l'hétérogénéité ?

3.Le système utilise-t-il des méthodes de sécurité comme la technologie blockchain pour protéger ses données ?

4.Le système utilise-t-il des techniques de gamification pour former le personnel à la sécurité ?

5.Le système gère-t-il les risques liés aux menaces internes, comme les employés, les contractants ou les fournisseurs ?

Section 6 : Défis et Perspectives

1.Le jumeau numérique est-il utilisé pour résoudre des défis de cybersécurité existants, tels que la gestion des risques ou la défense active contre les cyberattaques ?

2.Le système utilise-t-il des méthodes d'analyses prédictives pour anticiper les anomalies et améliorer sa maintenance ?

3.Le système est-il adaptable à la complexité des modèles qu'il doit gérer et à la diversité des technologies impliquées ?

4.Le système respecte-t-il les normes et régulations gouvernementales ?

5.Le système possède-t-il une interface utilisateur intuitive, utilisable par des non informaticiens ?

***When is a Simulation a Digital Twin? A Systematic Literature Review***

Overall, these existing SLRs focus on providing an overview of established definitions of DT, classifying the DT in terms of its application, components and technologies, suggesting further research, and highlighting the current gap in the literature in specific application areas. Although such reviews are extensive and detailed, no SLR or other study in the literature has looked at the relationship between DT and simulation. Note that this is a natural relationship, as these two techniques have some similar capabilities and objectives. In fact, several papers reviewed herein build simulations and call them DT, but it is unclear if these simulations have the full capabilities usually associated with DT. Simulation and DT are distinct technologies with unique benefits that can provide important insights to a problem; therefore, they should be classified accordingly, and it is crucial to clarify their differences to prevent misunderstandings.

Traditional simulation and DT models share the same ability to replicate a physical system in a virtual environment, but they are not the same [14]. The use of simulation combined with a DT is very common, which creates an immense misconception about classifying a simulation model as a DT and vice versa [16]. Several organizations use the term ‘Digital Twin’ synonymously to a simulation model and several software and consulting companies are creating and selling simulation software claiming it is a DT [17]. Besides having the capabilities to model and simulate the physical system in a virtual environment, a DT presents continuous bilateral communication, it measures the changes in the physical system by sensors, and predictions are constantly being shared with the physical system for real-time decision making [18].

Une image contenant texte, Police, capture d’écran, diagramme

Le contenu généré par l’IA peut être incorrect.

Ce questionnaire est conçu pour évaluer si un système répond aux critères d'un véritable jumeau numérique (DT) par rapport à une simulation, en utilisant une échelle de notation de 1 à 5. L'échelle est la suivante:

* 1 = Pas du tout
* 2 = Faiblement
* 3 = Modérément
* 4 = Fortement
* 5 = Totalement

**Partie 1 : Capacité de Représentation (R1) du Jumeau Numérique**

* **Collecte de Données :**Dans quelle mesure le système collecte-t-il des données de l'environnement physique ? [1-5]
* Dans quelle mesure les données sont-elles structurées pour un stockage et une utilisation efficaces ? [1-5]
* **Compréhension du Système Physique :**Dans quelle mesure le système aide-t-il à comprendre le comportement du système physique ? [1-5]
* Dans quelle mesure le modèle numérique représente-t-il les composants et interactions du système physique ? [1-5]

**Partie 2 : Capacité de Réplication (R2) du Jumeau Numérique**

* **Duplication Virtuelle :**Dans quelle mesure le système duplique-t-il le système physique dans un environnement virtuel ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système virtuel utilise-t-il l'architecture de la phase de représentation (R1) ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système virtuel reproduit-il les résultats du système physique avec les mêmes entrées ? [1-5]
* **Synchronisation des Données en Temps Réel :**Dans quelle mesure les données du système physique mettent-elles à jour le système virtuel en temps réel ? [1-5]
* Dans quelle mesure y a-t-il synchronisation entre les changements du monde physique et le modèle virtuel ? [1-5]

**Partie 3 : Capacité de Réalité (R3) du Jumeau Numérique**

* **Analyse de Scénarios Contrefactuels :**Dans quelle mesure le système explore-t-il des scénarios hypothétiques ("what-if") ? [1-5]
* Dans quelle mesure les analyses virtuelles influencent-elles les décisions dans le monde réel ? [1-5]
* **Optimisation en Temps Réel :**Dans quelle mesure le système fournit-il des résultats pour optimiser le système physique en temps réel ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système utilise-t-il les informations du modèle virtuel pour améliorer le système physique ? [1-5]

**Partie 4 : Capacité Relationnelle (R4) du Jumeau Numérique**

* **Communication Bidirectionnelle :**Dans quelle mesure y a-t-il une communication bidirectionnelle entre les systèmes physique et virtuel ? [1-5]
* Dans quelle mesure les données circulent-elles constamment entre les deux systèmes ? [1-5]
* **Autonomie et Apprentissage :**Dans quelle mesure le système intègre-t-il des technologies d'aide à la décision (IA, apprentissage automatique) ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système apprend-il et s'adapte-t-il en temps réel grâce aux données ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système prend-il des décisions de manière autonome ? [1-5]

**Partie 5 : Capacité de Simulation (4S)**

* **Modélisation (S1) :**Dans quelle mesure le modèle virtuel représente-t-il le système physique avec des données historiques ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système modélisé est-il compris et traduit dans le modèle ? [1-5]
* **Analyse (S2) :**Dans quelle mesure le modèle virtuel peut-il analyser le système en variant les entrées ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système examine-t-il le système sous différents paramètres ? [1-5]
* **Prédiction (S3) :**Dans quelle mesure le modèle virtuel prédit-il le fonctionnement du système physique dans de nouvelles conditions ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système étudie-t-il des scénarios et évalue-t-il la performance ? [1-5]
* **Prescription (S4) :**Dans quelle mesure le modèle virtuel évalue-t-il le système et fournit-il des informations pour son optimisation ? [1-5]
* Dans quelle mesure le système utilise-t-il les résultats pour optimiser le système physique et prescrire des solutions ? [1-5]
* Dans quelle mesure le jumeau numérique effectue-t-il des analyses proactives du système physique ?

**Partie 6 : Terminologie et Technologies de Soutien**

* **Définition du Jumeau Numérique :**Dans quelle mesure la définition du DT utilisée est-elle claire et cohérente avec les définitions établies ? [1-5]
* **Technologies de Soutien :**Dans quelle mesure les technologies utilisées (IoT, IA, etc.) soutiennent-elles la création du DT ? [1-5]
* Dans quelle mesure le jumeau numérique utilise-t-il des technologies émergentes (modélisation virtuelle, blockchain, apprentissage machine) ?
* Dans quelle mesure les logiciels (CAD, MATLAB, etc.) sont-ils adaptés au DT ? [1-5]
* Dans quelle mesure la conception des jumeaux permet-elle sa réutilisation pour de futurs services ?
* **Secteur Industriel :**Dans quelle mesure le DT répond-t-il aux exigences spécifiques du secteur industriel d'application ? [1-5]

**Conclusion**

Ce questionnaire, avec son échelle de notation, est conçu pour une analyse de logique floue, en fournissant une évaluation nuancée des capacités du système. **Un système avec des scores élevés dans les niveaux R3 ou R4, ainsi que dans les 4S, serait considéré comme un jumeau numérique performant**. Les scores dans les parties 1 et 2, avec des scores faibles dans les niveaux de simulation peuvent être considérés comme des simulations avancées.

***Decision support in productive processes through DES and ABS in the Digital Twin era: a systematic literature review***

Les principaux résultats de l'article sont les suivants :

* La simulation est une technique bien établie pour la prise de décision dans les processus de production et le concept de DT est une évolution de cette pratique [3, 10].
* Le concept de DT a émergé récemment, mais son principe est utilisé depuis des décennies pour la prise de décision par la simulation [3, 11].
* L'intégration de la simulation avec des systèmes physiques permet de créer des modèles virtuels sensibles aux changements physiques et alignés sur l'état actuel des processus [3, 12].
* Plusieurs termes sont employés pour faire référence à la simulation comme DT, notamment : "Cyber-physical System", "Symbiotic Simulation", "Online Simulation", "Data-driven Simulation", "Real-time Simulation", "Near real-time simulation" et "Semi-physical simulation" [5, 13].
* Il y a un manque de base théorique solide sur ce sujet, capable de guider les chercheurs et les professionnels dans le développement de solutions pour la prise de décision [4, 13].
* La connexion entre le modèle de simulation et les systèmes physiques peut se faire par le biais de systèmes de gestion, de bases de données, de capteurs et d'appareils intelligents [21, 22].
* La mise à jour des modèles de simulation DT peut être effectuée en temps réel ou en quasi temps réel [23].
* Le degré d'autonomie des modèles de simulation DT varie, allant de modèles autonomes à des modèles non autonomes qui nécessitent une intervention humaine [24, 25].
* Il y a un manque de méthodes pour le développement et la validation périodique des modèles de simulation DT [26, 27].
* L'utilisation de la simulation comme DT présente plusieurs avantages, tels qu'une meilleure prise de décision, une plus grande flexibilité et un coût réduit par rapport aux solutions commerciales [28-30].
* Il existe également des problèmes liés à l'utilisation de la simulation comme DT, tels que l'intégration des systèmes, la qualité des données, le temps de traitement, la sécurité et la validation des modèles [30-32].

