

# Jumeaux Numériques

Formation sur les Systèmes à Événements Discrets (SED)

2<sup>e</sup> édition  
Mars 2025  
Nantes



Société d'Automatique,  
de Génie Industriel & de Productique

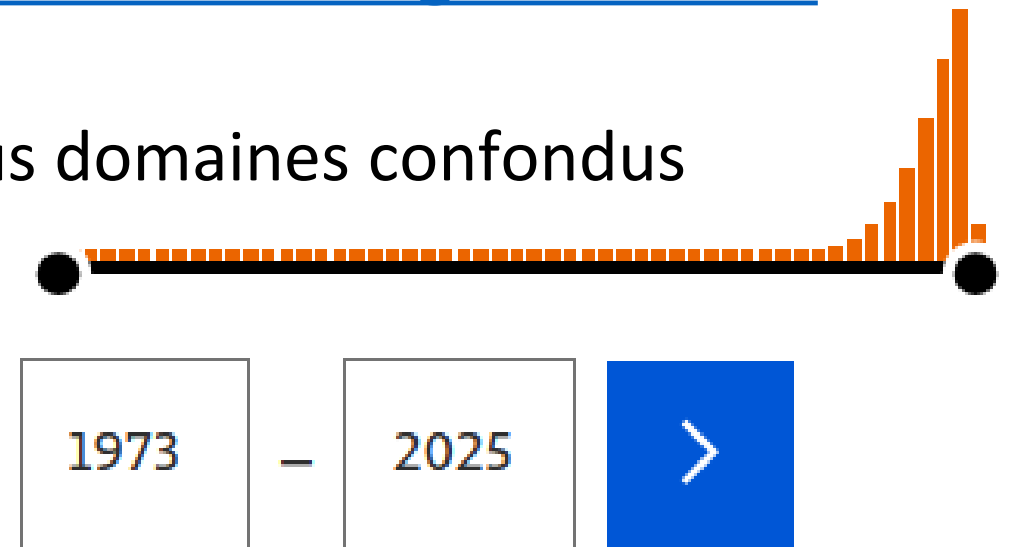
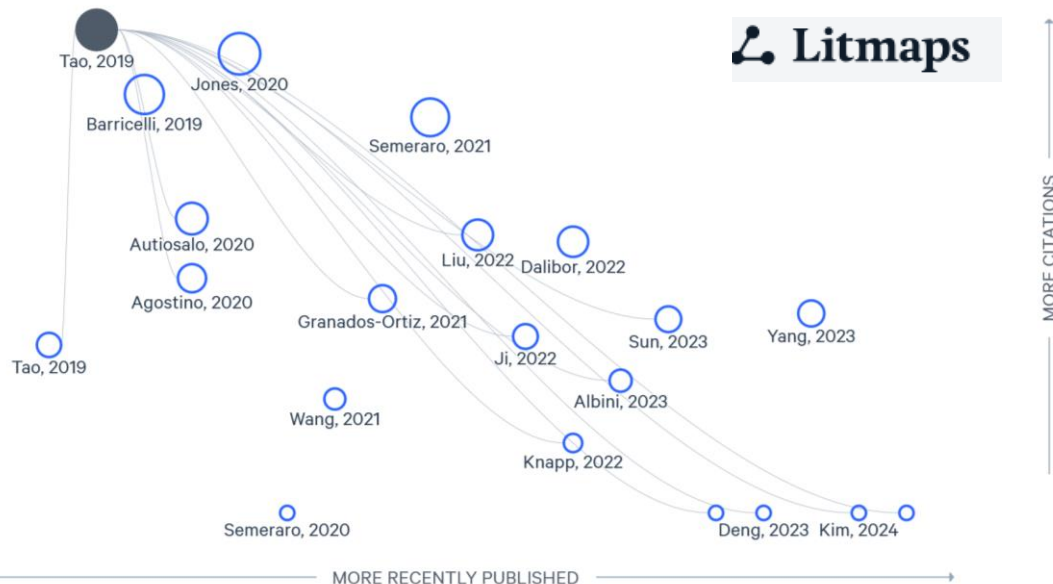


# Introduction

# 1. Un sujet d'intérêt ?

Bibliométrie Scopus : « Digital Twin »

- 1973 : [The Digital Twin-Ferrite-Toroid Circular Waveguide Phaser \(Bernues & Bolle\)](#)
- Depuis 2017 :  $\approx 23\ 000$  ref. (CI & RI) tous domaines confondus



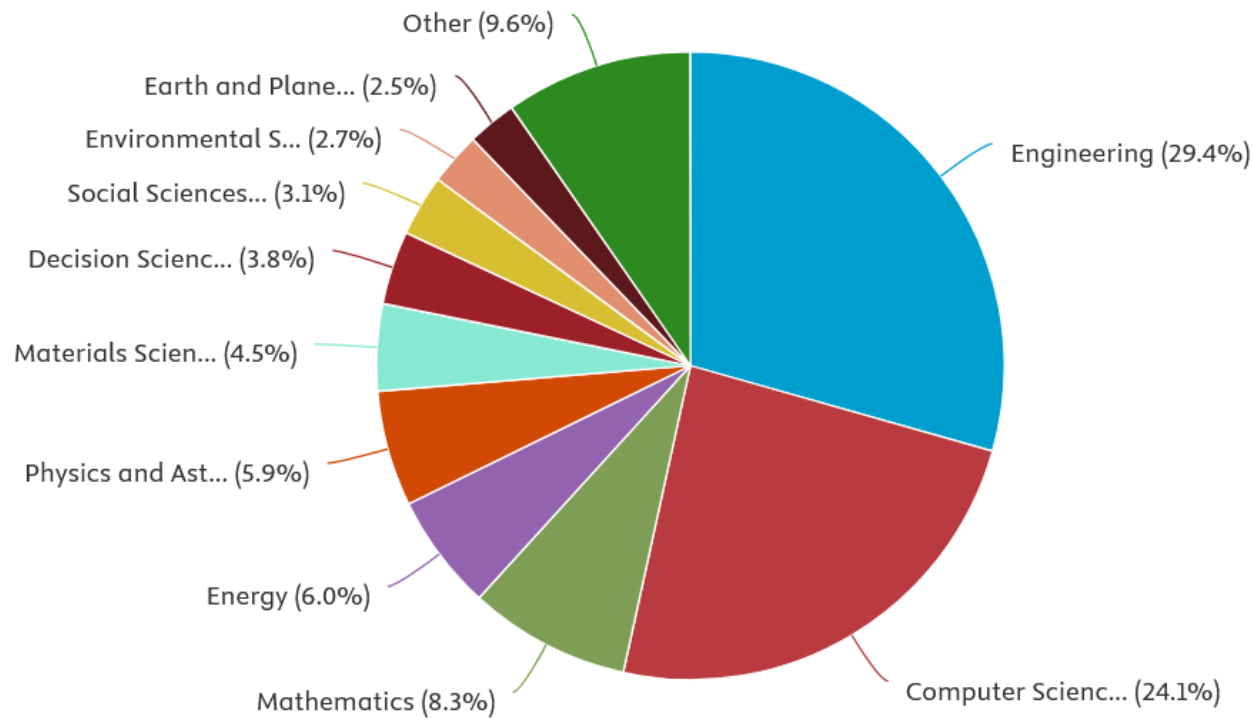
## [Digital Twin in Industry: State-of-the-Art](#)

2019, IEEE Transactions on Industrial Informatics  
F. Tao, He Zhang, Ang Liu, A. Nee  
DOI: 10.1109/tii.2018.2873186

