



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

# Jumeau numérique Quelques réflexions

**Antoine Beugnard**

IMT Atlantique  
18 avril 2024

## 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 [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)

## Frontière [1]

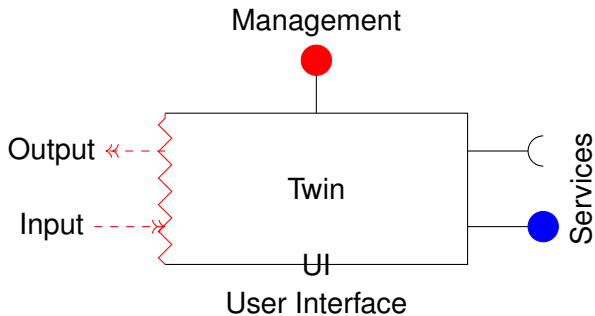
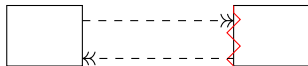
Généralité

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

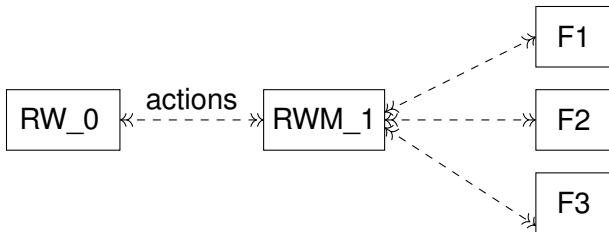
- ▶ Faire de l'informatique ; c'est souvent faire des jumeaux numériques
- ▶ Il a des dizaines de formes de jumeaux numériques (prototype, shadow, mirror, archive, ...)
- ▶ Un jumeau numérique (DT/JN) forme un couple avec son Système de Référence<sup>1</sup> (SR/RS)
  - DT, en tant que modèle, est **moins** 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 seul "de" ? instance, agrégat ?
- ▶ 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].

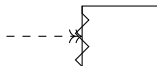


## Quels usages ?

Généralité      Contenu      Description      Propositions      Extras

*Usage**RS**JN cœur**Outils/Services*

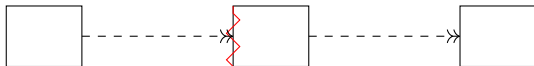
Build/Install



Monitor/Collect



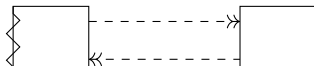
Display/Alarm



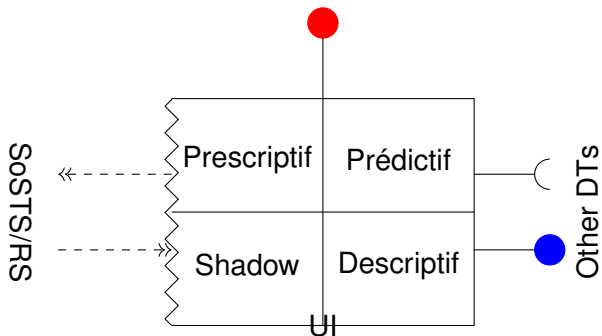
Control



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



*Un ensemble organisé de modèles numériques.*



## 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)

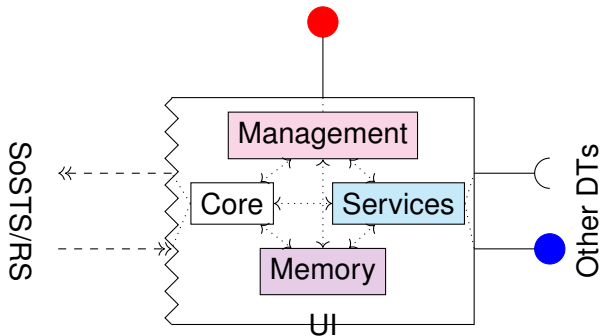
- ▶ les algorithmes de contrôle (hors RS)

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

- ▶ les modèles de simulation<sup>2</sup> et leurs résultats. . .

---

2. Modèles mécaniques, chimiques, physiques, biologiques, physiologiques, hydrauliques, comportementaux, structuraux, fonctionnels, etc. et leurs modèles d'interaction. . .