Questions :

* **Système Physique (PS)**Le **système physique** (humains, machines, matériaux) est clairement identifié [3].
* Le DT est **connecté à un système physique réel** [1-3].
* La méthode de connexion au système physique est identifiable et claire (capteurs, systèmes de gestion, bases de données, appareils IoT) [3, 7, 8].
* Le niveau de détail du système virtuel est **adapté aux objectifs** du DT [8].
* Le DT est capable de **refléter le comportement du système physique** de manière précise [1, 3].
* Le DT est **sensible aux changements physiques** du système, se mettant à jour en fonction [7].
* Il existe un **flux de données** dans les deux sens, permettant une interaction entre le virtuel et le physique [3, 8].
* Le modèle de simulation est **mis à jour de manière régulière** [8, 10].
* Le DT utilise en priorité des **données issues du système réel** plutôt que des données purement simulées [8, 11].
* Le DT est capable de **gérer des données en temps réel ou quasi temps réel** [6, 10].
* Le DT permet de réaliser des **expériences "what if"** sans perturber le système physique réel [12].
* **Le** DT est mis à jour en **temps réel (RT)** ou **quasi temps réel (NRT)**, en fonction de l'application [6, 13].
* L'intervalle de temps entre les mises à jour est **adapté à la prise de décision** requise [13, 14].
* Le DT démontre une **coévolution** avec le système physique, s'améliorant et s'adaptant mutuellement [8].
* Le DT est clairement **identifié comme autonome ou non** [15].
* Si autonome, le DT prend des décisions et agit sans intervention humaine directe.
* Si non autonome, le DT propose des actions qui nécessitent la validation humaine [16].
* Si le DT est autonome, il existe des **mesures de sécurité** claires pour garantir son bon fonctionnement [16].
* Si le DT est non autonome, les réponses sont formatées pour faciliter l'interprétation par l'utilisateur [16].
* Les **critères d'évaluation** de performance du DT sont définis (éléments, comportement, règles) [20].
* Des **procédures statistiques** sont mises en œuvre pour assurer la performance du DT [20].
* Des routines de **vérification, validation et accréditation** sont réalisées pour assurer la qualité du DT [20].
* Les technologies utilisées (IT, IoT, Big Data, Cloud) sont **adaptées et bien intégrées**
* Le système est -il capable ou susceptible à être connecté (ou mise en relation avec d’autre
* Le système est-il capable d’être intégré sur plusieurs phase du cycle de vue du jumeau physique (construction, début, milieu et fin de vie).
* Le système permet-il de surveiller les performances de l'actif ? (Oui/Non)
* Le système permet-il d'analyser les données pour identifier des tendances et des anomalies ? (Oui/Non)

***Digital twins: An analysis framework and open issues***

Le document critique l'absence de définition universelle et le manque de cohérence dans la manière dont les jumeaux numériques sont définis et comparés dans la littérature. Il note que de nombreux fournisseurs présentent des solutions informatiques comme des jumeaux numériques, même avec des variations importantes en termes de capacité et de connectivité avec le système physique. Il met en évidence plusieurs idées fausses courantes sur les jumeaux numériques, comme leurs cas d'utilisation illimités, la possibilité de fédérer les jumeaux numériques, la nécessité d'un modèle 3D, l'acquisition de données simple et le contrôle du physique par le numérique

**2. Critères, caractéristiques, et exigences pour un jumeau numérique**

seize composants fonctionnels qui, avec leurs caractéristiques, constituent le cadre d'analyse pour déterminer si un système est un jumeau numérique [10, 11]. Ces composants sont regroupés en quatre catégories principales :

**Couplage numérique** [24] :

* **État de l'entité physique** : Flux périodique de données d'état provenant de capteurs, d'actionneurs ou de systèmes de contrôle [25].
* **Communication** : Connexion entre l'entité physique et le jumeau numérique pour le transfert des données [26]. Cette communication peut être continue ou intermittente et ses caractéristiques dépendent des facteurs comme la nature de l'entité physique, les volumes de données, et les contraintes de l'environnement [26, 27].
* **Gestion des données d'état** : Traitement et transformation des données d'état pour leur transmission et leur utilisation par le jumeau numérique. Cela inclut la mise en forme, le nettoyage et la correction des erreurs [27].
* **Jumelage** : Processus de synchronisation des données d'état pour assurer un jumelage optimal, avec gestion des mises à jour du jumeau numérique [28].
* **Protocoles et normes** : Protocoles utilisés pour gérer le couplage, tels que les protocoles de sécurité et de communication [29].

**Représentation virtuelle** [30] :

* **Modèle de données** : Modèles de données physiques et logiques définissant l'information utilisée dans la représentation virtuelle. Il peut servir de modèle d'intégration [31].
* **Stockage des données opérationnelles** : Données collectées via le couplage numérique concernant l'exploitation, l'état et l'utilisation de l'entité physique [31]. La conservation de ces données dépend de l'usage du jumeau numérique [31].
* **Données de référence et données maîtres** : Informations concernant l'état initial de l'entité physique, sa localisation, les informations de maintenance et de support ainsi que les données de configuration, paramètres, et limites des modèles. Il peut également inclure les données économiques, financières et réglementaires [32, 33].
* **Modèles d'entité physique** : Modèles physiques et/ou de processus utilisés pour représenter l'opération de l'entité physique à l'aide de données d'exploitation, de données maîtres et de données de référence [34]. Il peut s'agir de modèles paramétriques, computationnels et basés sur des graphes [35].
* **Temporel** : Capacité à modéliser la performance sur différentes périodes avec divers niveaux de granularité, notamment pour l'analyse de tendances [34].

**Outils** [35] :

* **Analyse** : Outils pour analyser le comportement et la performance de l'entité physique à partir de données historiques et/ou actuelles. Plusieurs types d'analyse peuvent être utilisés comme l'analyse de texte, des tendances, les statistiques, etc [36-38].
* **Simulation** : Outils pour simuler le comportement et la performance de l'entité physique, par exemple, pour réaliser des analyses "what-if" sur des scénarios futurs ou passés [39, 40].
* **Présentation** : Fonctionnalités pour visualiser les résultats d'analyse et de simulation [41, 42].

**Sortie fonctionnelle** [42] :

* **Sortie du jumeau numérique** : Traitement nécessaire pour la visualisation et les sorties utilisables par d'autres systèmes ou par l'entité physique [43].
* **Configuration et contrôle du jumeau numérique** : Fonctionnalité permettant à un utilisateur autorisé de modifier le fonctionnement du jumeau numérique, ainsi que l'utilisation des données contextuelles [44].
* **Interface utilisateur** : Moyens permettant à un humain d'interagir avec le jumeau numérique, notamment pour le contrôler, l'administrer ou analyser ses résultats [45, 46].

Le document propose que l'on utilise les caractéristiques de ces 16 composantes fonctionnelles, ainsi que leurs interactions et interdépendances, comme base d'une évaluation complète d'un système de jumeau numérique [11].

**1. Questionnaire d'évaluation de jumeau numérique**

Ce questionnaire est conçu pour évaluer si un système donné peut être considéré comme un jumeau numérique en utilisant les composantes fonctionnelles et caractéristiques définies dans l'article. Chaque section correspond à une des quatre catégories principales identifiées, et chaque question vise à déterminer la présence et la qualité de chaque composant.