# 1. Un sujet d'intérêt ?

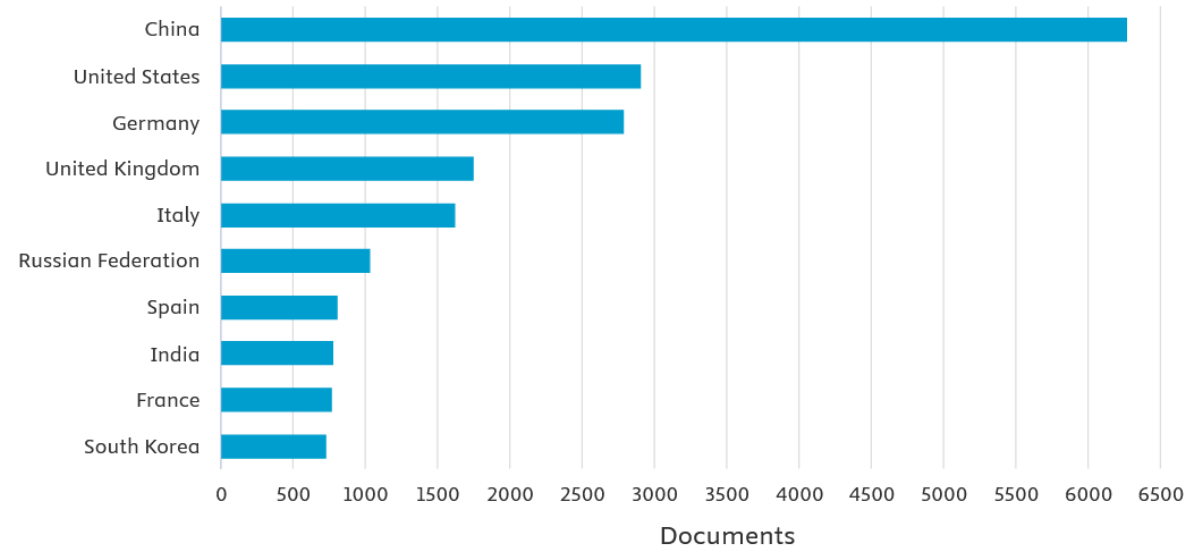
## Scopus

### Documents by subject area



### Documents by country or territory

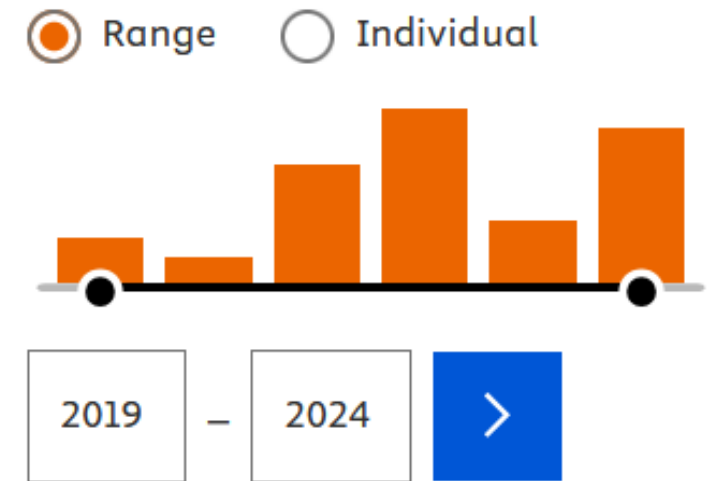
Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



# 1. Un sujet d'intérêt ?

Scopus : « Digital Twin » AND « Discrete Event Systems »

- 38 (CI & RI)



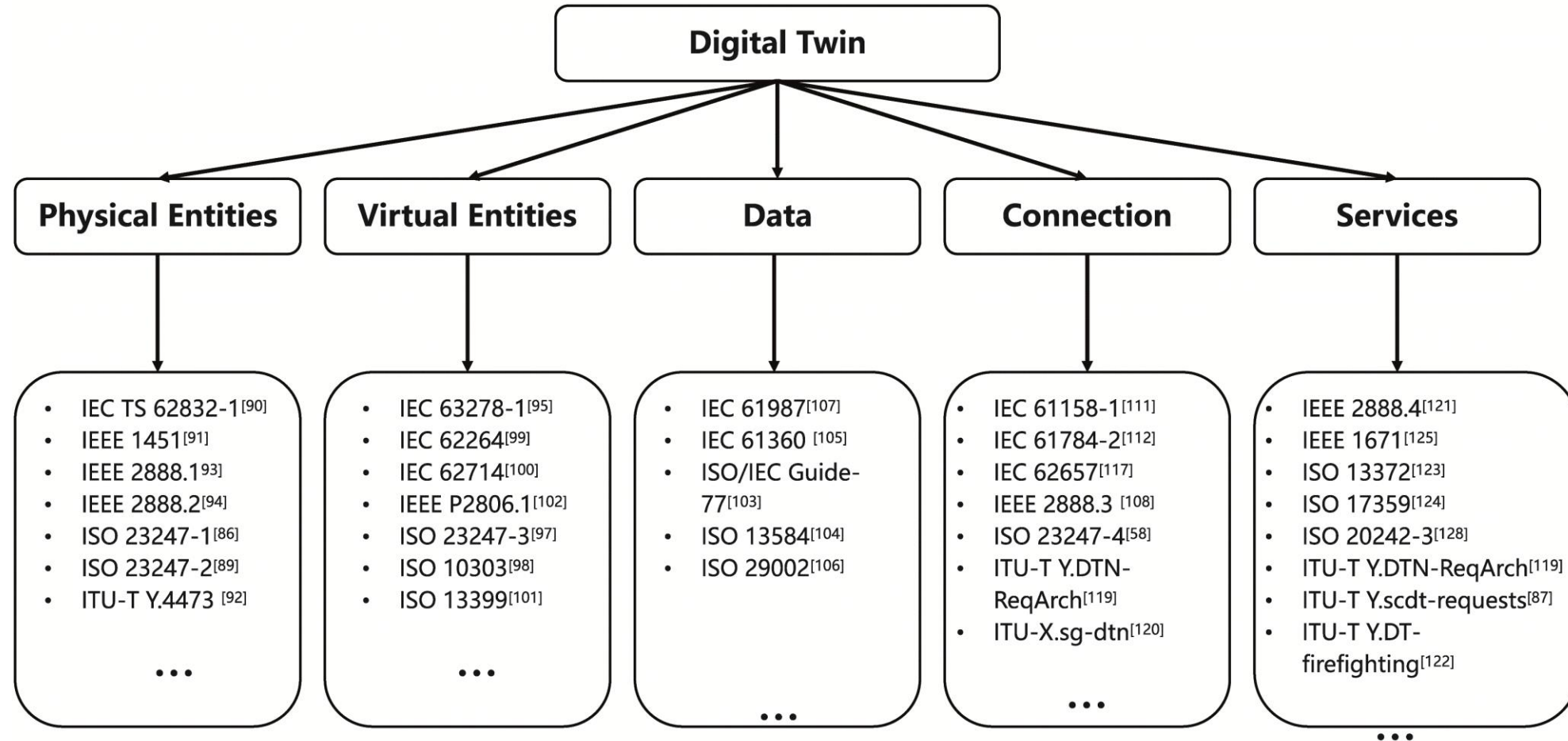
Scopus : « Digital Twin » AND « Discrete Event Systems » AND « Time »

- 11 (CI & RI) entre 2020 et 2024

- S. Hu and Z. Li. A Digital Twin Approach for Enforcing **Diagnosability** in Petri Nets. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. Volume 21, Issue 4, Pages 6068 – 6080. 2024.
- R. Saddem and D. Baptiste. Benefits of Using Digital Twin for Online Fault **Diagnosis** of a Manufacturing System. Springer Series in Reliability Engineering. Volume Part F4, Pages 255 – 269. 2023
- L. Ragazzini et. Al. **Modelling** Manufacturing Systems for Digital Twin Through Communicating Finite State Machines. SOHOMA 2022.
- I. A. Fernandez et al. Petri net **implementation** in programmable logic controllers: Methodology for development and validation. SAMI 2021
- M. U. Borges et al. Signal-Interpreted Coloured Petri Nets: A modelling tool for rapid prototyping in feedback-based **control** of discrete event systems. Control Engineering Practice. Volume 153. December 2024.
- I. Tahiri et al. Design and application of a **reconfigurable** control to a cyber-physical system. ICINCO 2020.
- E. Kucera et al. **Educational** Case Studies for Pilot Engineer 4.0 Programme: **Monitoring and Control** of Discrete-Event Systems Using OPC UA and Cloud Applications. Applied Sciences. Open Access Volume 12, Issue 17. September 2022.
- K. Abdoune. Vers un jumeau numérique soutenable pour la **surveillance et la détection** robuste d’anomalies dans les systèmes de production. PhD Thesis. Université de Nantes.
- P. Marangé et al. Diagnostiquer des **problèmes de synchronisme** dans les jumeaux numériques. MSR 2023.
- ...

# Jumeau(x) Numérique(s) : kézaco

# Que dit la norme ?



Wang K, Wang Y, Li Y *et al.* A review of the technology standards for enabling digital twin. *Digital Twin 2022*, 2:4

# Que dit la norme ?

Standard : ISO/IEC 30173 (2023) : Digital twin – Concepts and terminology

« The concept of a digital twin (DTw) is not new. The concept of twinning in aerospace has been in use for over 50 years. »

- « Digital twin has the potential to be widely used in **multiple domains** such as smart manufacturing, smart cities, smart agriculture, smart energy, smart buildings, smart health care, smart mining and many other fields. However, different fields have developed in isolation, leading to **different concepts and terminology**. The benefits that can be derived from the use of a digital twin will depend on the **use case** or cases that it has been conceived to satisfy. The degree to which the benefits are realized is dependent on the implementation of the digital twin and the **degree to which it can be trusted to represent the behaviour of the target entity** it represents »

# Que dit la norme ?

Pour : Simuler, prédire, optimiser, surveiller ...

- Définition : représentation numérique (3.1.8) d'une **entité** cible (3.1.3) avec des connexions de données qui permettent la convergence entre les états physique et numérique à un **taux de synchronisation** approprié. Il possède **certaines ou toutes** les capacités de connexion, d'intégration, d'analyse, de simulation, de visualisation, d'optimisation, de collaboration, etc.
- Entité : chose (physique ou non physique) ayant une existence distincte (personne, objet, événement, idée, process...)
- synchronisation <jumeau numérique> : action de synchroniser les états de l'entité cible et de l'entité numérique, à l'aide d'un réseau pour un système en temps réel



# 2. Un premier problème de définition

Plus d'une 20taine de définitions depuis 2010 ...

