



**IMT Atlantique**  
Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom

# Jumeau numérique Quelques réflexions

**Antoine Beugnard**

IMT Atlantique, Lab-STICC, P4S  
22 mai 2024

# Qui suis-je ?

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

## Professeur IMT Atlantique

- ▶ Génie logiciel
- ▶ 4 niveaux de contrat
- ▶ Signature de langage - liaison dynamique
- ▶ Architecture logicielle (spec - adaptation)
- ▶ Modélisation - IDM - fédération de modèles
- ▶ Expliciter : spécifier le produit et les processus

Les jumeaux numériques . . . un superbe terrain de recherche

# Jumeau numérique (JN)

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

## Définition de l'Alliance Industrie du Futur

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

## Plaquette AIF

## Frontière [1]

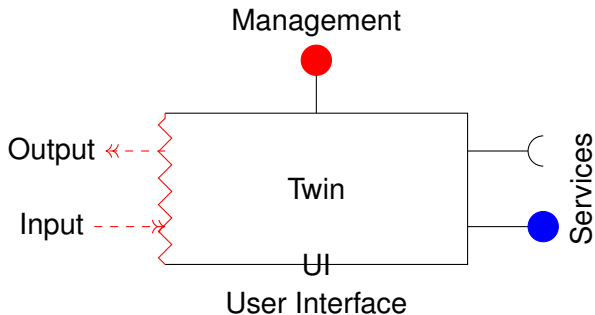
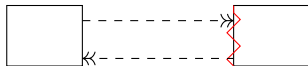
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



## Jumeau numérique : un objet

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

Pour en faire un objet (avec une frontière, des services, un contenu), il faudrait :

- ▶ Trouver un JN sur étagère
- ▶ Agir sur un JN : déployer, configurer, exécuter, cloner ?

# SOMMAIRE

1. Généralité
2. Contenu
3. Description
4. Propositions



**IMT Atlantique**  
Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom

## Quelques remarques

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

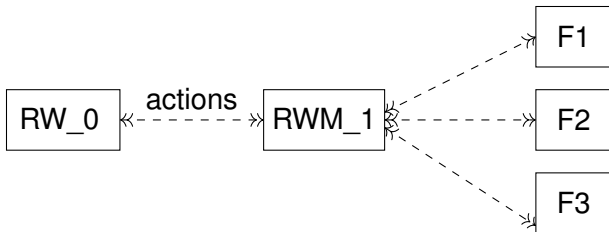
- ▶ Faire de l'informatique ; c'est souvent faire des jumeaux numériques
- ▶ Il a des dizaines de formes de jumeaux numériques (prototype, shadow, mirror, archive, ...)
- ▶ Un jumeau numérique (DT/JN) forme un couple avec son Système de Référence <sup>1</sup> (SR/RS)
  - DT, en tant que modèle, est **moins** que son système de référence
  - DT, avec ses outils, est **plus** que son système de référence
  - DT/RS forment un couple qui enclenche une spirale d'**amélioration continue** (des 2 participants)

---

1. *entité du monde réel.*

En 1983, il proposait de construire un système (avec une intention  $I$ )

- ▶ En commençant par un **modèle du monde réel** ... un jumeau numérique ?
- ▶ En complétant par un **réseau de fonctions** ... les outils d'exploitation ?



$$RWM_1 = de_{pour(I)}(RW_0)$$



## Question 1

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

Jumeau numérique **de** quelque chose ou **pour** quelque chose ?

- ▶ les deux !
- ▶ Un unique "de" ? *quid* des agrégats ?
- ▶ Un seul "pour" ?

Lieu d'accumulation d'information (données/modèles).

$$de(X) = \bigcup_I de_{pour(I)}(X)$$

On accumule toutes les intentions *I* ! donc tous les modèles, tous les calculs concernant *X*. Vers du *Knowledge Management*? ex. [2].

## Quels usages ?

Généralité

Contenu

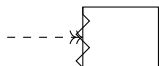
Description

Propositions

Extras

*Usage**RS**JN**Outils/Services*

Build/Install



Monitor/Collect



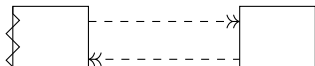
Display/Alarm



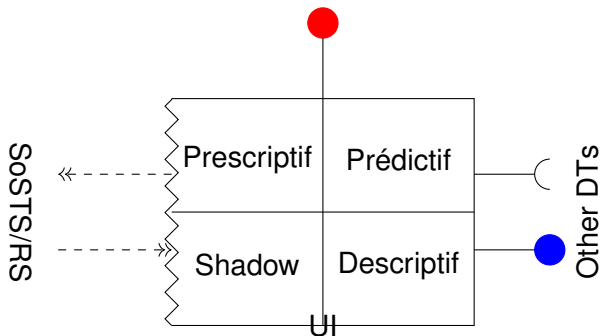
Control/Reconf.



