




Fédérer
Accélérer
Transformer



Jumeau Numérique

**Architecture fonctionnelle
et mise en œuvre**



010
010
110
010



Publiée en mars 2023, cette première brochure a pour objectif d'éclairer et d'orienter les industriels dans leurs réflexions en livrant une définition du Jumeau Numérique et en détaillant de nombreux cas d'usage industriels.



Cette deuxième brochure, parue en mars 2025, détaille les situations dans lesquelles le Jumeau Numérique peut contribuer à une réduction d'impact environnemental.

LE JUMEAU NUMÉRIQUE

CADRE DE MISE EN ŒUVRE DES CAS D'USAGE INDUSTRIELS

L'objectif du comité technique Jumeau Numérique de l'Alliance Industrie du Futur est d'aider les petites et moyennes entreprises industrielles à comprendre et à adopter la technologie du Jumeau Numérique.

La première brochure de ce comité, « Jumeau Numérique, levier majeur de la transformation digitale de l'industrie », propose une définition du Jumeau Numérique et en détaille de nombreux cas d'usage industriels. Une seconde brochure, « Jumeau Numérique, un levier majeur pour réduire l'impact environnemental de l'industrie », présente les opportunités de réduction d'impact environnemental que peut offrir le Jumeau Numérique.

Il s'agit dans les deux cas d'explicitier les raisons d'adopter cette technologie (le « Pourquoi »). Le présent document aborde, pour sa part, les questions du « Quoi » - de quoi est composé un Jumeau Numérique - et du « Comment » - comment mettre en œuvre un Jumeau Numérique. Il propose un schéma d'architecture fonctionnelle qui identifie, décrit et articule les différents blocs fonctionnels qui composent un Jumeau Numérique.

Le modèle d'architecture fonctionnelle proposé est conçu pour être aussi générique que possible afin d'englober les cas d'utilisation industriels identifiés par le comité technique dans la première brochure, tout en offrant le bon niveau d'abstraction pour permettre différents choix techniques d'implantation. L'objectif est de réduire le niveau de complexité et de démocratiser l'accès et l'adoption des Jumeaux Numériques, notamment par les PME. Des exemples d'application de l'architecture fonctionnelle sont ensuite décrits à partir de la [page 24](#).

Ce document aborde également les aspects normatifs, en [page 30-31](#), et les spécificités de la mise en œuvre d'un projet Jumeau Numérique à partir de la [page 32](#).