<https://www.digitaltwinconsortium.org>

A digital twin is an integrated **data-driven virtual** representation of real-world entities and processes, with synchronized interaction at a **specified frequency and fidelity**.

- Digital Twins are motivated by outcomes, **driven by use cases**, powered by integration, built on data, enhanced by physics, guided by domain knowledge, and implemented in dependable and trustworthy IT/OT/ET systems.
- Digital Twin Systems transform business by accelerating and automating holistic understanding, continuous improvement, decision-making, and interventions through effective action.
- Digital Twin Systems are built on integrated and synchronized IT/OT/ET systems, **use real-time and historical data** to represent the past and present, and simulate predicted futures.
- Digital Twin Prototypes use data to model and simulate predicted futures before being integrated into IT/OT/ET Systems and **before synchronization with the real-world** entity or process.

## 2. Un premier problème de définition

L'Alliance Industrie du Futur a publié un rapport sur le JN et le « Levier majeur de la transformation digitale de l'industrie » où il y est défini le JN comme étant :

1. un **ensemble** organisé de modèles numériques représentant une entité du monde réel pour répondre à des problématiques et des usages spécifiques,
2. **mis à jour** par rapport au réel, à une fréquence et une précision adaptée à ses problématiques et **à ses usages**,
3. doté d'outils d'exploitation avancés permettant de **comprendre, analyser, prédire et optimiser** le fonctionnement et le pilotage de l'entité réelle.

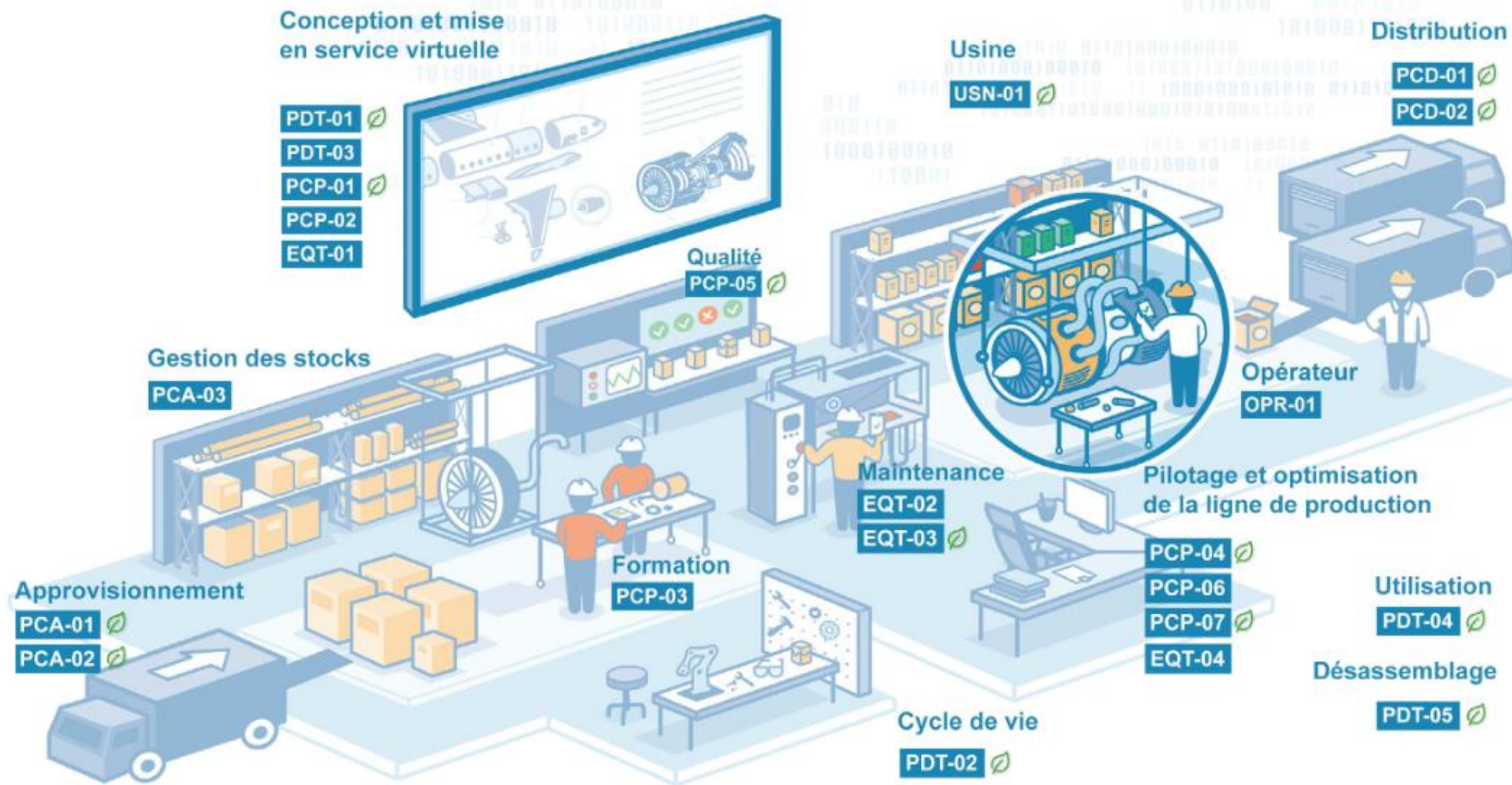
[http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2023/05/AIF\\_JumeauNumerique\\_FR-version-Web.pdf](http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2023/05/AIF_JumeauNumerique_FR-version-Web.pdf)

# CARTOGRAPHIE DES CAS D'USAGES DU JUMENTA NUMÉRIQUE

Ce chapitre présente différents cas d'usage du Jumeau Numérique dans l'industrie, afin d'en illustrer les bénéfices. Le schéma d'une production industrielle ci-dessous en donne un aperçu global.

**PDT** = cas d'usage Produit  
**PCA** = cas d'usage Process Approvisionnement  
**PCP** = cas d'usage Process Production  
**PCD** = cas d'usage Process Distribution

**EQT** = cas d'usage Équipement  
**OPR** = cas d'usage Opérateur  
**USN** = cas d'usage Usine  
 = réduction de l'impact environnemental

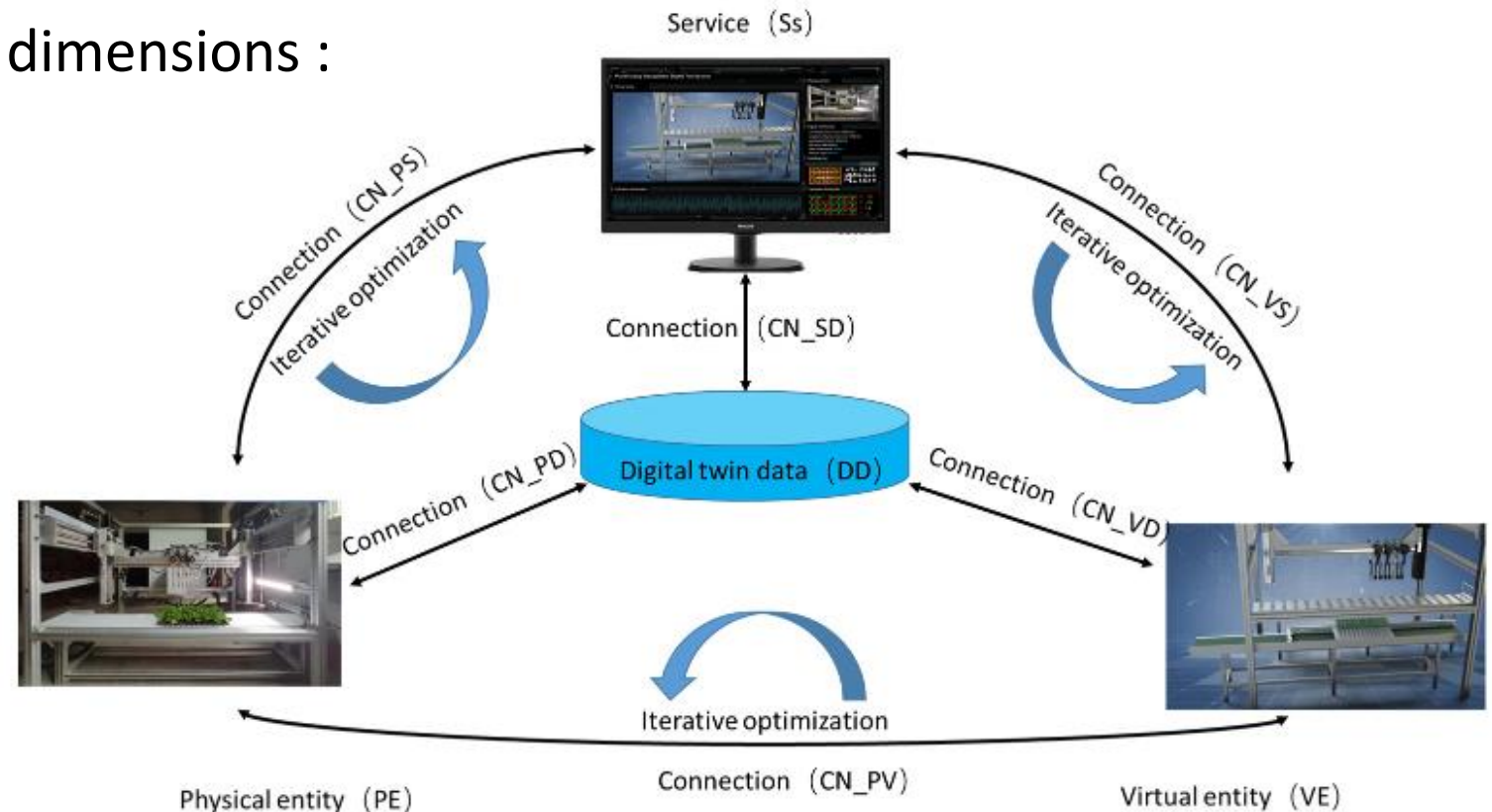


# 2. Un premier problème de définition

F. Tao, He Zhang, Ang Liu, A. Nee. [Digital Twin in Industry: State-of-the-Art](#), 2019, IEEE Transactions on Industrial Informatics. DOI: 10.1109/