**A. Couplage Numérique**

* **État de l'entité physique :***Définition* : Flux périodique de données d'état provenant de capteurs, d'actionneurs ou de systèmes de contrôle de l'entité physique [1].
* *Questionnaire* :
* Le système reçoit-il des données d'état de l'entité physique ? (Oui/Non)
* Si oui, quelles sont les sources des données ? (Capteurs, actionneurs, systèmes de contrôle)
* Les données d'état sont-elles accessibles en temps réel ou quasi réel ? (Oui/Non)
* L'identité de l'entité physique est-elle incluse dans les données ? (Oui/Non)
* Si oui, comment est-elle identifiée ? (Numéro de série, version, etc.)
* **Communication :***Définition* : Connexion entre l'entité physique et le jumeau numérique pour le transfert des données d'état [2].
* *Questionnaire* :
* Quel type de communication est utilisé ? (Continu, intermittent, programmé, à la demande)
* Le système utilise-t-il une connexion sans fil ? (Oui/Non)
* Si oui, quel protocole ? (RF, 5G, etc.)
* Quels sont les facteurs qui déterminent le type de connexion ? (Environnement, volume de données, etc.)
* **Gestion des données d'état :***Définition* : Traitement des données d'état pour assurer leur transmission et leur utilisation par le jumeau numérique [3].
* *Questionnaire* :
* Les données d'état sont-elles transformées avant la transmission ? (Oui/Non)
* Si oui, comment ? (A/D conversion, compression, etc.)
* Les données sont-elles traduites ou mises en forme ? (Oui/Non)
* Si oui, comment ? (ASCII, etc.)
* Les données sont-elles nettoyées et les erreurs corrigées ? (Oui/Non)
* Y a-t-il une gestion de mise en mémoire tampon des données ? (Oui/Non)
* **Jumelage :***Définition* : Processus de synchronisation des données d'état pour un jumelage optimal [4].
* *Questionnaire* :
* Comment la synchronisation des données est-elle gérée ?
* La synchronisation est-elle automatique ou déclenchée par un événement ?
* Quel est le taux de rafraîchissement des données d'état ?
* **Protocoles et normes :***Définition* : Protocoles utilisés pour gérer le couplage, notamment la sécurité et les communications [5].
* *Questionnaire* :
* Quels protocoles sont utilisés pour établir la connexion ?
* Des protocoles de sécurité sont-ils en place ? (Oui/Non)
* Si oui, lesquels ? (Authentification, identification, autorisation, cryptage)
* Quels sont les protocoles d'échange de données utilisés ? (SOAP, mDNS, etc.)

**B. Représentation Virtuelle**

* **Modèle de données :***Définition* : Modèles de données physiques et logiques définissant l'information utilisée dans la représentation virtuelle [6].
* *Questionnaire* :
* Le système utilise-t-il un modèle de données physique ? (Oui/Non)
* Le système utilise-t-il un modèle de données logique ? (Oui/Non)
* Si oui, quel type de modèle ? (Plat, hiérarchique, sémantique)
* Le modèle de données est-il utilisé pour l'intégration de données de différentes sources ? (Oui/Non)
* **Stockage des données opérationnelles :***Définition* : Données collectées via le couplage numérique concernant l'exploitation, l'état et l'utilisation de l'entité physique [6].
* *Questionnaire* :
* Les données opérationnelles sont-elles stockées ? (Oui/Non)
* Si oui, quelles données sont stockées ? (État, condition, utilisation, environnement)
* Quelle est la durée de conservation des données ?
* Les données sont-elles compressées ? (Oui/Non)
* **Données de référence et données maîtres :**
* *Définition* : Informations concernant l'état initial de l'entité physique, sa localisation, les informations de maintenance et de support ainsi que les données de configuration, paramètres, et limites des modèles [7].
* *Questionnaire* :
* Le système utilise-t-il des données de référence ? (Oui/Non)
* Si oui, lesquelles ? (Build state, informations géospatiales, maintenance, configuration)
* Les données de référence incluent-elles des paramètres et limites ? (Oui/Non)
* Les données de référence incluent-elles des informations d'ordre économique, financier ou règlementaire ? (Oui/Non)
* **Modèles d'entité physique :***Définition* : Modèles physiques et/ou de processus utilisés pour représenter l'opération de l'entité physique [8].
* *Questionnaire* :
* Le système utilise-t-il des modèles physiques ? (Oui/Non)
* Si oui, quel type de modèle ? (Paramétrique, computationnel, basé sur des graphes) [9]
* Les modèles utilisés sont-ils validés et vérifiés ? (Oui/Non)
* Les modèles incluent-ils une prise en compte de la randomisation ? (Oui/Non) [10]
* **Temporel :***Définition* : Capacité à modéliser la performance sur différentes périodes avec divers niveaux de granularité [8].
* *Questionnaire* :
* Le système peut-il modéliser le comportement sur différentes périodes ? (Oui/Non)
* Le système peut-il réaliser une analyse des tendances sur le long terme ? (Oui/Non)
* Comment le temps est-il représenté ? (Timestamps, marqueurs temporels)
* Le système assure-t-il la synchronisation des informations temporelles à travers les systèmes, processus et emplacements ? (Oui/Non)

**C. Outils**

* **Analyse :***Définition* : Outils pour analyser le comportement et la performance de l'entité physique [11].
* *Questionnaire* :
* Le système offre-t-il des outils d'analyse ? (Oui/Non)
* Si oui, quels types d'analyse sont disponibles ? (Texte, tendances, statistique, mathématique, etc.) [12, 13]
* L'analyse prend-elle en compte des données historiques, courantes et/ou des données futures ? (Oui/Non)
* **Simulation :***Définition* : Outils pour simuler le comportement et la performance de l'entité physique [14].
* *Questionnaire* :
* Le système offre-t-il des outils de simulation ? (Oui/Non)
* Si oui, quels types de simulation sont disponibles ? (Déterministe, stochastique, etc.)
* Les simulations permettent-elles des analyses "what-if" ? (Oui/Non)
* Peut-on inverser le temps de la simulation ? (Oui/Non) [15]
* **Présentation :***Définition* : Fonctionnalités pour visualiser les résultats d'analyse et de simulation [16].
* *Questionnaire* :
* Le système possède-t-il des outils de présentation des données ? (Oui/Non)
* Les données sont-elles transformées pour un usage humain ? (Oui/Non)
* Quel type de visualisation est proposé ? (Tableaux, graphiques, représentations 2D ou 3D)

**D. Sortie Fonctionnelle**

* **Sortie du jumeau numérique :***Définition* : Traitement nécessaire pour la visualisation et les sorties utilisables par d'autres systèmes ou l'entité physique [17].
* *Questionnaire* :
* Le système génère-t-il des sorties utilisables par d'autres systèmes ? (Oui/Non)
* Si oui, lesquelles ? (Données de configuration, paramètres, etc.)
* Les données de sorties sont-elles exploitées par l'entité physique ? (Oui/Non)
* Le système fournit-il des données aux systèmes d'entreprise ? (ERP, MRP, etc) (Oui/Non)
* **Configuration et contrôle du jumeau numérique :***Définition* : Fonctionnalité permettant à un utilisateur autorisé de modifier le fonctionnement du jumeau numérique [18].
* *Questionnaire* :
* Un utilisateur autorisé peut-il modifier le fonctionnement du jumeau numérique ? (Oui/Non)
* Les modifications peuvent-elles être apportées aux composantes fonctionnelles ? (Oui/Non)
* L'interface de configuration permet-elle une gestion de la version du jumeau numérique ? (Oui/Non) [19]
* Les modifications peuvent-elles être automatisées ? (Oui/Non)
* **Interface utilisateur :***Définition* : Moyens permettant à un humain d'interagir avec le jumeau numérique [20].
* *Questionnaire* :
* Le système possède-t-il une interface utilisateur ? (Oui/Non)
* L'interface est-elle adaptée à différents groupes d'utilisateurs ? (Oui/Non)
* Les utilisateurs peuvent-ils contrôler le jumeau numérique, analyser et simuler ses données, et l'administrer via l'interface ? (Oui/Non)
* L'interface utilisateur fait-elle appel à d'autres technologies (réalité virtuelle, augmentée, etc) (Oui/Non)
* Les données sont-elles utilisées pour mettre à jour et améliorer les modèles virtuels ?
* Le système est-il utilisé pour simuler et prévoir le comportement du système physique ?
* Le système utilise-t-il des services en nuage pour le stockage, l'analyse et la gestion des données ?
* Le système est-il capable d'analyser les données provenant de l'entité physique ?
* Le système peut-il prédire l'état futur de l'entité physique ?
* Lesystème peut-il être utilisé pour optimiser le comportement de l'entité physique ?

**Functional output: The** functional output requires actionable information to be available from the digital twin to at least one external system or human observer. Information is considered to be actionable if it allows for at least one informed decision to be made that adds either economic, social or commercial value to one or more stakeholders. For instance, information presented as a dashboard regarding the performance of a machine could provide an actionable output for scheduling preventative maintenance or automatic power monitoring could provide a daily report of which systems are just drawing idle power to save money.