SOMMAIRE

01 ARCHITECTURE FONCTIONNELLE 6	02 EXEMPLES D'APPLICATION DE L'ARCHITECTURE FONCTIONNELLE 24	04 CADRE DE MISE EN ŒUVRE DE L'ARCHITECTURE FONCTIONNELLE 32	CONCLUSION 41
Schéma de l'architecture fonctionnelle 7	Jumeau Numérique de bioréacteur 25	4.1. Méthodologie de mise en œuvre 32	ANNEXES 42
Relation de l'architecture avec la définition du Jumeau Numérique 8	Jumeau Numérique d'une ligne de production 26	4.1.1. Considérations générales 32	Glossaire 42
Comprendre l'architecture fonctionnelle générique du Jumeau Numérique 10	Jumeau Numérique d'équipement industriel en opération (machine de planage) 27	4.1.2. Le tableau périodique du Digital Twin Consortium 33	Tableau de correspondance entre les blocs de l'architecture fonctionnelle et les normes et standards 44
Correspondance avec les cas d'usage documentés 12	Jumeau Numérique du processus de maintien en conditions opérationnelles (processus de maintenance) 28	Description 33	Tableau de correspondance entre l'architecture fonctionnelle et les exemples de Jumeaux Numériques 45
Explication des éléments du schéma de l'architecture fonctionnelle	Jumeau Numérique d'infrastructure de réseau de communication 29	Application du DTC-CPT à l'exemple du maintien en conditions opérationnelles 36	
Entité réelle / physique 14		4.2. Du Jumeau Numérique à la continuité numérique 37	
Connectivité 15		4.2.1. Problématique et nécessité de la convergence IT/OT 37	
Préparation des données 16		La problématique : deux mondes historiquement séparés 37	
Stockage de modèles & données 17	03 NORMES D'ARCHITECTURE DE JUMEUX NUMERIQUES 30	Vers une vision unifiée et intelligente 37	
Interface utilisateur 18	3.1. Architecture fonctionnelle selon la norme ISO 23247-2:2021 31	Le lien réel-virtuel : du hardware au système d'information 37	
Traitements avancés 19	3.2. La norme IEC 63278-1:2023 31	La chaîne de données : de la donnée à la sagesse (DIKW) 38	
Utilisateurs 20		4.2.2. Valorisation de la chaîne de données 38	
Administration & Orchestration 21		4.2.3. Composition de Jumeaux Numériques 39	
Interfaces données externes 21		4.3. Spécificités des projets Jumeau Numérique 39	
Autres Jumeaux Numériques 22		4.3.1. Un équilibre entre rigueur et agilité dans la gouvernance et la gestion de projet 39	
Systèmes d'information externes au Jumeau Numérique 23		4.3.2. Vers une industrie inclusive et responsable 39	
		4.3.3. Un impératif de durabilité environnementale à intégrer dès la conception 40	
		4.3.4. Un investissement stratégique pour l'industrie 40	
		4.3.5. L'Intelligence Artificielle, accélérateur de valeur pour les Jumeaux Numériques 40	



01 ARCHITECTURE FONCTIONNELLE

Un Jumeau Numérique est un système numérique complexe et composite en couplage étroit avec le monde réel. Pour le concevoir et le développer, trois principaux points de vue sont généralement considérés :

- 1 Architecture fonctionnelle** se concentre sur le comportement fonctionnel du logiciel et les interactions avec l'environnement.
- 2 Architecture logique** décrit la structure interne du logiciel, qui peut être représentée comme un réseau de composants logiques qui implémentent les fonctionnalités du système.
- 3 Architecture technique** décrit la manière dont le système est implémenté et déployé, son comportement logiciel et sa structure matérielle.

En lien avec la définition du Jumeau Numérique figurant dans la première brochure, l'architecture fonctionnelle du Jumeau Numérique peut être représentée selon la proposition de schéma ci-contre.