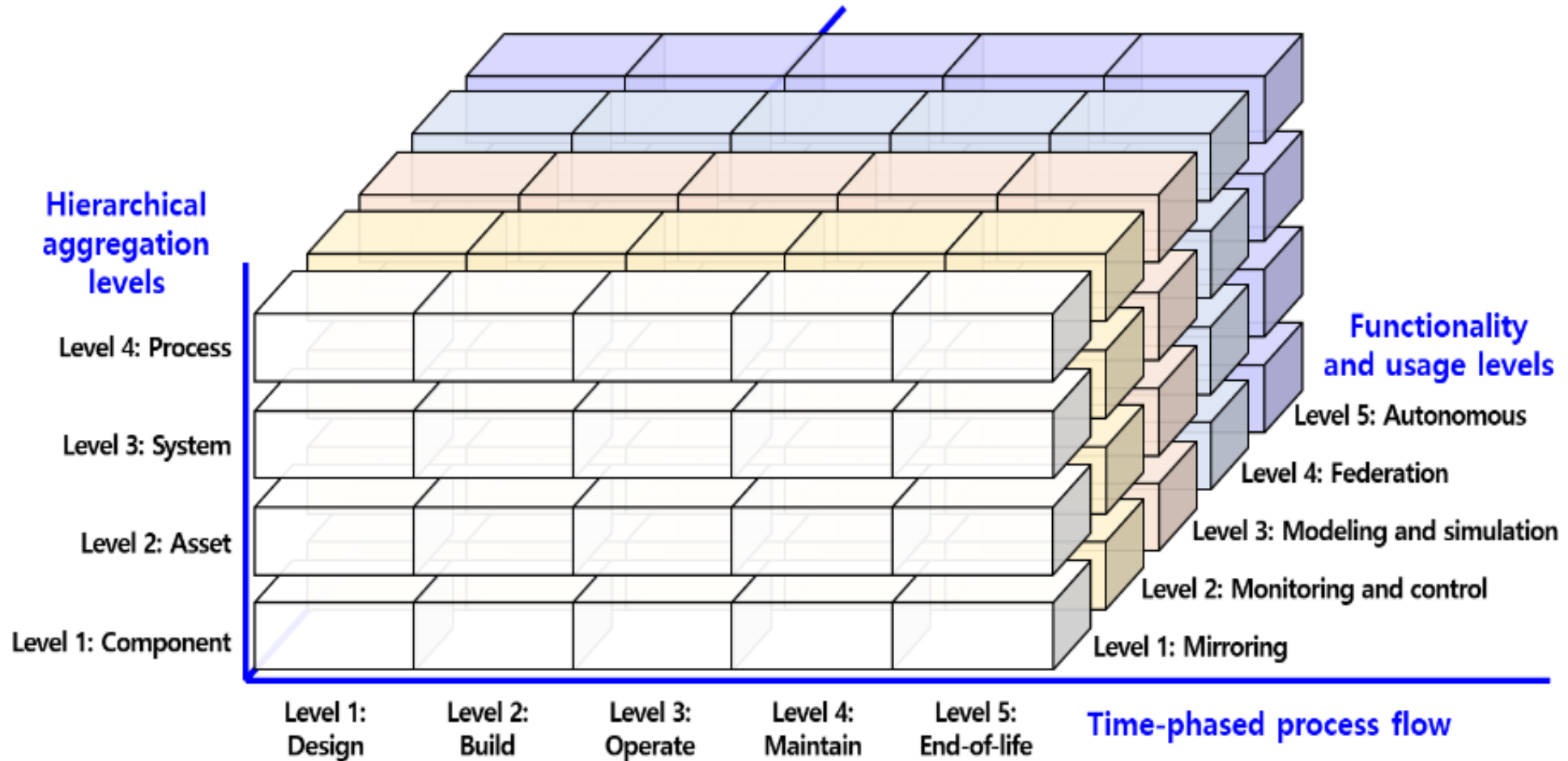
- Concept d'un modèle à 5 dimensions :

- Une entité Physique
- Une entité Virtuel
- Des Services
- Des Données
- Des Connections