***Digital Twin Platforms: Requirements, Capabilities, and Future Prospects***

**2 - Critères, caractéristiques et exigences d'un système DT**

L'article établit 13 exigences pour les plateformes DT, qui peuvent être considérées comme des conditions pour qu'un système soit un DT efficace [9]. Ces exigences sont divisées par caractéristiques de qualité [10]. Voici une liste organisée de ces exigences, avec des explications :

* **Adéquation fonctionnelle** [11] :
* **R1: Synchronisation Bx (Bidirectionnelle) :** Le DT doit permettre une communication bidirectionnelle avec son homologue physique, recevant et envoyant des données [2, 9, 12].
* **R2: Convergence :** Le DT doit rester synchronisé avec le système physique, détecter et corriger les désynchronisations [9, 12, 13].
* **R3: Vérification et Validation (V&V) :** Le DT doit être vérifié et validé avant son déploiement, en utilisant des données historiques pour assurer un comportement sûr [13, 14].
* **Performance** [14]:
* **R4: Comportement en Temps Réel :** Le DT doit permettre des interactions en temps réel avec le système physique, avec des contraintes variables entre le "edge" et le "cloud" [14, 15].
* **Compatibilité** [16]:
* **R5: Protocoles d'Automatisation :** Le DT doit prendre en charge des protocoles d'automatisation standards pour la communication entre appareils [15, 16].
* **R6: Interopérabilité de la Plateforme :** Le DT doit offrir des interfaces standardisées pour permettre l'interaction avec des services externes (visualisation, apprentissage machine, simulation) [16-18].
* **R7: Interopérabilité du Système :** Les DT de différents appareils doivent pouvoir communiquer et interagir entre eux [17, 18].
* **Utilisabilité** [19]:
* **R8: Implication d'Experts du Domaine :** La plateforme DT doit permettre aux experts du domaine de développer et d'opérer un DT sans connaissances techniques approfondies [20, 21].
* **Sécurité** [21]:
* **R9: Sécurité de la Connexion et des Données :** Les connexions entre le DT et le système physique doivent être sécurisées, et les données doivent être protégées [21, 22].
* **Maintenabilité** [23]:
* **R10: Modifiabilité :** Les DT doivent pouvoir être modifiés en cas de changement dans le système physique [23, 24].
* **R11: Réutilisabilité :** Le DT doit être composé de composants réutilisables dans d'autres contextes et projets [23-25].
* **Portabilité** [25]:
* **R12: Intégration et Déploiement Continus (CI/CD) :** La plateforme DT doit supporter CI/CD pour intégrer et déployer rapidement les modifications [25, 26].
* **R13: Provisionnement :** La plateforme DT doit pouvoir être déployée dans le "cloud", sur le "edge", ou localement [25, 26].

**Questionnaire d'Évaluation du Jumeau Numérique**

**Introduction :** Ce questionnaire vise à évaluer un système en tant que jumeau numérique (DT) potentiel, en se basant sur les exigences identifiées dans l'article.

**I. Adéquation fonctionnelle**

* **Synchronisation Bx :**Le système établit-il automatiquement une communication bidirectionnelle avec les appareils physiques ? (Oui/Partiellement/Non)
* Si partiellement, quelle quantité de programmation manuelle est nécessaire pour établir cette communication ?
* **Convergence :**Le système fournit-il un support automatique pour assurer la convergence entre le DT et son homologue physique ? (Oui/Partiellement/Non)
* Si partiellement, quel environnement est fourni pour implémenter manuellement la convergence ?
* **Vérification et Validation (V&V) :**Le système fournit-il une suite de tests pour des fonctionnalités spécifiées ? (Oui/Partiellement/Non)
* Les exigences peuvent-elles être définies et exécutées avant le déploiement du DT ? (Oui/Partiellement/Non)
* Le système détecte-t-il automatiquement des structures invalides (par exemple, des données envoyées par un capteur sans DT correspondant) ? (Oui/Partiellement/Non)

**II. Performance**

* **Comportement en Temps Réel :**Le système offre-t-il une interface en temps réel sur le "edge" ? (Oui/Partiellement/Non)
* Le système a-t-il des capacités pour évaluer les contraintes en temps réel souples dans le "cloud" ? (Oui/Partiellement/Non)

**III. Compatibilité**

* **Protocoles d'Automatisation :**Le système prend-il en charge au moins deux protocoles d'automatisation répandus (MTConnect, OPC UA, Siemens S7, etc.) ? (Oui/Partiellement/Non)
* Si partiellement, quel(s) protocole(s) est/sont supporté(s) ?
* **Interopérabilité de la Plateforme :**Le système fournit-il des interfaces standardisées pour récupérer les données DT ? (Oui/Partiellement/Non)
* Le système fournit-il des interfaces standardisées pour effectuer des changements aux DT depuis des services externes ? (Oui/Partiellement/Non)
* **Interopérabilité du Système :**Le système permet-il de définir des connexions entre différents appareils via leurs DT ? (Oui/Partiellement/Non)
* Le système implémente-t-il automatiquement des interactions basées sur ces connexions ? (Oui/Partiellement/Non)

**IV. Utilisabilité**

* **Implication d'Experts du Domaine :**Le système permet-il aux experts du domaine de modéliser des appareils physiques, leurs types et leurs données de manière structurée ? (Oui/Partiellement/Non)
* Le système fournit-il une interface graphique pour modéliser des DT ? (Oui/Partiellement/Non)

**V. Sécurité**

* **Sécurité de la Connexion et des Données :**Le système fournit-il une authentification et autorisation sécurisée pour établir une connexion entre le DT et le système physique ? (Oui/Partiellement/Non)
* Le système fournit-il des capacités pour chiffrer les données envoyées, reçues et stockées par le DT ? (Oui/Partiellement/Non)

**VI. Maintenabilité**

* **Modifiabilité :**Le DT peut-il être modifié pendant son exécution ? (Oui/Partiellement/Non)
* Si partiellement, le DT peut-il être modifié une fois inactif après son déploiement ?
* **Réutilisabilité :**Le système offre-t-il des composants personnalisés et pré-construits qui peuvent être réutilisés entre différents projets ? (Oui/Partiellement/Non)
* Si partiellement, les composants peuvent-ils être réutilisés au sein d'un même projet ?

**VII. Portabilité**

* **Intégration et Déploiement Continus (CI/CD) :**Le système offre-t-il un pipeline CI/CD complet ? (Oui/Partiellement/Non)
* Si partiellement, CI ou CD est-il offert ou peut-il être intégré ?
* **Provisionnement :**Le système offre-t-il des solutions de déploiement "on-site" et "cloud-native" ? (Oui/Partiellement/Non)
* Si partiellement, seulement "on-site" ou seulement "cloud-native" est-il offert ?

**Conclusion :** Les réponses à ce questionnaire permettront d'évaluer de manière structurée si le système analysé peut être considéré comme un DT complet et performant.

***Properties and Characteristics of Digital Twins: Review of Industrial Definitions***

L'étude a mis en évidence l'existence d'un écart entre la recherche et la pratique, car les entreprises ont des approches et des définitions différentes de celles de la littérature académique. Les entreprises recherchent une définition générique qui peut être utilisée dans divers domaines d'application et qui permet de comprendre le concept de jumeau numérique.

Utilisation limitée par les entreprises : L'étude a révélé que peu d'entreprises publient des définitions de jumeaux numériques sur leurs sites web (seulement 7,5 % des 1 317 sites web analysés)

*Critères, caractéristiques et conditions pour considérer un système comme un jumeau numérique :*

L'article présente une taxonomie qui comprend 10 propriétés et plusieurs caractéristiques pour évaluer un jumeau numérique. Voici les propriétés et les caractéristiques du système qui peuvent être considérés comme des critères d'évaluation [5] :

**Contrepartie** : Définit le type d'entité que le jumeau numérique représente [10].

* **Uniquement les objets physiques** : Le jumeau numérique représente uniquement des objets physiques [11].
* **Également des objets non physiques** : Le jumeau numérique représente également des processus ou des services [11].
* **Toute entité distincte** : Le jumeau numérique représente tout type d'entité, qu'elle soit physique ou non [11].

**Sources de données** : Identifie les sources de données utilisées par le jumeau numérique [12].

* **Capteurs** : Le jumeau numérique utilise des données provenant de capteurs [13].
* **Systèmes internes** : Le jumeau numérique utilise des données provenant de systèmes d'information internes [13].
* **Systèmes externes** : Le jumeau numérique utilise des données provenant de systèmes d'information externes [13].

**Liaison de données** : Décrit la direction du flux de données entre le jumeau numérique et son équivalent dans le monde réel [14].

* **Unidirectionnelle** : Les données circulent uniquement du monde réel vers le jumeau numérique [15].
* **Bidirectionnelle** : Les données circulent dans les deux sens entre le monde réel et le jumeau numérique [15].

**Interfaces** : Définit les moyens par lesquels le jumeau numérique communique avec les utilisateurs et les autres systèmes [16].

* **Homme-machine (H2M)** : Les humains interagissent avec le jumeau numérique [16].
* **Machine-machine (M2M)** : Le jumeau numérique communique directement avec d'autres systèmes ou jumeaux numériques [16].