Analysis, replay, simulate,  
optimize, learn, *replace*, ...



Un ensemble organisé de modèles numériques.



Et les modèles de l'organisation du JN ? Modèles **Introspectifs** (d'organisation).

## Rôles/responsabilité des modèles

Généralité	Contenu	Description	Propositions	Extras
------------	---------	-------------	--------------	--------

**Shadow** les données miroir

- ▶ la data brute et son méta-modèle (structure)

**Descriptif** les informations, des connaissances

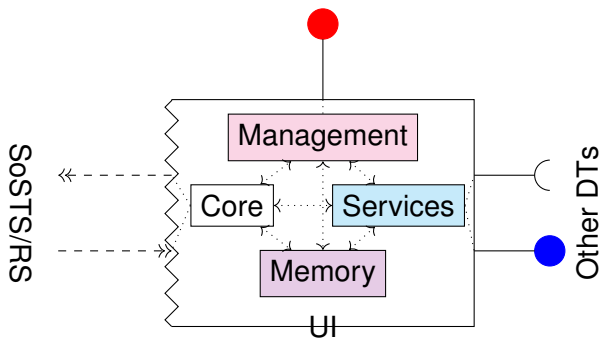
- ▶ données de synthèse, abstraction, construction interprétable pour l'humain et leur méta-modèle

**Prescriptif** les données de commande (connaissance du contrôle)

- ▶ les algorithmes de contrôle (hors RS)

**Prédictif** les modèles de simulation (connaissance de l'évolution)

- ▶ les modèles de simulation et leurs résultats. . .



La *gestion* est dans **Management**, et les *outils* dans **Services** ?

## Question 2

Généralité

Contenu


Description

Propositions

Extras

Les outils d'analyse, d'exploitation, sont-ils dans le JN ?

- ▶ Non ; ils sont clairement un plus. . . (n'existent pas dans le SR)
- ▶ Oui ; ils participent à la production de données - et de connaissances - sur les modèles du JN
- ▶ Oui ? alors ils sont gérés avec le JN, ils offrent des services. . .

 Je penche pour les exclure du cœur.

Le JN est **responsable** de ses données. Les outils externes qui en produisent doivent passer par un service qui garantit que les données seront bien intégrées.

## Rôles/responsabilité des fonctions

Généralité	Contenu	Description	Propositions	Extras
	<b>Core</b>	les mécanismes de connexion au SR <ul style="list-style-type: none"><li>▶ hétérogène (copie, délégation, etc)</li><li>▶ peuvent avoir leur propre UI</li></ul>		
	<b>Memory</b>	le stockage des données, informations, connaissances, logs, métadonnées, etc. <ul style="list-style-type: none"><li>▶ Avec des BD R, des fichiers, des BD temporelles, etc.</li><li>▶ peuvent avoir leur propre UI</li></ul>		
	<b>Services</b>	les accès aux données (et <b>méta-données</b> ) <ul style="list-style-type: none"><li>▶ peuvent avoir leur propre UI</li></ul>		
	<b>Management</b>	les outils de <i>gestion</i> du JN en tant qu' <b>unité</b> <ul style="list-style-type: none"><li>▶ les recettes de déploiement, de configuration, de copie, etc.</li><li>▶ les services de contrôle d'accès. . .</li><li>▶ peuvent avoir leur propre UI</li></ul>		

## Couches

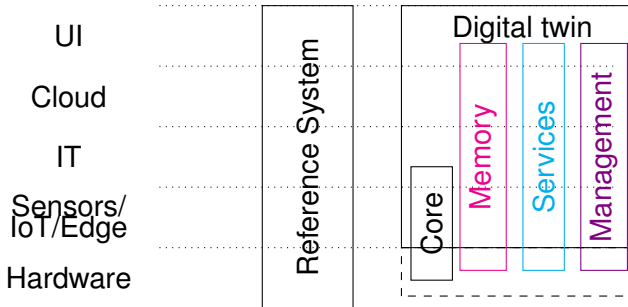
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



⚠ Les JN peuvent avoir leurs propres capteurs et sont donc eux-mêmes des systèmes cyber-physiques...



## Discussion

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

Il y a des données dans toutes les couches ; des services, de l'IA aussi potentiellement.