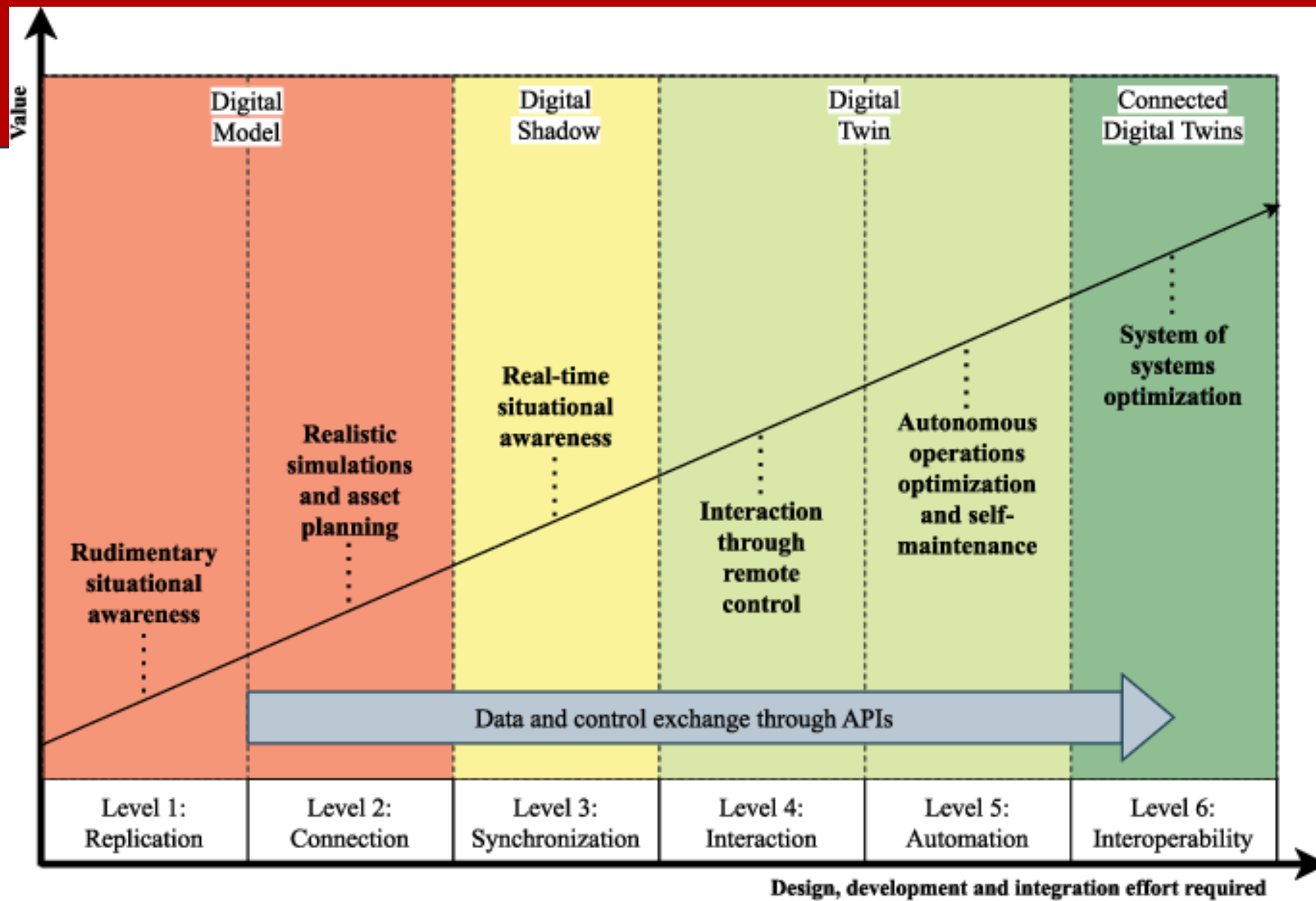


# Maturity Model

# 3. Maturity model



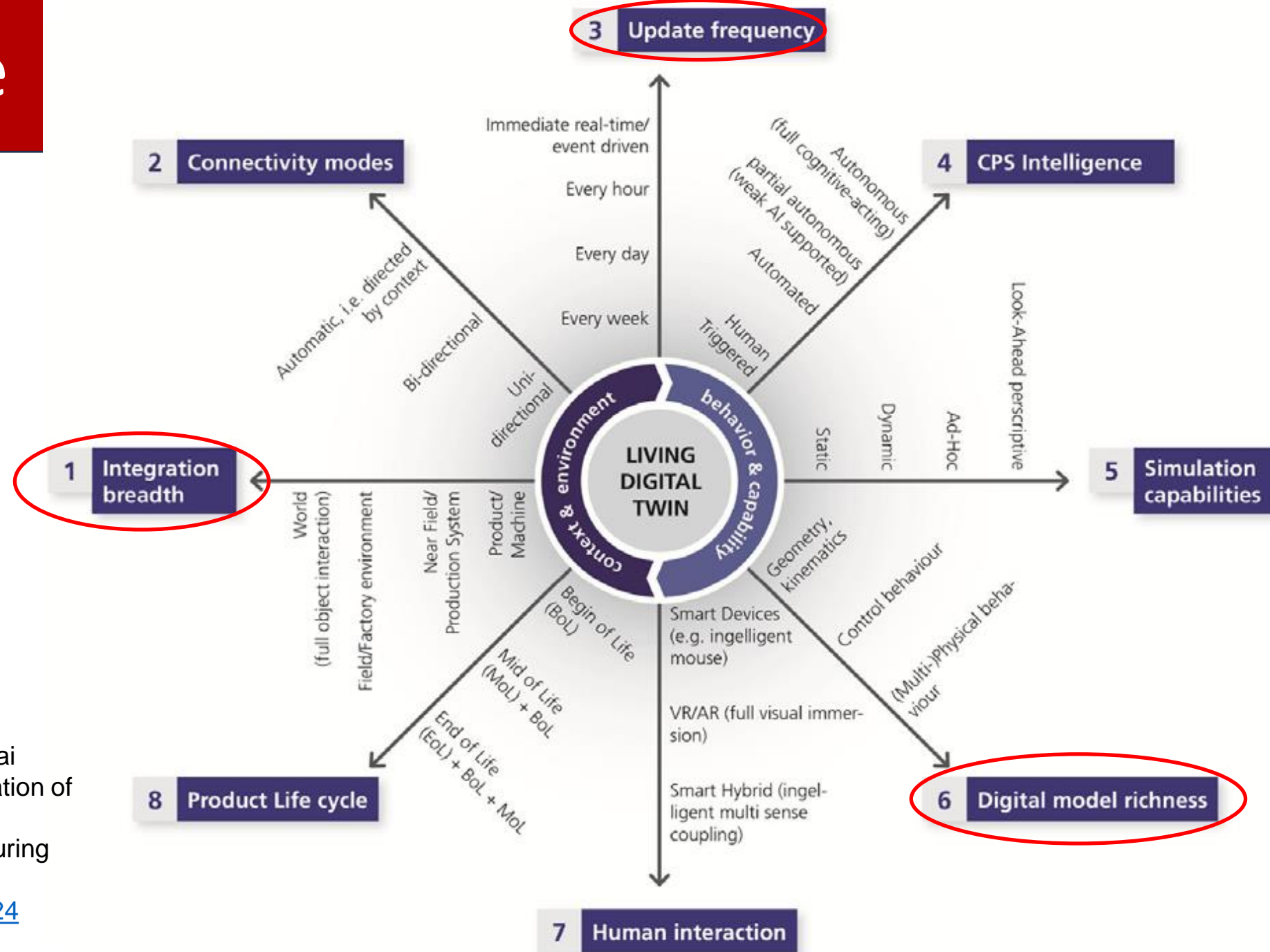
Yong-Woon Kim. A 3D-type Digital Twin maturity model. WEB 3D 2020 Industrial Use Cases Workshop on Digital Twin visualization. DOI: [10.13140/RG.2.2.28750.48967](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28750.48967)



[Robert Klar](#), [Niklas Arvidsson](#), [Vangelis Angelakis](#). **Digital Twins' Maturity: The Need for Interoperability.**

Published in [IEEE Systems Journal](#) 1 March 2024.

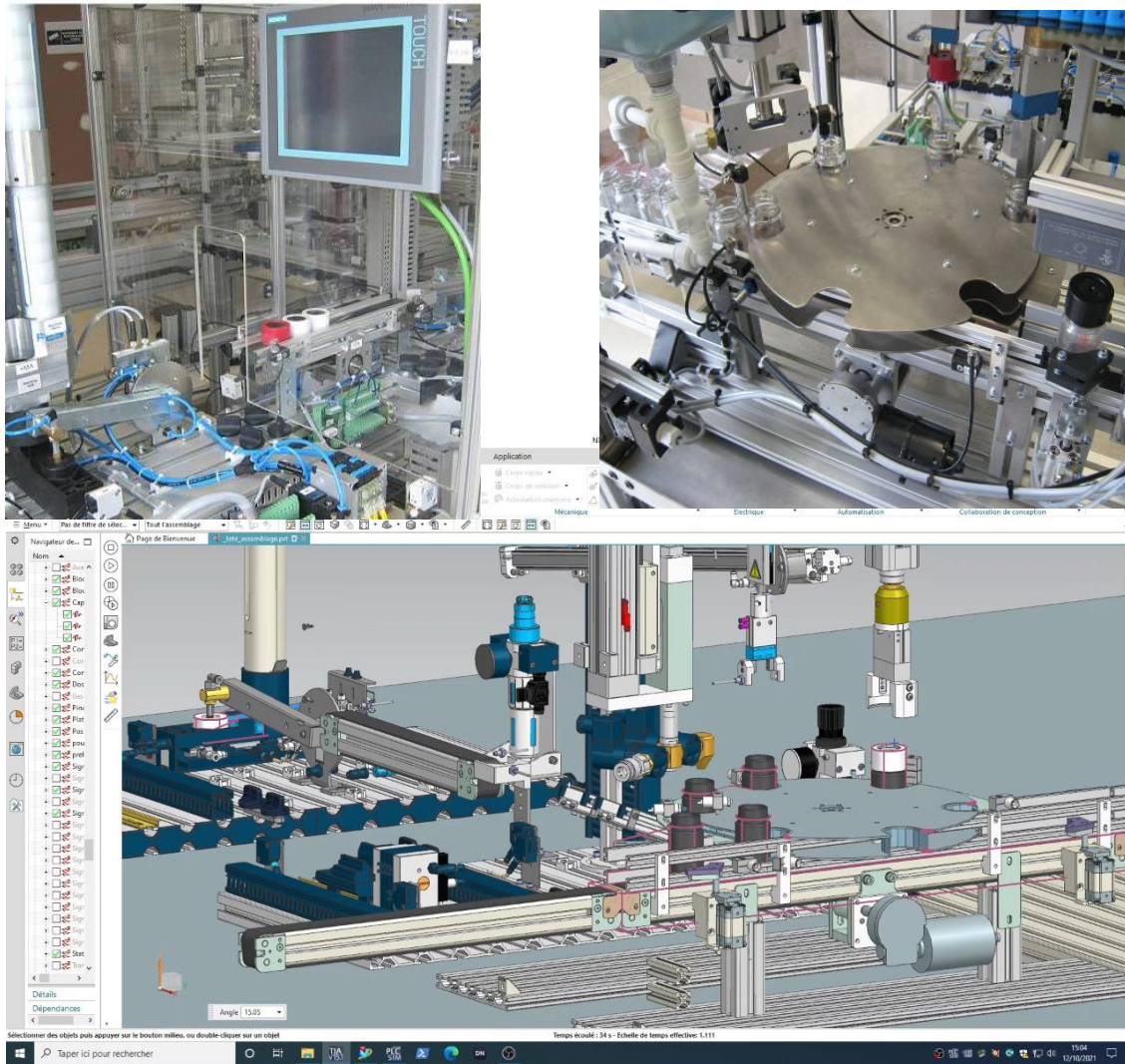
# Sa granularité



Rainer Stark, Carina Fresemann and Kai Lindow (2019). Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. CIRP Annals – Manufacturing Technology 68 (2019) 129-132.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.024>

# Use cases

# 4. Use cases



## PROCESSUS



## [PCP-02] MISE EN SERVICE VIRTUELLE D'UNE LIGNE DE PRODUCTION

Le Jumeau Numérique de la ligne de production permet de simuler sa mise en service ou son évolution afin de valider la ligne avant sa mise en place réelle (virtual commissioning).

### BÉNÉFICES

- Réduire les durées **des tests physiques** de la machine et de sa connectivité effectués par l'équipe IT après la livraison de la ligne et ainsi le temps d'arrêt de la production.
- Vérifier ou anticiper les modifications à venir de la nouvelle ligne de production, à l'occasion de l'introduction de nouveaux modèles automobiles, mais aussi tester les améliorations en virtuel sans perturber la production.