**Fidélité** : Mesure la précision avec laquelle le jumeau numérique représente son équivalent dans le monde réel [17].

* **Représentation 1:1** : Le jumeau numérique est une copie exacte de son équivalent dans le monde réel [18].
* **Représentation suffisante** : Le jumeau numérique est suffisamment précis pour son cas d'utilisation spécifique [18].

**Synchronisation** : Spécifie la fréquence à laquelle le jumeau numérique est mis à jour avec les données du monde réel [19].

* **Temps réel** : Le jumeau numérique est mis à jour en temps réel avec les données du monde réel [19].
* **Quasi temps réel** : Le jumeau numérique est mis à jour à intervalles rapprochés [19].
* **Périodique** : Le jumeau numérique est mis à jour à intervalles réguliers [19].

**Capacités** : Décrit les fonctions que le jumeau numérique peut exécuter [20].

* **Simulation** : Le jumeau numérique peut simuler le comportement de son équivalent dans le monde réel [21].
* **Optimisation** : Le jumeau numérique peut optimiser les processus ou les performances [21].
* **Prédiction** : Le jumeau numérique peut prévoir des événements ou des résultats futurs [21].
* **Détection** : Le jumeau numérique peut détecter des anomalies ou des problèmes [21].
* **Prévention** : Le jumeau numérique peut empêcher des événements indésirables [21].
* **Automatisation** : Le jumeau numérique peut automatiser des tâches ou des processus [21].

**Objectif** : Décrit le but ou les avantages que le jumeau numérique est censé fournir [22].

* **Performance** : Le jumeau numérique améliore les performances [23].
* **Disponibilité** : Le jumeau numérique améliore la disponibilité [23].
* **Qualité** : Le jumeau numérique améliore la qualité [23].

**Cycle de vie** : Indique les étapes du cycle de vie du produit dans lesquelles le jumeau numérique est utilisé [24].

* **Début de vie (BoL)** : Le jumeau numérique est utilisé dans les phases de conception, de fabrication et de distribution [24].
* **Milieu de vie (MoL)** : Le jumeau numérique est utilisé pendant la phase d'utilisation du produit [24].
* **Fin de vie (EoL)** : Le jumeau numérique est utilisé pendant la phase de recyclage, de récupération énergétique et d'élimination [24].

**Création** : Définit le moment de la création du jumeau numérique par rapport à son homologue dans le monde réel [25].

* **Types/instances distingués** : le jumeau numérique fait la distinction entre les types (prototypes) et les instances [25].
* **Création indépendante du jumeau numérique** : le jumeau numérique peut être créé avant son homologue physique [25].

**3. Questionnaire d'évaluation du jumeau numérique**

Voici un questionnaire d'évaluation du jumeau numérique basé sur les propriétés et les caractéristiques décrites dans l'article :

**Questionnaire d'évaluation du jumeau numérique**

**Contre partie**

* Quel type d'entité votre jumeau numérique représente-t-il ? (Uniquement des objets physiques / Également des objets non physiques / Toute entité distincte)
* Pourquoi avez-vous choisi ce type de contrepartie ?

**Sources de données**

* Quelles sources de données votre jumeau numérique utilise-t-il ? (Capteurs / Systèmes internes / Systèmes externes)
* Comment les données sont-elles collectées et intégrées dans le jumeau numérique ?
* Quels types de données sont utilisés ?

**Liaison de données**

* Comment les données circulent-elles entre le monde réel et votre jumeau numérique ? (Unidirectionnelle / Bidirectionnelle)
* Les liaisons sont-elles automatiques ou manuelles ?

**Interfaces**

* Comment les utilisateurs interagissent-ils avec votre jumeau numérique ? (Homme-machine (H2M) / Machine-machine (M2M))
* Quels sont les types d'interfaces utilisées ?

**Fidélité**

* Quelle est la précision de la représentation du monde réel par votre jumeau numérique ? (Représentation 1:1 / Représentation suffisante)
* Comment la fidélité de la représentation a-t-elle été définie en fonction du cas d'utilisation ?

**Synchronisation**

* Quelle est la fréquence de mise à jour de votre jumeau numérique ? (Temps réel / Quasi temps réel / Périodique)
* Comment la fréquence de synchronisation est-elle déterminée ?

**Capacités**

* Quelles fonctions votre jumeau numérique peut-il exécuter ? (Simulation / Optimisation / Prédiction / Détection / Prévention / Automatisation)
* Comment ces capacités sont-elles utilisées dans votre cas d'utilisation ?

**Objectif**

* Quel est le but de votre jumeau numérique ? (Performance / Disponibilité / Qualité)
* Comment ces objectifs sont-ils atteints ?

**Cycle de vie**

* À quelles étapes du cycle de vie votre jumeau numérique est-il appliqué ? (Début de vie (BoL) / Milieu de vie (MoL) / Fin de vie (EoL))
* Pourquoi ces étapes spécifiques ont-elles été choisies ?

**Création**

* Quand votre jumeau numérique est-il créé par rapport à son homologue dans le monde réel ? (Types/instances distingués / Création indépendante du jumeau numérique)
* Quel est l'impact de ce choix sur le développement du jumeau numérique ?

**Cas d'utilisation**

* Décrivez brièvement le cas d'utilisation spécifique de votre jumeau numérique.
* Comment votre jumeau numérique apporte-t-il de la valeur dans ce cas d'utilisation ?
* Quels sont les défis d'implémentation de votre jumeau numérique ?

***[Many articles at the same time !]***

**Criteria, Features, Characteristics, and Requirements**

The key criteria, features, characteristics, and requirements for a system to be considered a digital twin:

**Core Components:**

* **Physical Entity:** The real-world object, system, or process that the digital twin represents [39, 50]. This could be a single device or an extensive system [39].
* **Virtual Model:** A digital representation or copy of the physical entity, describing its properties in multiple dimensions [39]. It includes geometric dimensions and material properties [39].
* **Twin Data:** Data that includes physical, virtual, knowledge and derivative data which drives and connects the physical and virtual components [39, 46]. Data is used to monitor the physical entity and drive the virtual model.

**Key Characteristics:**

* **Bi-Directional Data Flow:** A fully integrated and automated flow of data between the physical entity and its digital representation [51, 52].
* **Real-Time Synchronization:** The ability to seamlessly synchronize data with the real-world counterpart, allowing for continuous monitoring and simulation [52].
* **Connectivity:** Network devices that ensure seamless connectivity and data exchange, either directly or via the cloud [53, 54].
* **Representativeness and Contextualization:** The ability of the digital twin to accurately represent the physical entity within a specific application context, considering the source of data and environment [23].
* **Reflection and Replication:** The virtual model's ability to replicate the physical entity's behavior and states [23].
* **Persistency:** The ability to maintain a log of status changes and maintain the state of both the physical and virtual entities [23].
* **Composability:** The capacity to integrate various methods, models, and processes, and integrate with other digital twins [23, 24].
* **Adaptivity:** The ability to adjust to new conditions and optimize its behavior [48].
* **Autonomy**: The capacity to function with minimal human intervention, capable of self-adaptation, regulation, monitoring, and diagnosis [36, 48].
* **Context-Awareness:** The ability to understand its environment and collect data with context-awareness features [23, 48].

**Essential Elements (From "** **Digital twins: State-of-the-art and future directions for modelling and simulation in engineering dynamics applications"):**

* **Simulation:** The ability to simulate the behavior of the physical entity .
* **Learning:** The ability to learn from data and improve the model .
* **Management:** The ability to manage the data and processes associated with the digital twin .
* **Requirements:**
* **Storage Capabilities:** To maintain a log of status changes [49].
* **Application Programming Interfaces (APIs):** To offer methods and functionalities to other services [49].
* **Structured Coordination:** A bespoke workflow for integrating all required processes [5].
* **Uncertainty Management:** The ability to manage and reduce uncertainties [5].
* **Model Validation:** Verification and validation of the model [2, 4].
* **Interoperability and Reusability**: Implemented with documented design patterns, avoiding loose standards [49].

**3. Digital Twin Evaluation Questionnaire**

Based on the above criteria, here is a Digital Twin Evaluation Questionnaire:

**Digital Twin Evaluation Questionnaire**

**I. Core Components:**

**Physical Entity:**

* *Definition:* Is there a clearly defined physical object, system, or process that the digital twin represents?
* **Description:** Describe the physical entity (e.g., machine, factory, human, process).
* **Functionality:** What is the function and purpose of the physical entity?

**Virtual Model:**

* *Definition:* Is there a digital representation or model of the physical entity?
* **Description:** Describe the nature of the virtual model (e.g., 3D model, simulation model, data model).
* **Fidelity:** How closely does the virtual model represent the physical entity?

**Twin Data**

* *Definition:* Is there data generated from the physical and virtual entity and does this data drive the virtual model?
* **Type**: What types of data are collected, such as physical data (sensor readings, measurements), virtual data (simulation results, model parameters), knowledge and derivative data.
* **Communication**: How is the data exchanged between physical and virtual entity, and is the data secure?