- ▶ Il faut des moyens de faire circuler les données
- ▶ Il faut des moyens de stocker, gérer, rechercher les données et leurs méta-données
  
- ▶ Il faut proposer des outils de *gestion* de l'**unité** (JN)
- ▶ instances**s**, ensembles**s** d'instances (agrégat), variantes

Il faut des moyens de distinguer les instances, les variantes. . . et donc organiser les données (et les méta-données).

## Classification

Généralité                      Contenu                      Description                      Propositions                      Extras

**Type** prototype/instance/agrégat

**Niveau** composant/équipement/système/SoS

**Maturité** non-connecté / ombre / contrôle / cognitif / collaboratif  
/ composable

**Topologie** non-connecté/connecté (séparé, partagé, embarqué)

**Synchronisation** fréquence de mise à jour

**Décision** ouverte, fermée, mixte

## Cycle de vie

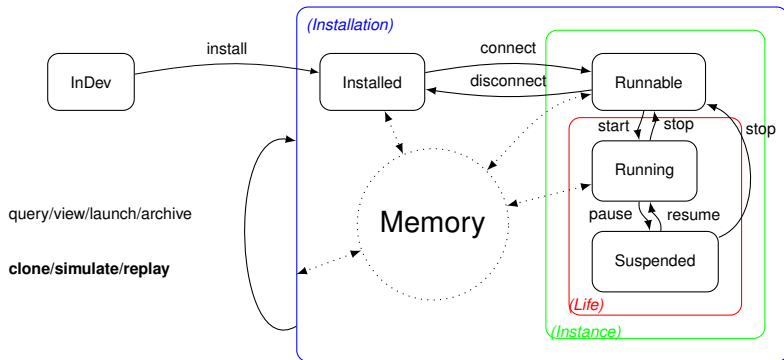
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



## Question 3

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

Quel cycle de vie de développement ?

- ▶ processus de développement
- ▶ réutilisation
- ▶ maintenance
- ▶ évolution

Questionnaire en préparation. . .

Voir aussi "Current trends in digital twin development, maintenance, and operation : an interview study" [3]

## Type and instances

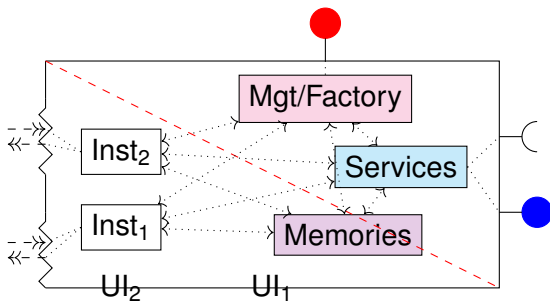
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



- Example (agrégat) :  $Inst_1 \leftrightarrow RS$  et  $Inst_2 \leftrightarrow RS'$

## Vision temporelle

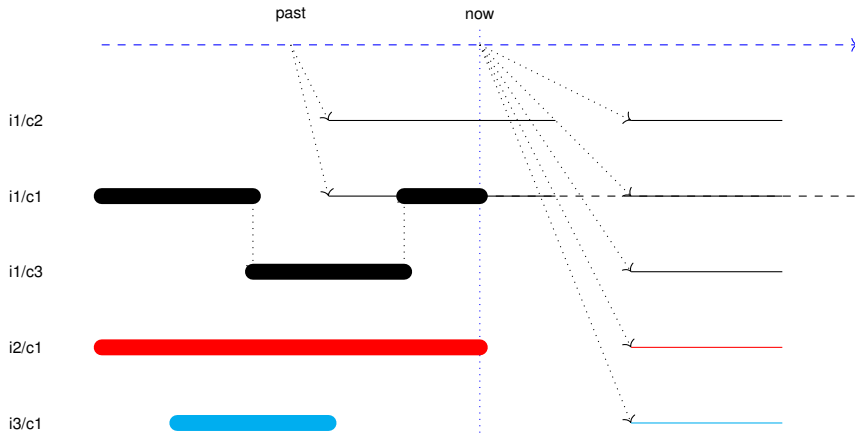
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



## Question 4

Généralité                      Contenu                      Description                      Propositions                      Extras

Peut-on avoir plusieurs JN pour un même système de référence ?

- ▶ Dans la pratique, ce sera difficile à éviter
- ▶ En principe, un seul serait idéal...

On peut imaginer un JN unique... mais dispersé...

## Question 5 et 5 bis

Généralité                      Contenu                      Description                      Propositions                      Extras

Le système de référence est-il nécessairement physique/concret ?

- ▶ On peut imaginer un JN de réunion, de cours, etc.

Le jumeau numérique est-il uniquement numérique ?