### INDUSTRIES

1. Automobile
2. Aéronautique, trains, navires
3. Construction
4. Équipements industriels
5. Hautes technologies
6. Pétrolière et chimie
7. Matériaux
8. Production d'énergie
9. Produits pharmaceutiques
10. Produits de grande consommation

### VITRINE INDUSTRIE DU FUTUR

- Alfi Technologie
- Cauquil
- Gebo Cermex
- Lisi Aérospace (Aveyron)
- Schneider Electric
- Siemens
- Sodistra



### UTILISATEURS



### JUMEAU NUMÉRIQUE

#### APPLICATIONS

Simulation processus de production

Tests virtuels d'intégration (OT/IT)

#### COUCHE DE DONNÉES

Modèles lignes et équipements

Modèles du processus de production

Modèle du produit à fabriquer

Programmes d'automatisation

Paramétrage des opérations de fabrication

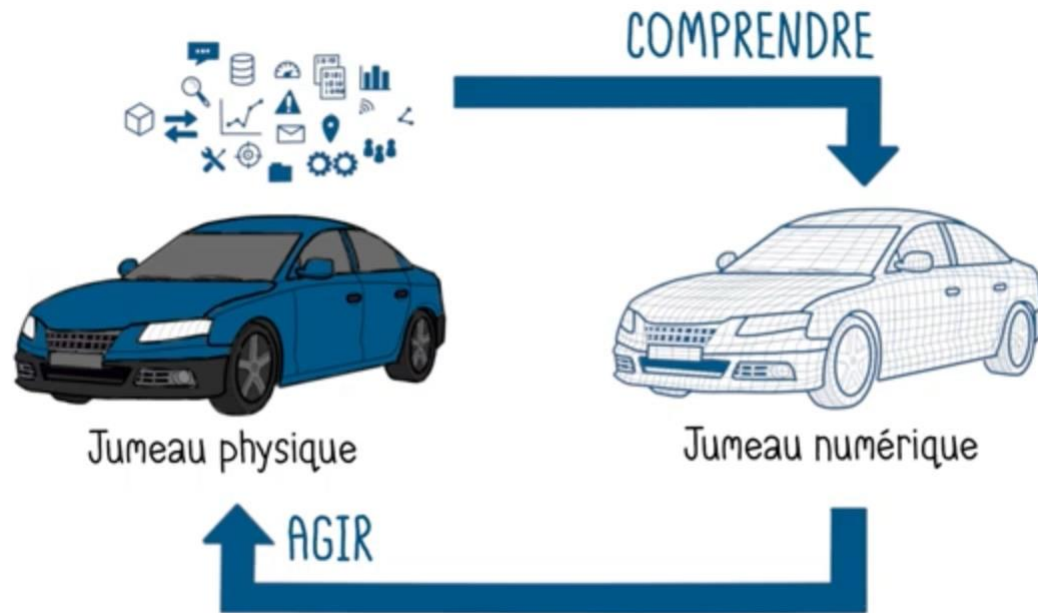
# 4. Use cases

## PRODUIT

### [PDT-01] AMÉLIORATION DE LA CONCEPTION PRODUIT



Les Jumeaux Numériques du processus de production et des produits déjà fabriqués sont utilisés pour améliorer la conception des futurs produits.



#### BÉNÉFICES

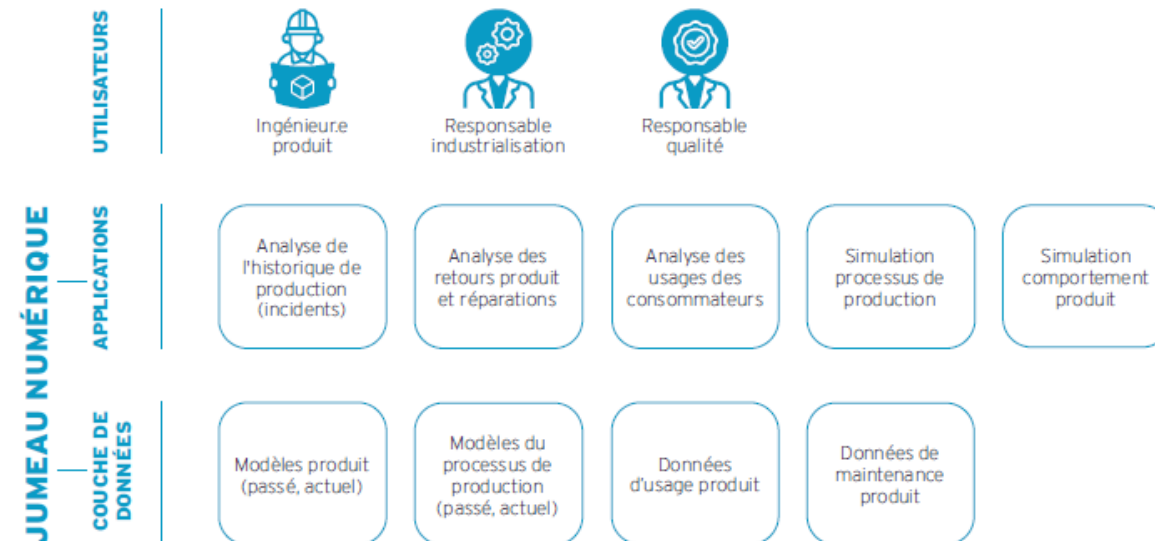
- Réduire le nombre d'incidents de production et améliorer la cadence en concevant des produits plus faciles à fabriquer ou assembler grâce aux enseignements retirés des Jumeaux Numériques des systèmes de production et des produits.
- Améliorer la fiabilité des futurs produits grâce à l'exploitation des données d'usage et de maintenance (casses constatées, types de réparations effectuées...) des Jumeaux Numériques des produits en activité.
- Améliorer l'adéquation des futurs produits aux besoins des consommateurs en analysant la manière dont les produits sont utilisés.
- Introduire ou améliorer l'écoconception des produits.

#### INDUSTRIES

1. Automobile
2. Aéronautique, trains, navires
3. Construction
4. Équipements industriels
5. Hautes technologies
6. Produits de grande consommation

#### VITRINE INDUSTRIE DU FUTUR

A2Mac1  
Aptar Pharma  
Cotral Lab  
Fonderies de Sougland  
Framatome  
Gebo Cermex  
Pellenc  
Saunier Duval



# 4. Use cases



Suite à la pandémie : Découverte des limites des feuilles de calcul en cas de perturbations.  
Nécessité de simuler la chaîne d'approvisionnement afin de garantir la résilience, mais aussi de répondre dynamiquement aux aléas.

## PROCESSUS

### [PCA-02] OPTIMISATION DYNAMIQUE DE LA LOGISTIQUE D'APPROVISIONNEMENT



Le Jumeau Numérique reflète en temps réel les parcours d'approvisionnement grâce aux informations partagées par les transporteurs et relatives à la localisation, au contenu et au planning des différentes modalités de transport.

#### BÉNÉFICES

- Améliorer le temps et le choix de parcours, la résilience aux aléas.
- Optimiser les délais de livraison et la réactivité aux commandes.
- Optimiser le remplissage des moyens de transport.
- Améliorer l'efficacité énergétique.

#### INDUSTRIES

- |                                     |                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Automobile                       | 8. Matériaux                        |
| 2. Aéronautique, trains, navires    | 9. Production d'énergie             |
| 3. Construction                     | 10. Produits pharmaceutiques        |
| 4. Équipements industriels          | 11. Produits de grande consommation |
| 5. Hautes technologies              | 12. Transport et logistique         |
| 6. Pétrolière et chimie             |                                     |
| 7. Infrastructures de communication |                                     |

#### VITRINE INDUSTRIE DU FUTUR

OCP  
SEW Usocome  
Siemens



# 4. Use cases

RESSOURCE

## [EQT-03] MAINTENANCE PRÉDICTIVE D'UN ÉQUIPEMENT



Le Jumeau Numérique d'un équipement permet de prédire la survenue de pannes, de fournir des recommandations de maintenance et, si le modèle prédictif le permet, d'aider à la recherche de pannes. Un modèle prédictif est construit au préalable à partir des pannes constatées et des données historiques d'utilisation de l'équipement.

Exemples de données : vibrations, signaux acoustiques, images infrarouges, paramètres machine.

### BÉNÉFICES

- Réduire le nombre de pannes imprévues pouvant potentiellement désorganiser la production.
- Réduire la durée de non-disponibilité de l'équipement puisque la maintenance n'est effectuée que lorsque cela est nécessaire et non selon un calendrier préétabli.
- Améliorer la compréhension des causes de pannes si le modèle le permet (modèle explicatif, par opposition à un modèle boîte noire).