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

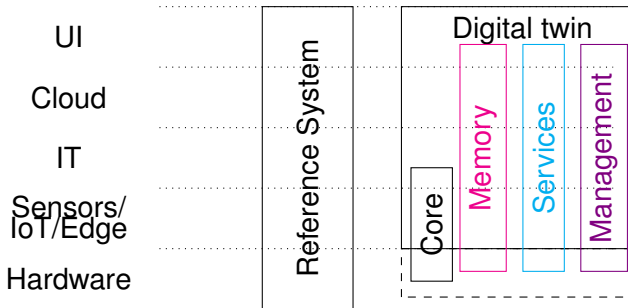
Généralité

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.



## 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

## Life cycle

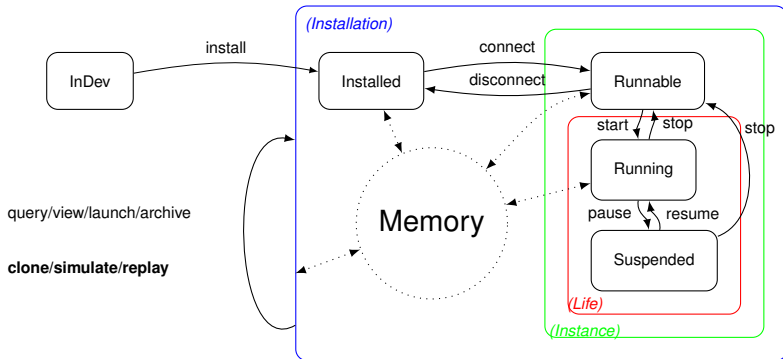
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



## Type and instances

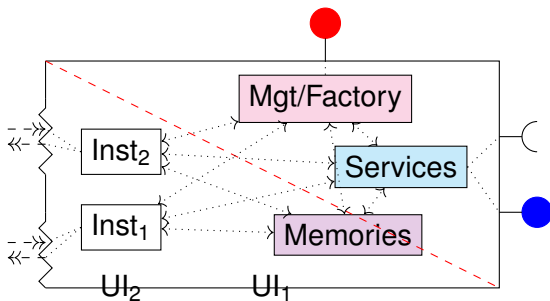
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



- Example :  $inst1 \leftrightarrow RS$  et  $inst2 \leftrightarrow RS'$  (agrégat)

## Question 3

[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 4 et 4 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

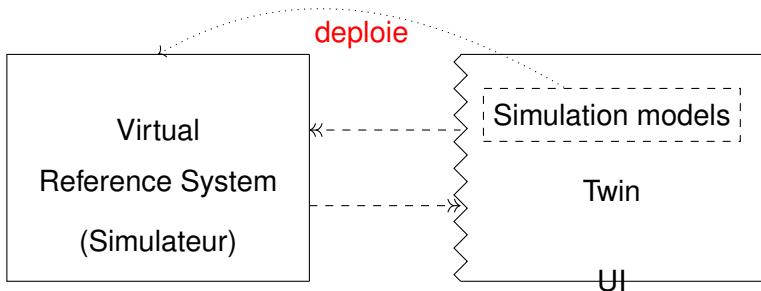
Généralité

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

## 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

- ▶ Localisation / position
- ▶ Horloge / temporalité
- ▶ Source / responsabilité
- ▶ Accès / droit / sécurité
- ▶ Qualité / précision / validation

## Data $d$ , metadata $\hat{d}$ , metamodèle $\bar{d}$ , fonction $\check{d}$

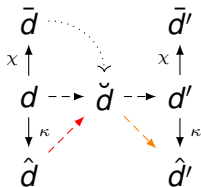
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



## Remarque

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

- ▶ Le calcul se focalise sur  $d \dashrightarrow \check{d} \dashrightarrow d'$  only.
- ▶ La programmation, c'est comment écrire  $\check{d}$  from  $\bar{d} \dashrightarrow \check{d} \dashleftarrow \bar{d}'$
- ▶ Un calcul pourrait être conscient des métadonnées (rouge) et produire des métadonnées (orange)  $d_{\hat{d}} \dashrightarrow \check{d} \dashrightarrow d'_{\hat{d}'}$ .