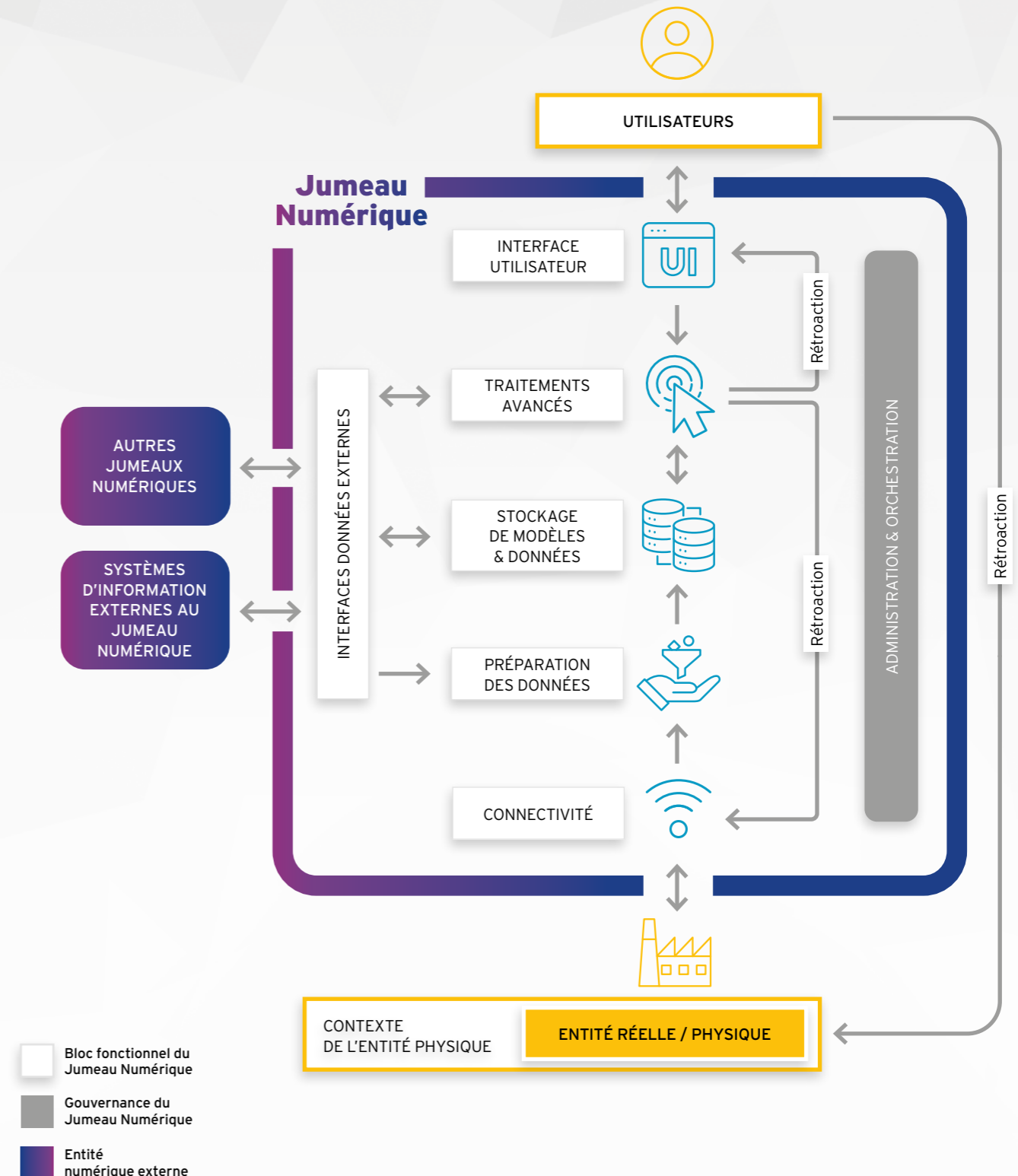
Le chapitre « Explication des éléments du schéma » détaille les différents blocs du schéma fonctionnel et les échanges de données représentés par des flèches.

Pourquoi se concentrer sur l'architecture fonctionnelle ?

Définir et utiliser l'architecture fonctionnelle du Jumeau Numérique permet aux experts du domaine, aux utilisateurs ainsi qu'aux architectes et ingénieurs logiciels de partager la compréhension des fonctions et des limites du système et de guider sa conception et sa construction. Les différentes parties prenantes peuvent ainsi raisonner et prendre, ensemble, les décisions de conception du Jumeau Numérique les plus pertinentes.

L'architecture fonctionnelle se concentre sur la manière de répondre aux besoins fonctionnels (par exemple analyser, prédire, ou optimiser le fonctionnement d'une ligne de production) et sur les interactions du Jumeau avec son environnement sans se préoccuper des détails techniques de sa réalisation.