**II. Key Characteristics:**

**Bi-Directional Data Flow:**

* **Question:** Is there a two-way flow of data between the physical entity and the virtual model?
* **Description:** Describe the type of data that is exchanged and how is it used to update both models.

**Real-Time Synchronization:**

* **Question:** How often is the data synchronized between the physical entity and the virtual model?
* **Evaluation:** Is the synchronization near real-time or periodic?

**Connectivity**

* **Question:** What devices and network ensure seamless connectivity and data exchange?
* **Description:** Is the data exchange direct or cloud-based?

**Representativeness and Contextualization:**

* **Question:** How accurately does the digital twin represent the physical entity within its context?
* **Description:** Describe the context in which the digital twin operates.

**Reflection and Replication:**

* **Question:** How accurately does the virtual model replicate the physical entity’s behavior and states?
* **Description:** What methods or tools are used for this replication?

**Persistency:**

* **Question:** Does the digital twin maintain a log of status changes and maintain the state of both physical and virtual entities?
* **Description:** How is historical data kept and is this data used?
* **Composability:Question:** Can the digital twin be integrated with other systems and methods?
* **Description:** What methods, models, and processes are used for integration?

**Adaptivity:**

* **Question**: Can the digital twin adjust to new conditions and optimize its behavior?
* **Description**: How does the digital twin handle changes and adjust accordingly?

**Autonomy:**

* **Question:** How much human intervention is needed to function? Is it self-regulating, self-monitoring, and self-diagnosing?
* **Description:** Describe the level of autonomy and the processes used.

**Context-Awareness:**

* **Question:** Can the digital twin understand and adapt to its environment?
* **Description:** How does the digital twin collect and use contextual data?

**III. Essential Elements:**

**Simulation:**

* **Question:** Can the virtual model simulate the behavior of the physical entity?
* **Description:** What methods or software are used for simulation?

**Learning:**

* **Question:** Does the system learn from the data and improve its models?
* **Description:** What AI or ML algorithms are used?

**Management:**

* **Question:** How does the system manage the data and processes?
* **Description:** Is there a system in place to oversee and manage the different components?

**IV. Requirements:**

**Storage Capabilities:**

* **Question:** How does the system store data and status changes?
* **Description:** Is there sufficient storage capacity?

**Application Programming Interfaces (APIs):**

* **Question:** Are there APIs to facilitate interaction with other services?
* **Description:** What APIs are implemented and for what purpose?

**Structured Coordination:**

* **Question:** Is there a specific workflow that integrates all the required processes?
* **Description:** Describe the workflow and how it ensures the integration of all processes.

**Uncertainty Management:**

* **Question:** How does the system manage and reduce uncertainties?
* **Description:** What tools or methods are used to handle uncertainty?

**Model Validation:**

* **Question**: How are the models verified and validated?
* **Description:** What methods are used for verification and validation of the model?

**Interoperability and Reusability**:

* **Question**: Are documented design patterns used and do they avoid loose standards to allow for interoperability and reusability?
* **Description:** Are there any limitations and is the DT interoperable with other DTs?

**4. Digital Twin Levels, Variations, and Similar Technologies**

Several sources discuss different levels, variations, and related technologies:

**Digital Twin Maturity Levels ("A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model"):** This paper introduces a five-level maturity model (DTMM) for digital twins:

* **Level 1:** Basic digital representation of a physical entity.
* **Level 2:** Includes data connectivity with the physical entity.
* **Level 3:** High-fidelity virtual models with two-way communication.
* **Level 4:** Automation and integration of various functions.
* **Level 5:** Self-optimization and autonomous operation.

**Digital Twin Sophistication Levels ("** **Digital twins: State-of-the-art and future directions for modelling and simulation in engineering dynamics applications"):** This paper defines five levels of sophistication:

* **Pre-Digital Twin:** A system capable of being a digital twin, but lacking essential elements [55].
* **Simulation Digital Twin:** A digital twin with simulation capabilities [55]. The other levels are not defined in this excerpt.
* **Digital Twin 8-dimension model** ("read 44433.pdf"): This model provides each layered model of 8 Digital Twin dimensions. Its technical levels can be considered from a maturity perspective [15].
* **Digital Shadow** ("read kinda.pdf"): Unlike a digital twin with bi-directional data flow, a digital shadow primarily focuses on representing the state of a physical object in the digital realm [52]. It lacks the interactivity and autonomous evolution of a digital twin and mainly emphasizes gathering and analyzing historical data [52].
* **Cyber-Physical Systems (CPS)**
* **Product Lifecycle Management (PLM)**
* **Digital Thread**: A digital thread covers the development cycle of a product, and is used for making predictions and decisions [58]. The digital thread also has a role in creating sustainable environments, whereas the DT processes the data sent by the physical entity [58].
* **Building Information Modeling (BIM)**
* **Information Systems**

**5. Unified Maturity Model for Digital Twins**

Creating a single unified maturity model based on all the sources is challenging because they offer different perspectives. However, I can combine elements from several models to create a comprehensive model:

**Unified Digital Twin Maturity Model**

* **Level 0: Pre-Digital Twin**
* Description: A system that has the potential to be a digital twin but lacks key functionalities and characteristics.
* Characteristics: May have some digital data related to the physical entity but lacks real-time or bi-directional data exchange [55].
* **Level 1: Basic Digital Representation**
* Description: A basic digital model or representation of a physical entity.
* Characteristics: May have a static digital model, but no real-time connection or bi-directional data flow. Focus on data collection and monitoring without control [10, 20].
* **Level 2: Connected Digital Twin**
* Description: A digital twin with data connectivity to the physical entity.
* Characteristics: Includes data connectivity for monitoring and visualization, and may have basic simulation capabilities. Data is being collected but there are limited autonomous or learning functions [20, 40, 41].
* **Level 3: Interactive Digital Twin**
* Description: A high-fidelity virtual model with bi-directional communication, and feedback control.
* Characteristics: Enables two-way data exchange, more accurate virtual model, real-time monitoring, simulation and interaction. Includes data processing, analytics and decision-making support [20, 41].
* **Level 4: Autonomous Digital Twin**
* Description: Includes automated processes and integration of various functions, enabling greater level of self-regulation, self-adaptation, and prediction.
* Characteristics: High level of interaction and optimization and autonomous operation. May include AI/ML capabilities for learning and adaptation with a focus on prediction and optimization [36, 61].
* **Level 5: Adaptive and Context-Aware Digital Twin**
* Description: A digital twin that is self-optimizing, autonomous and context-aware, with a high degree of adaptability, autonomy and the capacity to function within diverse contexts.
* Characteristics: Real-time optimization, self-diagnosis and fully autonomous operations with the ability to manage uncertainty, model validation and adaptability to new conditions. Full closed loop communication between physical and virtual entities [36, 48].

**Différence entre jumeau numérique et système cyber-physique (CPS) :** Le document distingue clairement un jumeau numérique d'un CPS. Le CPS est un système holistique où les éléments numériques et physiques sont intrinsèquement liés et nécessaires à son fonctionnement [24]. Le jumeau numérique, quant à lui, est un modèle virtuel interconnecté qui représente l'objet physique, mais n'est pas essentiel au fonctionnement de ce dernier [25]. L'entité physique peut fonctionner de manière autonome sans son jumeau numérique [24].

Internet des objets (IoT)

Simulation

Extended reality

BIM

Information system (ERP, SAP, WMS)

Disclaimers:

This survey is mainly used to evaluate if the respondent is modeling a digital twin. This relates mainly to the standard of the art qualification and requirements of a digital twin definition but doesn’t necessarily regard the finesse of said system. Questions like the following examples aren’t considered as they are too practical:

* Quel type de méthodologie de modélisation est utilisé (choisir toutes les options applicables) ? Modèles basés sur la physique - Modèles axés sur les données -Modèles d'apprentissage automatique …
* Le modèle virtuel est-il une abstraction mathématique ou une simulation qui vise à simuler ou à reproduire le comportement de son homologue physique ?
* Les données sont-elles traitées pour éliminer le bruit, les valeurs aberrantes ou les informations inutiles ?
* Le système utilise-t-il l'analyse de données pour fournir des informations utiles sur le système physique ?
* Quels sont les objectifs de l'utilisation du système de JN ? (Veuillez choisir toutes les options applicables)
* Le système utilise-t-il des systèmes cyber-physiques (SCP), l'Internet des objets (IdO) ou l'apprentissage automatique (AA)/l'intelligence artificielle (IA) ?

However, the references that have insinuated these questions are used in training the LLM for further and pointed assistance to the respondent when using the gpt.

``

Once the questionnaire is completed, the Streamlit application for Digital Twin maturity assessment and recommendations should:

* Provide immediate feedback based on the scores and comments.
* Generate actionable recommendations for improvement.
* Allow ongoing user queries.