### INDUSTRIES

- |                                     |                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Automobile                       | 8. Matériaux                        |
| 2. Aéronautique, trains, navires    | 9. Production d'énergie             |
| 3. Construction                     | 10. Produits pharmaceutiques        |
| 4. Équipements industriels          | 11. Produits de grande consommation |
| 5. Hautes technologies              | 12. Transport et logistique         |
| 6. Pétrolière et chimie             |                                     |
| 7. Infrastructures de communication |                                     |

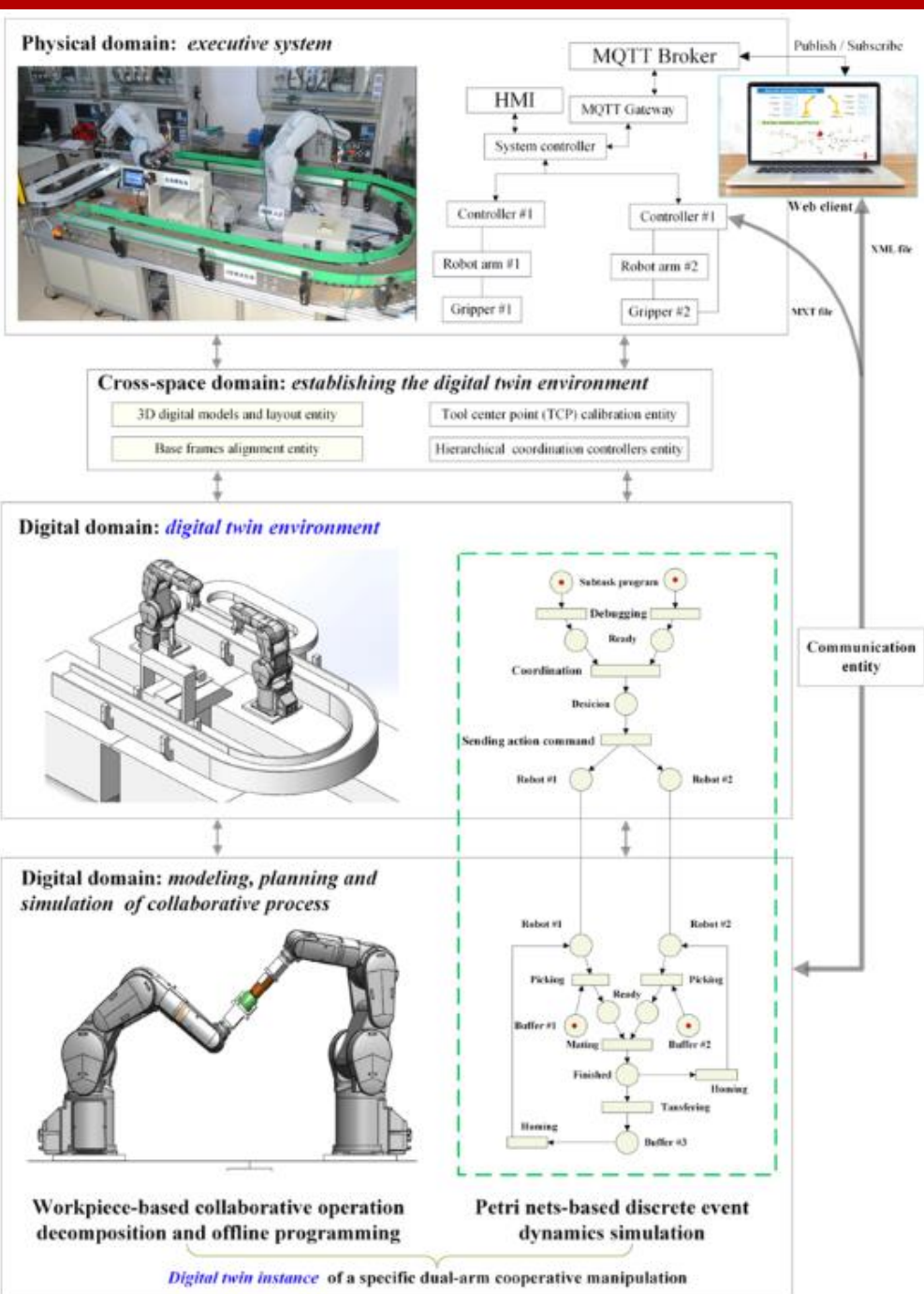
### VITRINE INDUSTRIE DU FUTUR

- Air Liquide
- Elm.Leblanc
- Engie
- FPT Industrial
- Gebo Cermex
- L'Oreal (Aisne)
- Schneider Electric
- Siemens
- SNCF



# 4. Use

Fuwen Hu, Wei Wang, Jinghua Zhou, Petri nets-based digital twin drives dual-arm cooperative manipulation, Computers in Industry, Volume 147, 2023



## PROCESSUS

## [PCP-06] PILOTAGE TEMPS REEL DE LA LIGNE DE PRODUCTION



Le Jumeau Numérique reflète l'état actuel de la production (lignes de production, postes de travail, équipements utilisés, état d'avancement des produits en cours de fabrication) et le met en regard du planning de production. Des données de capteurs permettent de déclencher des alertes.

### BÉNÉFICES

- Disposer d'une vue globale en temps réel de l'avancement des ordres de fabrication, pour une chaîne d'assemblage ou de fabrication. Réagir immédiatement aux alertes émises en cas d'incident sur un poste de travail afin de diminuer les perturbations. Réordonner automatiquement ou manuellement la production suite aux incidents et retards identifiés.
- Réagir aux incidents d'exploitation sur les équipements de production d'énergie, afin d'assurer la sécurité des personnes et le maintien de la production. Être informé de déviations à long terme afin de maintenir une exploitation optimale.

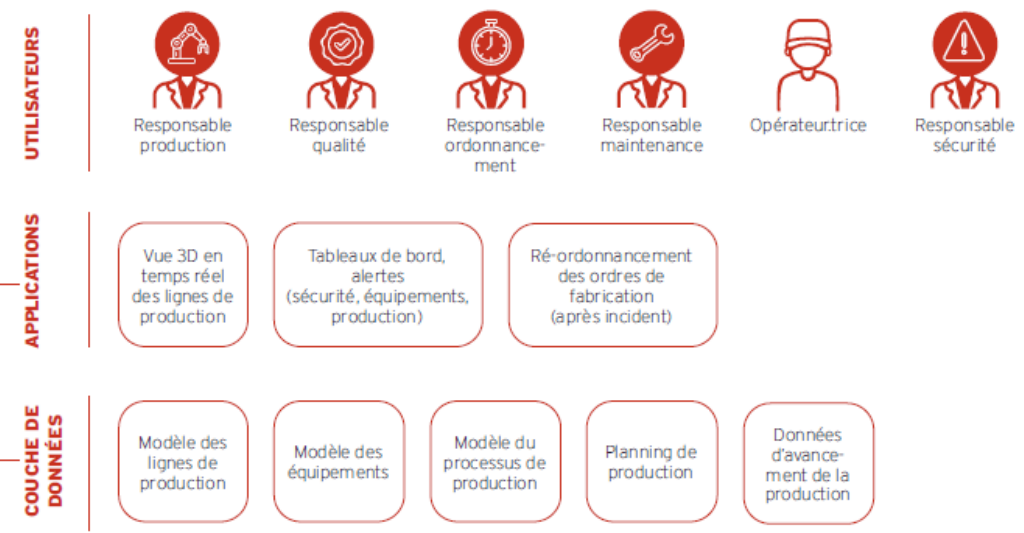
### INDUSTRIES

- Automobile
- Aéronautique, trains, navires
- Construction
- Équipements industriels
- Hautes technologies
- Pétrolière et chimie
- Matériaux
- Production d'énergie
- Produits pharmaceutiques
- Produits de grande consommation

### VITRINE INDUSTRIE DU FUTUR

Air Liquide	Magafor
Airbus	Matra
Helicopters	Électronique
Bosch	Michelin
Cauquil	Pellenc
Cotral Lab	Safran
Engie	Schaeffler
JPB Système	Schneider Electric
Lisi Aérospace (Val-d'Oise)	Soitec
Lisi Automotive	Sunna Design