Schéma de l'architecture fonctionnelle



RELATION DE L'ARCHITECTURE FONCTIONNELLE AVEC LA DÉFINITION DU JUMEAU NUMÉRIQUE

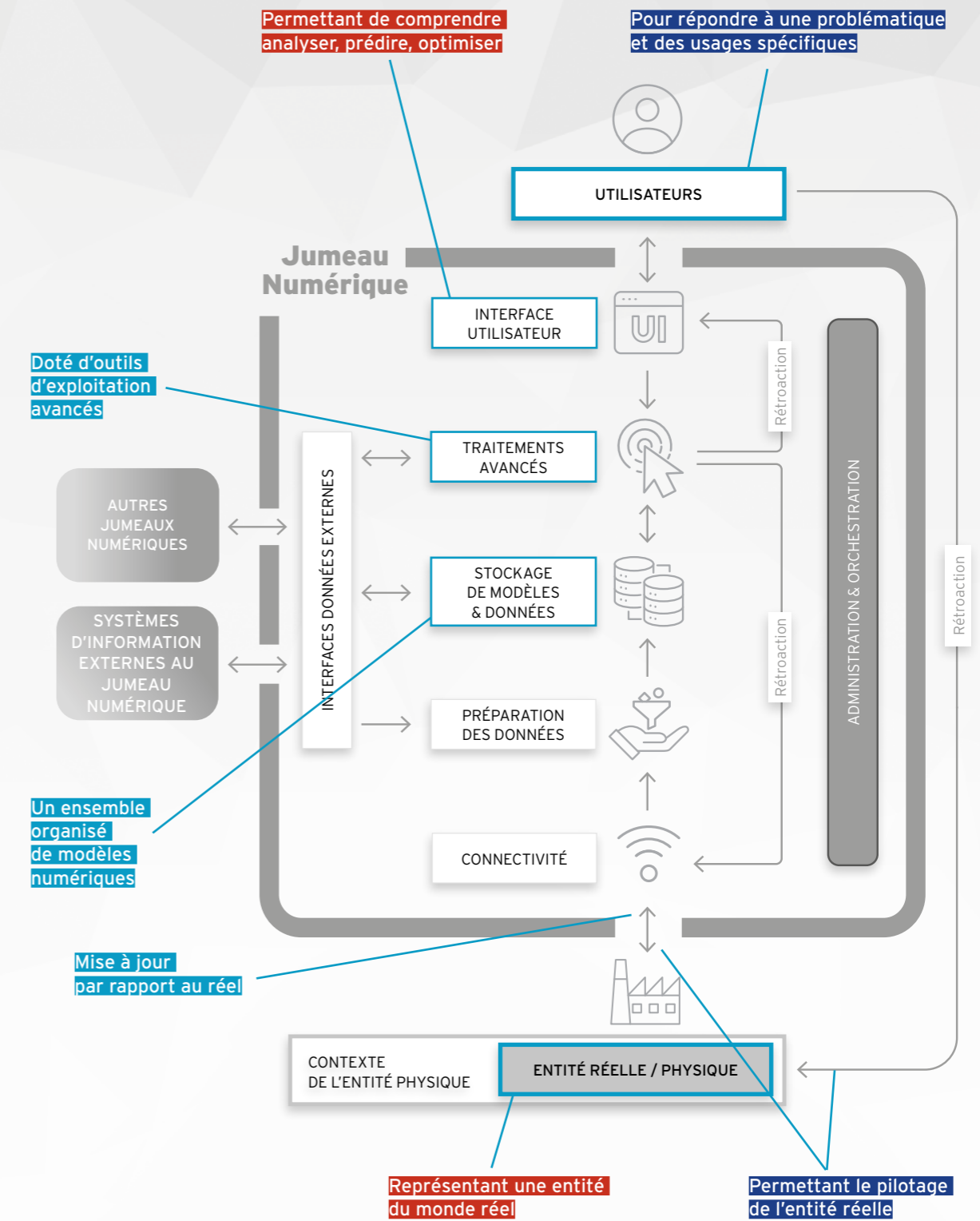
Pour être qualifié de Jumeau Numérique, un système doit répondre à ces 3 critères à la fois :

- 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**.

Le Jumeau Numérique offre de nouvelles opportunités aux entreprises pour optimiser leurs performances. Il doit avoir un impact sur le jumeau physique durant au moins une phase donnée de son cycle de vie. Cet aspect est représenté par les flèches de rétroaction.

L'architecture fonctionnelle générique du Jumeau Numérique présentée dans ce document se calque sur cette définition proposée par l'Alliance Industrie du Futur.