**Training and Knowledge Base**: Use the provided PDFs to train your GPT model or enhance its knowledge using embeddings or fine-tuning. This involves:

* Extracting relevant knowledge about Digital Twins, their maturity, AI integration, and warehouse management.
* Preparing a dataset from the PDF, ensuring key concepts and case studies are easily accessible.

**Survey Participant hunt (Whitney):**

**Evaluation Method (post survey)**

Fuzzy logic, pioneered by Zadeh in 1965, provides a robust mathematical framework for handling imprecise or ambiguous data, which is often encountered in real-world scenarios. In the context of evaluating Digital Twins (DTs), fuzzy logic enables the quantification of qualitative judgments and the integration of subjective assessments into a structured evaluation process. By defining fuzzy sets and rules, evaluators can analyze the performance of DTs across various dimensions, even when precise measurements or binary decisions are not feasible.

Digital Twins, being complex systems with dynamic interactions between physical and virtual entities, require an evaluation methodology that can capture nuances like partial performance, intermediate system states, and varying degrees of achievement. Fuzzy logic facilitates this by:

* Allowing **linguistic variables** (e.g., Low, Medium, High) to replace rigid numeric inputs.
* Utilizing **membership functions** to assess the degree to which a particular input belongs to a category.
* Supporting **fuzzy inference systems (FIS)** that aggregate and interpret diverse input data to generate actionable insights.

This approach aligns with modern research trends in evaluating cyber-physical systems and predictive modeling, as it provides a scalable, adaptive, and interpretable methodology.

**Methodology for Fuzzy Logic Implementation in DT Evaluation:**

1. **Definition of Linguistic Variables and Membership Functions:**
   * Define key evaluation criteria (e.g., quality, performance, accuracy) as linguistic variables.
   * Use membership functions (e.g., triangular or trapezoidal) to represent degrees of membership for each variable.
   * Example:
     + **Quality**: Low (0–5), Medium (3–7), High (5–10).
     + **Performance**: Low (0–5), Medium (3–7), High (5–10).
2. **Rule-Based Fuzzy Inference System (FIS):**
   * Construct logical rules that define relationships between inputs and outputs.
   * Example rules:
     + If **Quality** is Low or **Performance** is Low, then the **Score** is Poor.
     + If **Quality** is Medium and **Performance** is Medium, then the **Score** is Average.
     + If **Quality** is High and **Performance** is High, then the **Score** is Excellent.
3. **Fuzzy Aggregation and Defuzzification:**
   * Combine fuzzy input variables using logical operations (e.g., AND, OR).
   * Aggregate the results into a crisp output (e.g., overall score) using defuzzification methods such as centroid or mean of maxima.
4. **Integration into the Evaluation Framework:**
   * Replace rigid scoring methods with fuzzy linguistic inputs.
   * Use sliders or other interactive widgets in Streamlit to collect evaluator inputs in linguistic terms.
   * Process these inputs using the fuzzy inference system to generate scores and insights.
5. **Advantages of Fuzzy Logic for DT Evaluation:**
   * Handles ambiguity and partial truths effectively.
   * Reflects expert knowledge and domain-specific heuristics in a structured way.
   * Provides interpretable results that align with human reasoning.

This methodology, supported by a fuzzy logic engine, ensures that the evaluation framework is both rigorous and flexible, accommodating the complex and dynamic nature of Digital Twin systems. Let me know if you'd like me to refine or extend this methodology or implement additional elements into the framework!

**WMS :**

The advancements of Industry 4.0, particularly through the integration of cyber-physical systems like Digital Twins (DT), have unlocked new possibilities for sustainable warehousing (Oloruntobi et al., 2023; Nantee & Sureeyatanapas, 2021). DT technology enables the creation of real-time virtual replicas of physical warehouse environments, allowing precise tracking, simulation, and optimization of resource use and emissions across functional areas such as sorting, picking, and storage (Drissi Elbouzidi et al., 2023; Perotti & Colicchia, 2023). This aligns with Industry 5.0’s focus on sustainability and human-centric processes, enhancing both environmental goals and worker well-being (Möller et al., 2022; Grosse, 2024).

DTs bridge the operational efficiency of Industry 4.0 with the ethical imperatives of Industry 5.0 by integrating with data from WMS to deliver actionable insights. Through predictive analytics, real-time monitoring, and scenario modeling, DTs optimize warehouse operations and facilitate sustainable reporting while aligning them with sustainability objectives.

SWM faces significant challenges due to the lack of standardized sustainability metrics and comprehensive measurement frameworks (Rüdiger, 2016). Many studies fail to integrate the environmental, social, and economic pillars of sustainability cohesively, leaving critical gaps in their applicability (Ahmad et al., 2018). The development of Sustainable Warehouse Management Systems (SWMS) remains hindered by the complexity of addressing diverse sustainability factors (Torabizadeh et al., 2019). While WMS are widely used for inventory and operational efficiency, their potential to promote sustainability remains underdeveloped (Happonen & Minashkina, 2021). Advanced functionalities, such as tracking energy consumption, waste generation, and carbon emissions, are largely absent. Though a WMS can optimize processes like material handling and route planning to reduce energy use, explicit strategies for integrating sustainability objectives are lacking (Torabizadeh et al., 2020; Minashkina & Happonen, 2023). Additionally, integrating technologies like IoT and cyber physical systems with WMS shows promise but is often cost-prohibitive and hampered by outdated systems and limited interoperability (Minashkina, 2024). According to the 2024 Warehouse/DC Operations Survey, 93% of respondents use WMS, but 45% report outdated equipment and 44% still rely on paper-based picking, limiting the capacity of a WMS to advance sustainability (Michele, 2024).

Despite these advances, the adoption of DTs for green warehousing is still in its nascent stages. Many companies are hesitant to invest in the necessary infrastructure due to high initial costs and the complexity of implementation (Maheshwari et al., 2023). However, as regulatory pressures increase and sustainability becomes a competitive advantage, the integration of DTs with WMS offers a viable pathway for achieving both operational efficiency and environmental stewardship (Kamble et al., 2022). Future research should focus on developing standardized sustainability indicators for DT-enabled warehousing, addressing gaps in data availability, and exploring the socio-economic impacts of these technologies (Drissi Elbouzidi et al., 2023).

Step 3- Configuring the DT: activity parameters are configured to be calculated for each resource in the DT. This is where the DT surpasses traditional information systems like WMS, as it enables tracking information that is rarely available in real-life without advanced instrumentation. For instance, forklift operating time can be directly monitored through the DT to calculate their direct process emissions, which is typically challenging or impossible in physical warehouses without specialized tools. Most conventional tools and methods rely on contractual data, such as estimated operating hours provided at the time of equipment acquisition. However, the DT allows for calculating impacts based on actual field data and simulated scenarios, offering a higher level of precision for dynamic, resource-specific environmental assessments, bridging critical data gaps often encountered in traditional systems.

Without DT integration, reliance on WMS limits operational insights, as shown in Table 3, highlighting the difference between the data available.



The DT offers a more detailed dataset, accurately modeling real-life processes and capturing data that a WMS cannot, such as auxiliary movement of forklifts. These activities can nearly double operational time, which WMS cannot fully track as it only records time intervals between pallet scans to estimate transportation time.

* Beaucoup de question sur le rôle d’un WMS sur l’étude elle-même. Comme mentionner plusieurs fois. Dans un entrepôt, surtout un entrepôt manuel, les sources de données d’un jumeau numérique au finale se résume au WMS. Celui la indirectement rempli déjà pas mal de critères concernant les caractéristique d’un JN et donc la question se pose : Comment basculer du WMS actuel, « statique » vers le WMS de demain qui est essentially un JN ? est ce que le JN est la suite du WMS ? comment intégrer un JN à un WMS peut-être et pas le contraire ?
  + ***WMS 🡪 JN : transition ou rupture ?*** (et voir avec les modèles économique ? whatever that means)
  + ***Serait le WMS au bout d’un moment capable d’absorber le JN ?***

1. Consider emphasizing the practical challenges of integrating DT technologies with existing WMS in manual versus automated warehouses.
2. Address scalability and interoperability challenges when considering a hybrid WMS-DT system.
3. Discuss sustainability implications, as DTs could optimize resources better than current WMS.