## JUMEAU NUMÉRIQUE

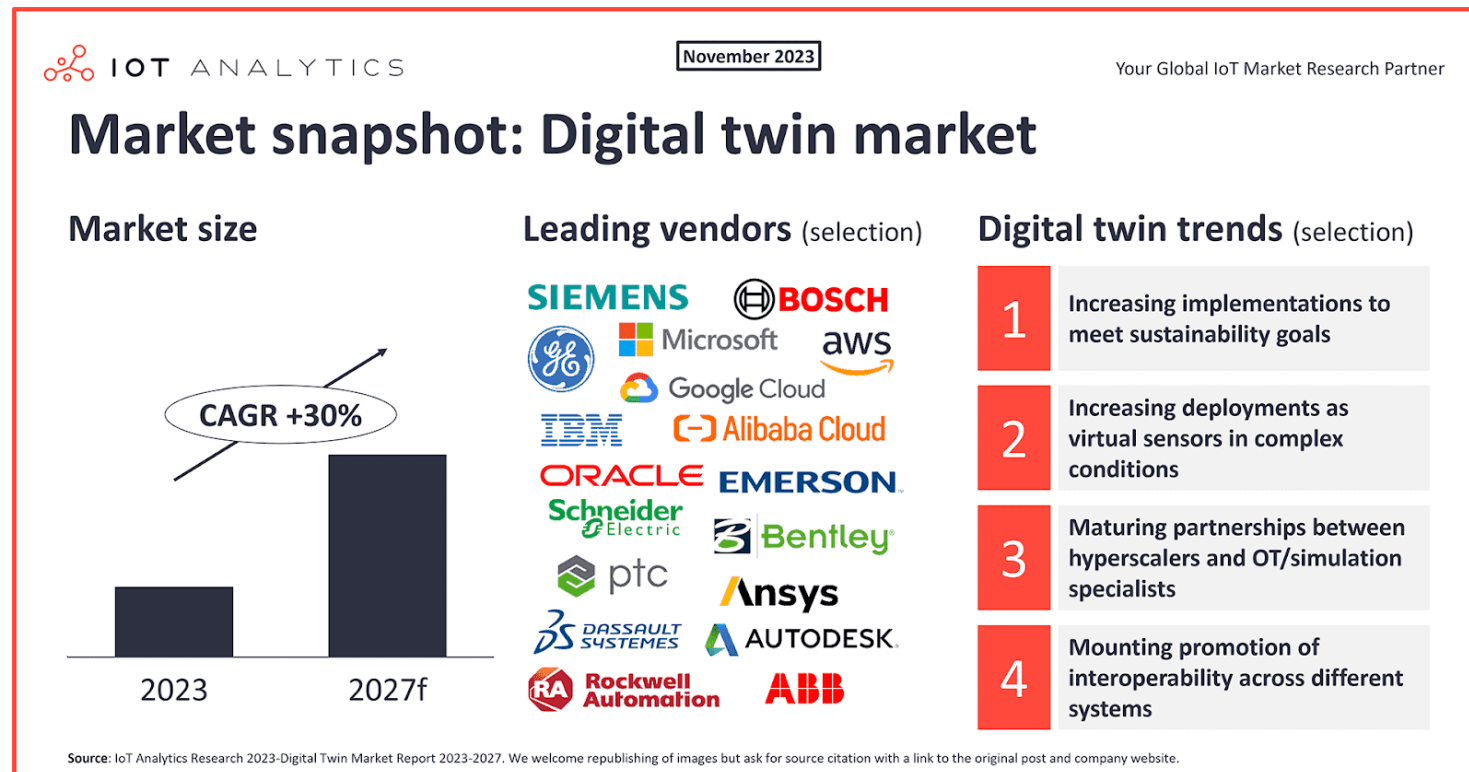


# Conclusion

# Quel avenir ?

Gartner estime que d'ici 2027, plus de 40 % des grandes entreprises mondiales du secteur industriel utiliseront des jumeaux numériques dans le cadre de leurs projets.

Selon le rapport IoT Analytics Digital Twin Market Report, le marché des jumeaux numériques est en expansion, avec un Taux de Croissance annuel composé prévu de 30 % entre 2023 et 2027.



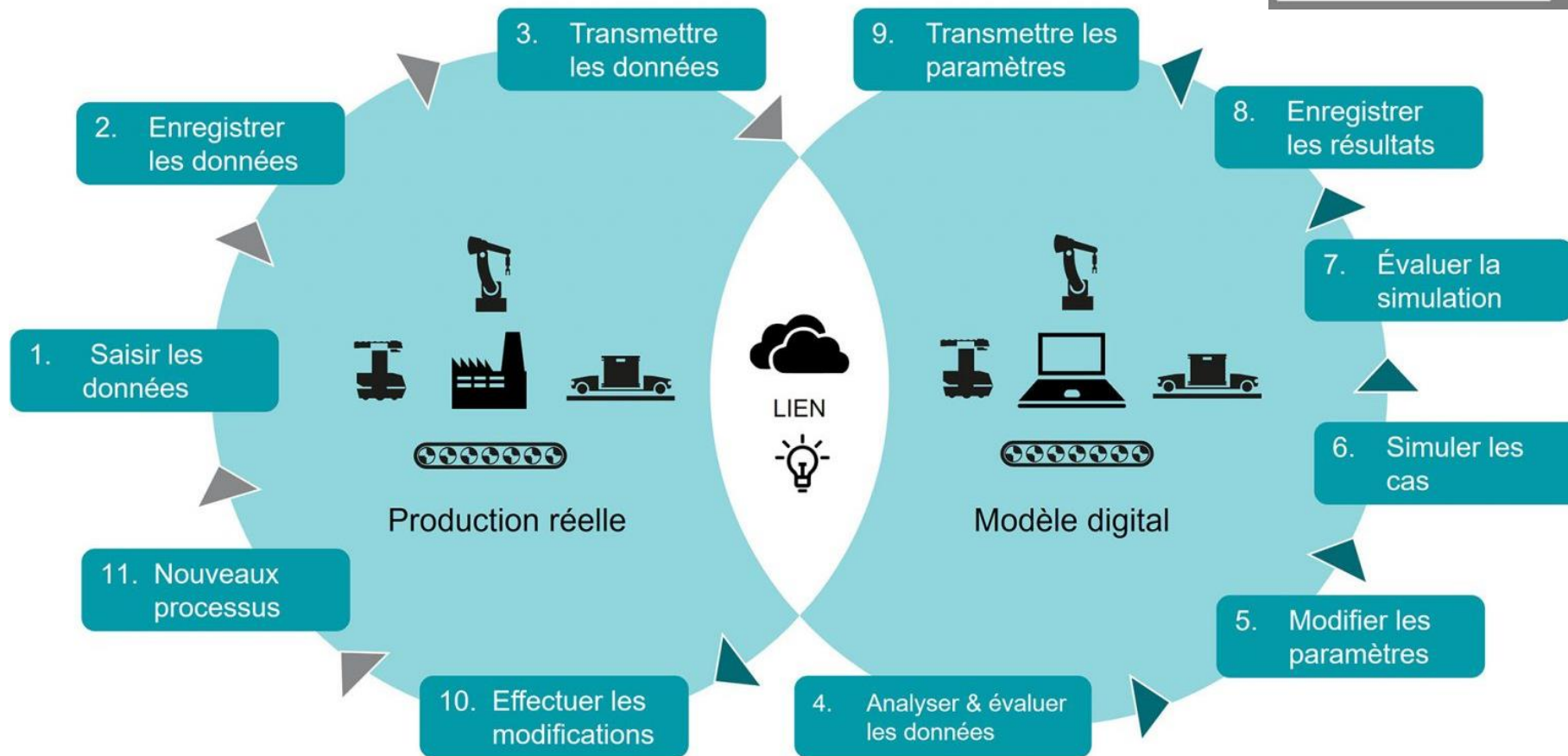
# Conclusion



“Essentially, all models are wrong,  
but some are useful”

George E.P. Box

CT Jnum : en pleine réflexion sur le sujet



# Références bibliographiques

# Références bibliographiques

- F.J. Bernues & D.M. Bolle. The Digital Twin-Ferrite-Toroid Circular Waveguide Phaser. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. Volume: 21 Issue: 12. 1973.
- F. Tao, He Zhang, Ang Liu, A. Nee. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. 2019, IEEE Trans. on Industrial Informatics. <https://doi:10.1109/tii.2018.2873186>
- Wang K, Wang Y, Li Y et al. A review of the technology standards for enabling digital twin. Digital Twin 2022, 2:4
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. & Sui, F. (2018) Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer London, 94(9–12), pp. 3563–3576. <https://doi:10.1007/s00170-017-0233-1>
- Yong-Woon Kim. A 3D-type Digital Twin maturity model. WEB 3D 2020 Industrial Use Cases Workshop on Digital Twin visualization. <https://doi:10.13140/RG.2.2.28750.48967>
- Tekinerdogan, B., & Verdouw, C. (2020). Systems Architecture Design Pattern Catalog for Developing Digital Twins. Sensors, 20(18), 5103. <https://doi.org/10.3390/s20185103>
- Robert Klar, Niklas Arvidsson, Vangelis Angelakis. Digital Twins' Maturity: The Need for Interoperability. Published in IEEE Systems Journal 1 March 2024.
- Rainer Stark, Carina Fresemann and Kai Lindow (2019). Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. CIRP Annals – Manufacturing Technology 68 (2019) 129-132. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.024>
- Fuwen Hu, Wei Wang, Jinghua Zhou, Petri nets-based digital twin drives dual-arm cooperative manipulation, Computers in Industry, Volume 147, 2023
- <https://www.knapp.com/fr/>
- <https://www.digitaltwinconsortium.org>
- <https://www.akila3d.com/blog/insights/five-dimensions-digital-twins/>
- ISO/IEC 30173 (2023) : Digital twin – Concepts and terminology
- [http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2023/05/AIF\\_JumeauNumerique\\_FR-version-Web.pdf](http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2023/05/AIF_JumeauNumerique_FR-version-Web.pdf)

# Remerciements et crédits

# Équipe pédagogique

**Auteur.rice.s** : Alexandre PHILIPPOT

**Intervenant.e.s** : Alexandre PHILIPPOT

# Crédits

- Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la **Licence Creative Commons Attribution 4.0 International**.
- Pour voir une copie de cette licence, visitez <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>.