Le schéma ci-contre illustre avec la correspondance des couleurs. Cette relation entre les blocs de l'architecture fonctionnelle et les éléments de la définition est développée page suivante.



Éléments de la définition du Jumeau Numérique

Bloc fonctionnel du Jumeau Numérique

Gouvernance du Jumeau Numérique

Entité numérique externe

Comprendre l'architecture fonctionnelle générique du Jumeau Numérique

1 Le Jumeau Numérique est un ensemble organisé de modèles numériques

Les modèles numériques possibles comprennent des modèles géométriques 2D ou 3D, des modèles topologiques, des modèles physiques et mathématiques, des modèles fonctionnels, des modèles d'IA, etc. Ces modèles sont organisés et interconnectés.

2 Le Jumeau Numérique doit représenter une entité du monde réel

Le Jumeau Numérique se distingue donc de la maquette numérique réalisée avant production, qui n'est pas un Jumeau Numérique. En revanche, une maquette numérique peut faire partie d'un Jumeau Numérique : une fois synchronisée avec son homologue physique, elle devient un Jumeau Numérique. L'entité étudiée peut être par exemple un produit, une machine, un procédé, un service, une usine de production entière, etc.

3 Le Jumeau Numérique est conçu pour répondre à des problématiques et usages spécifiques

Dans le schéma d'architecture, les « **Utilisateurs** » ainsi que les « **Systèmes d'information externes** » sont les entités qui utilisent le Jumeau Numérique et en bénéficient. Le Jumeau Numérique n'est pas un but en soi, c'est un moyen de répondre à des objectifs précis.

4 Le Jumeau Numérique est mis à jour par rapport au réel

Si les modèles ne sont pas alimentés par des données du monde réel, ils ne forment pas un Jumeau Numérique. Le lien n'est pas toujours direct ni automatisé. La récupération des données de l'entité réelle est prise en charge par le bloc fonctionnel « **Connectivité** ». Cette mise à jour suit la dynamique de l'entité étudiée et est calibrée selon les besoins exacts du ou des usages prévus. La mise à jour ne se fait pas forcément en temps réel et la précision (granularité et contenu) doit également être choisie en fonction du besoin. Le Jumeau Numérique peut potentiellement contenir des formes, des états, des fonctions, des processus, des comportements, des attributs, des données opérationnelles, des dynamiques, etc. Une précision absolue et une ultra haute fidélité sont impossibles et non nécessaires.