***Un schéma de***

***# Digital Twin Assessment Template for Warehouse Management System (WMS)***

***This template provides a structured framework to evaluate and guide the development of a digital twin for a Warehouse Management System (WMS). It includes key characteristics, metrics, and actionable criteria based on academic and industrial research.***

***---***

***## \*\*1. Core Characteristics of Digital Twins\*\****

***### \*\*1.1. Physical-Digital Synchronization\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Continuous bidirectional data flow between the physical warehouse and its digital representation.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Are physical assets (e.g., shelves, forklifts) represented digitally?***

***- Is there real-time data exchange?***

***- Are updates automated without manual intervention?***

***### \*\*1.2. Real-Time Data Integration\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Real-time updates for inventory, environmental conditions, and operational events.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Is inventory updated live as items move?***

***- Are environmental IoT sensors integrated (e.g., temperature, humidity)?***

***- Can the system detect and display operational anomalies in real time?***

***### \*\*1.3. Simulation Capability\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Ability to simulate and predict outcomes under various scenarios.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Can the system simulate optimal picking routes?***

***- Does it model operational bottlenecks?***

***- Are "what-if" scenarios supported (e.g., peak demand)?***

***### \*\*1.4. Analytics and Decision Support\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Integration of analytics tools for optimization and forecasting.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Are predictive analytics used for inventory demand?***

***- Can it provide decision recommendations (e.g., storage rearrangements)?***

***- Is AI/ML integrated for advanced analytics?***

***### \*\*1.5. Feedback Loop\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Mechanism to implement digital decisions in the physical warehouse.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Are decisions (e.g., forklift deployment) reflected in the physical system?***

***- Is there an automated feedback mechanism for actions?***

***---***

***## \*\*2. Warehouse-Specific Criteria\*\****

***### \*\*2.1. Inventory Management\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Real-time tracking of inventory movement and status.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Does the system track SKU locations?***

***- Are inventory levels synchronized across the supply chain?***

***### \*\*2.2. Resource Utilization\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Monitoring and optimization of resources like forklifts, staff, and robots.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Are forklift routes optimized digitally?***

***- Does the system provide resource allocation recommendations?***

***### \*\*2.3. Environmental Monitoring\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Monitoring warehouse conditions for compliance and operational efficiency.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Are environmental metrics (e.g., temperature) integrated into the system?***

***- Can anomalies trigger automated responses (e.g., cooling systems)?***

***### \*\*2.4. Integration with Supply Chain Systems\*\****

***- \*\*Requirement:\*\* Seamless integration with external systems like ERP and IoT.***

***- \*\*Checklist:\*\****

***- Is the WMS integrated with supplier databases?***

***- Does it communicate with delivery tracking systems?***

***---***

***## \*\*3. Evaluation Metrics\*\****

***### \*\*3.1. Data Latency\*\****

***- \*\*Measurement:\*\* Time taken for updates to propagate from physical to digital and vice versa.***

***- \*\*Target:\*\* <1 second.***

***### \*\*3.2. Simulation Accuracy\*\****

***- \*\*Measurement:\*\* Deviation between predicted and actual outcomes.***

***- \*\*Target:\*\* <5% deviation.***

***### \*\*3.3. System Uptime\*\****

***- \*\*Measurement:\*\* Percentage of operational availability.***

***- \*\*Target:\*\* >99% uptime.***

***### \*\*3.4. Feedback Implementation Time\*\****

***- \*\*Measurement:\*\* Time taken for digital decisions to be executed physically.***

***- \*\*Target:\*\* <5 seconds.***

***---***

***## \*\*4. Implementation Plan\*\****

***### \*\*4.1. Gap Analysis\*\****

***1. Assess current WMS capabilities against the checklist.***

***2. Identify missing functionalities (e.g., real-time IoT integration).***

***### \*\*4.2. Prioritization\*\****

***- High Priority: Real-time inventory tracking, simulation capabilities.***

***- Medium Priority: Environmental monitoring, predictive analytics.***

***- Low Priority: Advanced AI/ML tools.***

***### \*\*4.3. Development Roadmap\*\****

***1. Phase 1: Implement real-time tracking and synchronization.***

***2. Phase 2: Integrate simulation and decision support.***

***3. Phase 3: Add analytics and feedback automation.***

***### \*\*4.4. Pilot Testing\*\****

***- Run pilots in a controlled warehouse environment.***

***- Measure performance against evaluation metrics.***

***---***

***## \*\*5. Continuous Improvement\*\****

***1. Regularly review system performance using defined metrics.***

***2. Incorporate user feedback for feature enhancements.***

***3. Stay updated with advances in digital twin technologies.***

***---***

***This assessment template should serve as a robust foundation for evaluating and implementing digital twins in warehouse management systems. For detailed support, customization, or case-specific implementation, consult domain experts.***

***To create a comprehensive guide and checklist to determine if a system qualifies as a digital twin, especially in the context of a warehouse management system (WMS), we can proceed with the following steps:***

***1. Defining Key Properties of a Digital Twin***

***Based on academic and industrial literature, a digital twin should exhibit the following key properties:***

1. ***Physical-Digital Synchronization:***
   * ***Continuous and bidirectional data flow between the physical system and its digital counterpart.***
2. ***Real-Time Data Integration:***
   * ***Real-time or near-real-time updates of operational data.***
3. ***Simulation Capability:***
   * ***The ability to model, simulate, and predict system behavior.***
4. ***Analytics and Decision Support:***
   * ***Integration of advanced analytics, machine learning, or optimization to support decision-making.***
5. ***Feedback Loop:***
   * ***Mechanism for implementing decisions in the physical system based on digital analysis.***
6. ***System Representativeness:***
   * ***High-fidelity representation of the physical system, including its states and processes.***
7. ***Interoperability:***
   * ***Ability to integrate and communicate with other systems and IoT devices.***
8. ***Historical Data Storage:***
   * ***Logging of historical performance data for analysis and trend forecasting.***
9. ***Scalability:***
   * ***Flexibility to scale up or integrate additional components.***
10. ***Cybersecurity and Privacy:***

* ***Protection of data integrity and adherence to security standards.***

***2. Checklist for Digital Twin Qualification***

***General Questions:***

1. ***Physical-Digital Mapping:***
   * ***Does the system have a digital representation of all relevant physical components?***
2. ***Real-Time Data:***
   * ***Is data being synchronized between the physical and digital systems in real-time or near-real-time?***
3. ***Simulation and Prediction:***
   * ***Does the system include simulation models to predict outcomes under various scenarios?***
4. ***Decision Feedback:***
   * ***Can the system send feedback or implement decisions in the physical domain?***

***Warehouse-Specific Questions:***

1. ***Inventory Tracking:***
   * ***Does the system digitally track inventory movements in real-time?***
2. ***Resource Utilization:***
   * ***Are resources like forklifts, conveyors, and staff digitally represented and monitored?***
3. ***Environmental Factors:***
   * ***Are environmental conditions (e.g., temperature, humidity) monitored and reflected digitally?***
4. ***Process Optimization:***
   * ***Can the system simulate optimal storage and retrieval paths or warehouse layouts?***
5. ***Integration:***
   * ***Is the system integrated with external supply chain systems or IoT sensors in the warehouse?***

***3. Application to a Warehouse Management System***

***Example:***

***Imagine applying this checklist to an existing WMS. Here's how it might look:***

| ***Property*** | ***Current System Capability*** | ***Notes/Improvements*** |
| --- | --- | --- |
| ***Physical-Digital Mapping*** | ***Partial*** | ***Digital map exists, but lacks conveyor details.*** |
| ***Real-Time Data Integration*** | ***Yes*** | ***Data from inventory updated live.*** |
| ***Simulation Capability*** | ***No*** | ***Needs simulation for order-picking optimization.*** |
| ***Decision Feedback*** | ***No*** | ***Requires integration with robotic control.*** |
| ***Inventory Tracking*** | ***Yes*** | ***Efficient tracking of inventory movement.*** |
| ***Resource Utilization*** | ***Partial*** | ***Forklifts are not digitally represented.*** |
| ***Environmental Factors*** | ***No*** | ***IoT sensors for temperature not integrated.*** |
| ***Process Optimization*** | ***No*** | ***No optimization algorithms implemented.*** |
| ***Integration*** | ***Yes*** | ***Interfaces with ERP and supply chain systems.*** |

***4. Next Steps***

1. ***Develop a Template for Digital Twin Assessment:***
   * ***Use the above checklist as a baseline and customize it for your WMS.***
2. ***Gap Analysis:***
   * ***Identify missing functionalities in your WMS that prevent it from qualifying as a digital twin.***
3. ***Enhancement Roadmap:***
   * ***Prioritize enhancements based on operational impact (e.g., adding real-time environmental monitoring or simulation).***
4. ***Technology Exploration:***
   * ***Consider integrating IoT sensors, AI tools, and real-time analytics platforms.***

**References**

1. Grieves, M. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. *White Paper*. Florida Institute of Technology.
2. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186
3. Batty, M. (2018). Digital twins and smart cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820. https://doi.org/10.1177/2399808318796416
4. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges, and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358
5. Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). Digital Twins in Supply Chain Management: State-of-the-Art Review and Research Framework. *International Journal of Production Research*, 59(18), 5758–5770. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1924956