- ▶ On peut imaginer un JN avec ses propres capteurs.
- ▶ Quelle différence entre une source de données externes (ex : simulation) et une source directe de données du SR ? La source. Une méta-donnée.



## Jumeau numérique et simulation

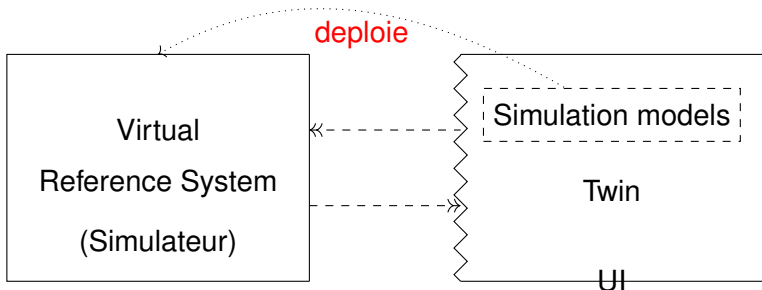
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



! Les outils de simulation regroupent un modèle du SR, un modèle de l'environnement, en plus du moteur (simulateur) ; les données produites sont **taguées/sourcées** "simulation"...

## Propositions

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

- ▶ Interface ; des outils "DT aware"
- ▶ Méta-données ; standard
- ▶ Fédération de modèles
- ▶ Processus : DevOps

## Des outils "DT aware" !

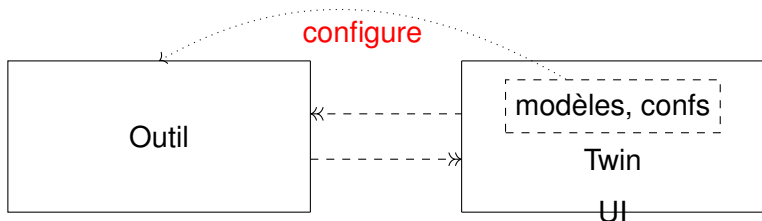
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



Un JN collecte les modèles "métier" et est agnostique des usages...

Un outil est agnostique du métier et fait des calcul à partir de modèles (configurations) fournis par un JN.

 Une belle séparation des responsabilités

## Travailler sur les metadata !

[Généralité](#)[Contenu](#)[Description](#)[Propositions](#)[Extras](#)

Analyser une instance = sélection de données

Analyser un agrégats = sélection de données

Composer des jumeaux = faire une union de données

Insérer les méta-data au vol

Propager les méta-data en fonction de la structure des données  
(composition, héritage ?)

Vérifier et valider des méta-data

## Quelles métadata

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

- ▶ Identification (instance, configuration)
- ▶ Localisation / position
- ▶ Horloge / temporalité
- ▶ Source / responsabilité
- ▶ Accès / droit / sécurité
- ▶ Qualité / précision / validation

## Information d'un jumeau numérique

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

	$\mathcal{E}$	$\mathcal{R}$	$\mathcal{T}$
modèles	E	R	O
scripts			S
configurations	$e_0$	$r_0$	$o_0$
données	$\vec{e}_e^+$	$\vec{d}_d^+$	$\bar{X}$

Les modèles sont statiques, dynamiques (algorithmes), prédictifs, etc. Ils sont sourcés et peuvent évoluer. . .

## Question 6

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

Faut-il inclure l'environnement ?

- ▶ Idéalement, l'environnement devrait avoir son JN
- ▶ Dans la réalité. . .

## DevOps

Généralité                      Contenu                      Description                      Propositions                      Extras

- ▶ Focalisation sur l'organisation, la gestion (pas sur les modèles qui sont des ressources)
- ▶ Fourniture d'interfaces de haut niveau pour des opérations comme : install, connect, run, replay, monitor, queries, clone, etc.
- ▶ Automatiser - par un langage ? - la description de :
  - l'organisation
  - des variantes (instances, agrégats, simulations)
  - configurations
  - opérations
- ▶ Utilisation de plein de modèles. . .

Je pense que des approches comme **Infrastructure As Code (IaC)** ou **Configuration As Code (CaC)** sont à suivre et spécialiser dans un contexte JN. . .