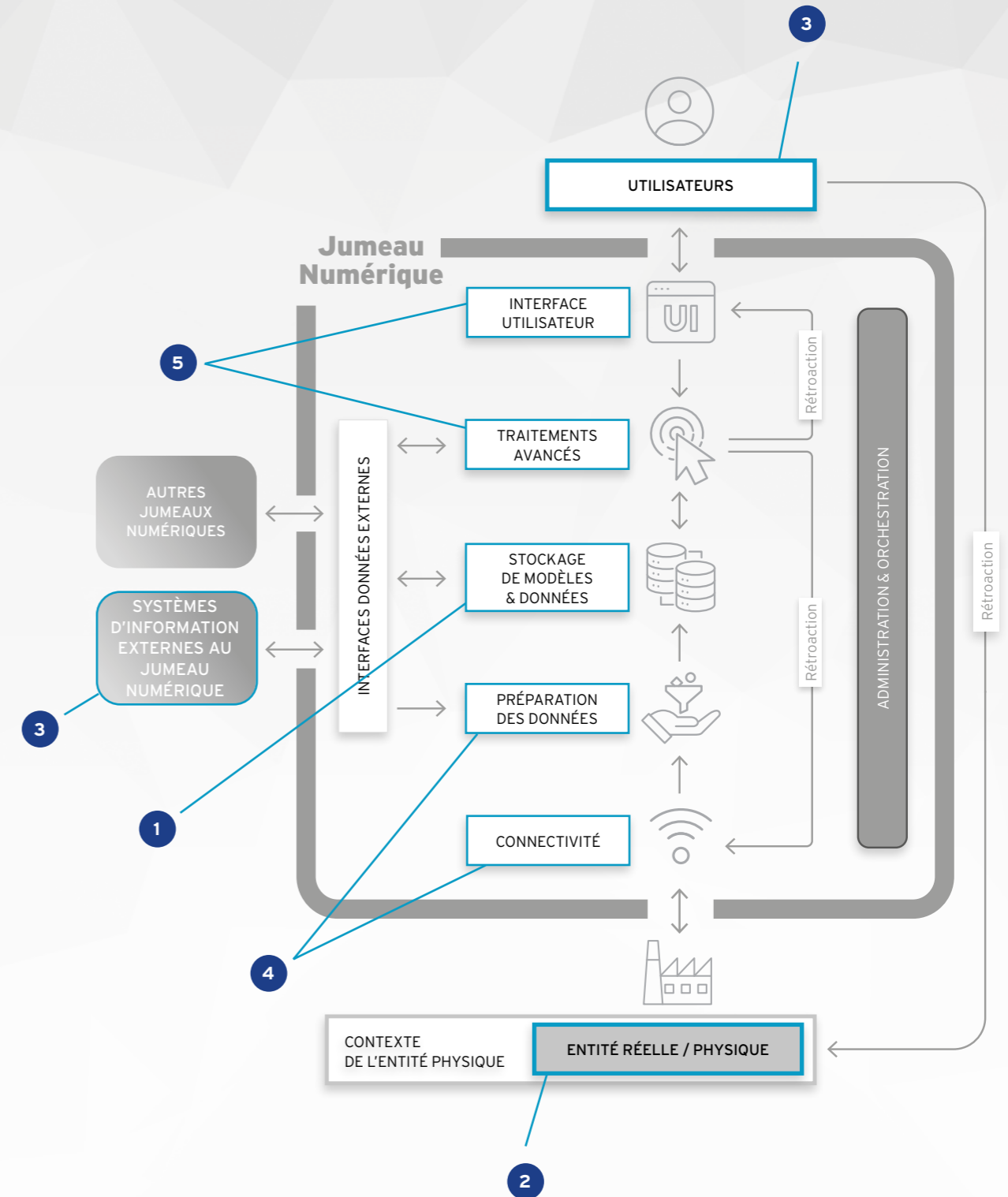
5 Les outils d'exploitation avancés pour comprendre, analyser, prédire ou optimiser

Les outils d'exploitation avancés constituent « l'intelligence » du Jumeau Numérique en enrichissant les données réelles collectées avec des informations indispensables à la boucle de rétroaction vers l'entité réelle afin d'atteindre les objectifs visés.

Il peut s'agir de simulateurs numériques, de générateurs de modèles 3D, de moteurs d'IA, d'outils de recherche opérationnelle, d'outils d'aide à la décision, etc.

L'aspect « cycle de vie » est ici implicite!

Dès la phase de conception, le Jumeau Numérique doit être considéré avec une longue durée de vie. Celle-ci sera fortement corrélée à la durée de vie du jumeau physique et à son environnement. Le Jumeau Numérique doit aussi être considéré comme dynamique car il suit les évolutions de son jumeau physique : nouveaux paramétrages, améliorations, cycles de maintenance, modifications des données reçues (ajout, suppression, fréquence, type de données...). Il devra également évoluer en fonction des différents usages et objectifs du moment. L'aspect cycle de vie du Jumeau Numérique dépend donc des évolutions des usages, de l'évolution de son architecture et de l'évolution de son jumeau physique.