## 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	$\vec{e}_{\hat{e}}$	$\vec{d}_{\hat{d}}$	$\bar{X}$

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

## Question 5

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

## 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

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.

## 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)

Data  $d$ , metadata  $\hat{d}$ , metamodèle  $\bar{d}$ , fonction  $\check{d}$ 

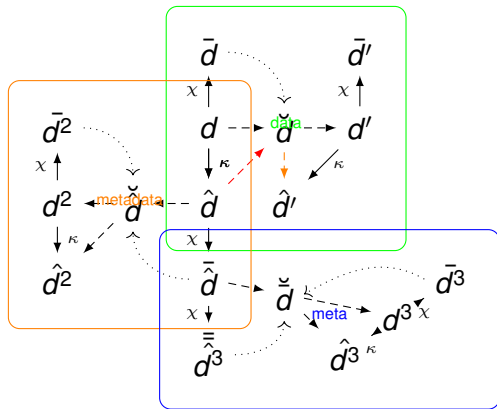
Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras



Où ranger les données – abstraction ( $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{E}$ )

Généralité                      Contenu                      Description                      Propositions                      Extras

Information	abrev.	lieu
modèle du système de référence	$r$	R
metadata de $r$ (valeurs !)	$\hat{r}$	R
metamodèle de $r$	$\bar{r}$	O
metadata de $\bar{r}$ (valeurs !)	$\hat{\bar{r}}$	O
metamodèle des metadata de $r$ et $\bar{r}$	$\bar{\hat{r}}$	O

Si besoin...

modèle de l'environnement	$e$	E
metadata de $e$ (valeurs !)	$\hat{e}$	E
metamodèle de $e$	$\bar{e}$	O
metadata de $\bar{e}$ (valeurs !)	$\hat{\bar{e}}$	O

Pour simplifier :  $\hat{\bar{e}} = \bar{\hat{r}} = \bar{\bar{o}} = \bar{\bar{s}}$

Où ranger les données – abstraction ( $\mathfrak{T}$ )

Généralité

Contenu

Description

Propositions

Extras

Information	abrev.	lieu
modèle du jumeau	$o$	$O$
metadata du jumeau (valeurs !)	$\hat{o}$	$O$
metamodèle du jumeau	$\bar{o}$	$O$
metadata de $\bar{o}$ (valeurs !)	$\hat{\bar{o}}$	$O$
scripts	$s$	$S$
metadata of $s$ (valeurs !)	$\hat{s}$	$S$
langages	$\bar{s}$	$O$
metadata des langages (valeurs !)	$\hat{\bar{s}}$	$O$

Où ranger les données – concrètes/valeurs ( $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{E}$ ,  $\mathfrak{T}$ )

Généralité                      Contenu                      Description                      Propositions                      Extras

Information	abrev.	lieu
configuration	$e_0, r_0, o_0$	$\mathfrak{E}, \mathfrak{R}, \mathfrak{T}$
metadata des configurations	$\hat{e}_0, \hat{r}_0, \hat{o}_0$	$\mathfrak{E}, \mathfrak{R}, \mathfrak{T}$
metadata de r et $\bar{r}$	$\hat{r}, \hat{\bar{r}}$	R,O
metadata de e et $\bar{e}$	$\hat{e}, \hat{\bar{e}}$	E,O
metadata de o et $\bar{o}$	$\hat{o}, \hat{\bar{o}}$	O,O
metadata de s et $\bar{s}$	$\hat{s}, \hat{\bar{s}}$	S,O
données collectées	$\vec{e}, \vec{r}$	$\mathfrak{E}, \mathfrak{R}$
metadata collectées dans R	$\vec{\hat{r}}, \vec{\hat{\bar{r}}}$	$\mathfrak{R}$
metadata collectées dans E	$\vec{\hat{e}}, \vec{\hat{\bar{e}}}$	$\mathfrak{E}$

Il peut y avoir de nombreuses configurations. Une configuration est une metadata des données collectées.  $x_0 \in \hat{\vec{X}}$