## Conclusion

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

- ▶ Bel exemple d'objet scientifique (encore mal-défini)
- ▶ Couvre de très nombreux aspects du GL
- ▶ ... de la modélisation, de la fédération de modèles
- ▶ ... du DevOps
  
- ▶ Paradigme avec de bonnes propriétés - frontières, composition, évolution
- ▶ Ne change rien (on fait déjà de nombreux JN)
- ▶ Change tout (si on l'utilise systématiquement et qu'on précise l'objet scientifique)

## Thèses

Généralité

Contenu

Description



Propositions

Extras

- ▶ Faire du JN un **objet logiciel et scientifique**
- ▶ Faire de la **fédération de modèles**
- ▶ Proposer une architecture, un (méta-)modèle
- ▶ Intégrer une approche DevOps (développement et déploiement continue) et IaC (Infrastructure as Code)
- ▶ Ne pas traiter les usages (analyse, apprentissage, prédiction, simulation, validation)

## Bibliographie I

Généralité	Contenu	Description	Propositions	Extras
------------	---------	-------------	--------------	--------

-  A. Beugnard, “A software engineering perspective on digital twin : many candidates, none elected.” in *2023 IEEE Smart World Congress (SWC)*. IEEE, 2023, pp. 1–8.
-  D. Hüsener, M. Schluse, D. Kaufmann, and J. Roßmann, “The digital twin as a mediator for the digitalization and conservation of expert knowledge,” in *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics*, 2021, pp. 241–251.

## Bibliographie II

Généralité	Contenu	Description	Propositions	Extras
------------	---------	-------------	--------------	--------



H. M. Muctadir, D. A. Manrique Negrin, R. Gunasekaran, L. Cleophas, M. van den Brand, and B. R. Haverkort, “Current trends in digital twin development, maintenance, and operation : an interview study,” *Software and Systems Modeling*, 2024. [Online]. Available : <https://link.springer.com/10.1007/s10270-024-01167-z>



A. Ammar, H. Nassereddine, N. AbdulBaky, A. AbouKansour, J. Tannoury, H. Urban, and C. Schranz, “Digital twins in the construction industry : A perspective of practitioners and building authority,” *Frontiers in Built Environment*, vol. 8, p. 23, 2022. [Online]. Available : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2022.834671/full>

## Nos activités/Projets

Généralité	Contenu	Description	Propositions	Extras
------------	---------	-------------	--------------	--------

1. Workshop [alife](#) [2018]
2. Bras robotique et interaction humaine (ROS, Xsens, Unity)
3. Appartement intelligent (OpenHab)
4. Thèse Inter-Carnot commencée en 10/2023 (avec Mines Alès)
5. CPER Industrie du Futur (UBS-ENSTA Bretagne-UBO)
6. Food3SA (Bioréacteurs - avec UBS-ENSTA Bretagne-UBO)
7. Usine [pédagogique](#) Fischertechnik (PLC, MQTT, Unity)
8. Thèse (Carnot) DevOps pour jumeau numérique
9. [Appel](#) du CNRS début 2024
10. Gemini3D (UBS-ENSTA Bretagne-ComposiTIC)

## Nos activités/Animation

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

- ▶ Chaire Industrie du Futur avec UniSA (Australie) [2021 - 2026]
- ▶ Participation au GT JN de l'AIF [2021 -]
- ▶ GT interne (Nantes-Rennes-Brest) equipe-jn [2022 -]
- ▶ ITSI Industrie du Futur [2023 -]
- ▶ Enquête Jumeau Numérique (à venir)

## Challenges (from [4]) I

Généralité	Contenu	Description	Propositions	Extras
------------	---------	-------------	--------------	--------

► Contractual Awareness and Knowledge

\*C1 Lack of clarity on data ownership

C2 Lack of understanding of the legal responsibilities and liabilities

C3 Limited awareness on changes to the Errors and Omissions (E&O) liability

C4 Uncertainty on how contracts need to be modified

► Data Understanding, Preparation, and Usage

\*D1 Data accessibility (data accessibility of different stakeholders, who has the right to access and/or update the data)

D2 Data analytics (reliable and efficient data analysis techniques)

D3 Data availability (defining needed data and establishing effective data management)

## Challenges (from [4]) II

Généralité	Contenu	Description	Propositions	Extras
------------	---------	-------------	--------------	--------

- \*D4 Data capturing (use of automated and remote data collection techniques to control and monitor the quality of the collected data)
- D5 Data communication latency (between the physical and virtual model)
- \*D6 Data ownership (explicitly define who owns the data and who owns the most updated version of the digital model)
- \*D7 Data quality and reliability (continuous update of the data by calibrating and validating the digital models)
- D8 Data security and privacy (secure authentication and communication, data cyber-security, information security management)
- D9 Data sensing (loss of data during transfer and/or due to software incompatibility)



## Challenges (from [4]) III

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

- \*D10 Data sharing and interoperability (on a project, within a company, and across companies)
- D11 Data storage (availability of databases)

\* metadata solution ?