Éléments de la définition du Jumeau Numérique

Bloc fonctionnel du Jumeau Numérique

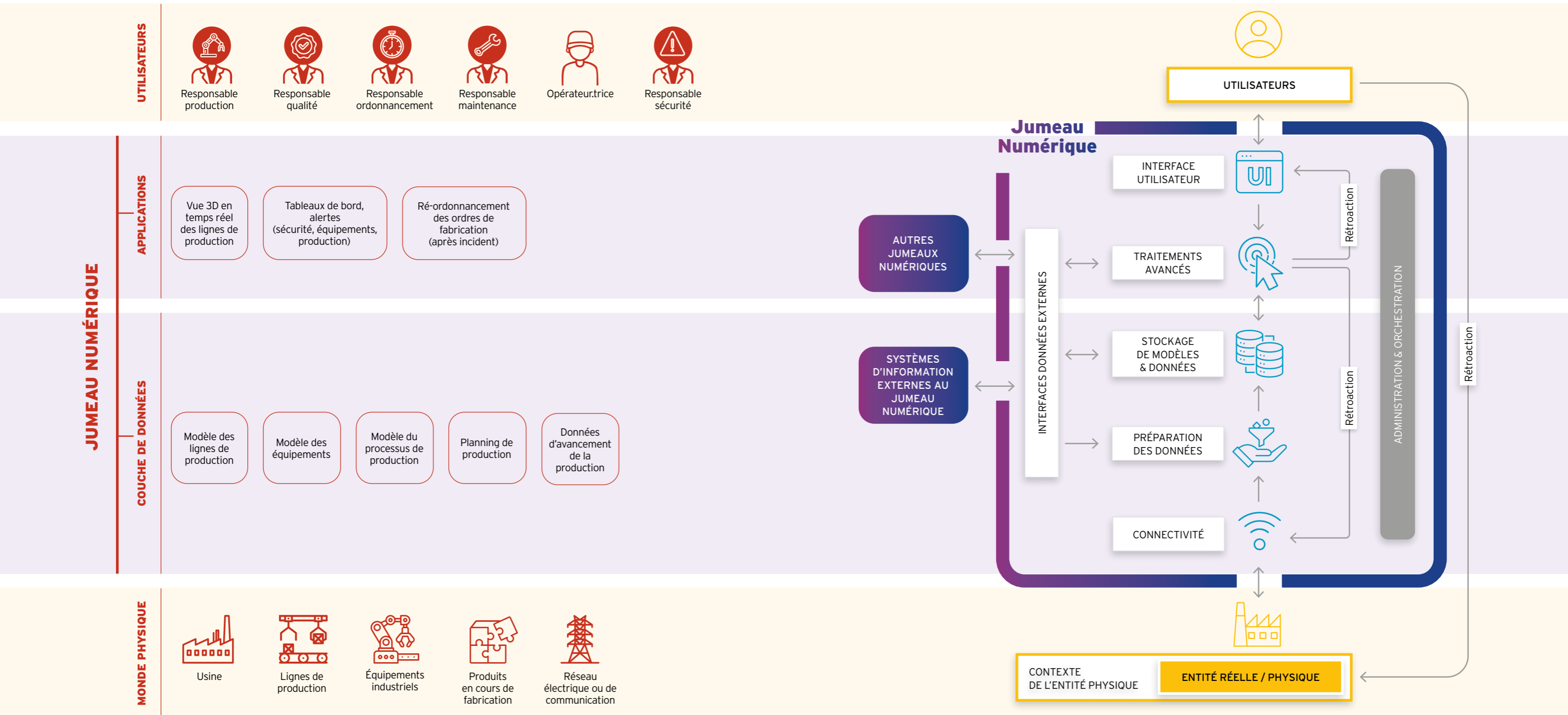
Gouvernance du Jumeau Numérique

Entité numérique externe

Correspondance avec les cas d'usage documentés

L'architecture fonctionnelle peut être mise en correspondance avec le schéma type des cas d'usage présentés dans la brochure « Jumeau Numérique : [Levier majeur de la transformation digitale de l'industrie](#) » comme illustré ci-dessous.

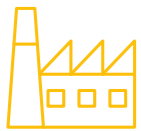
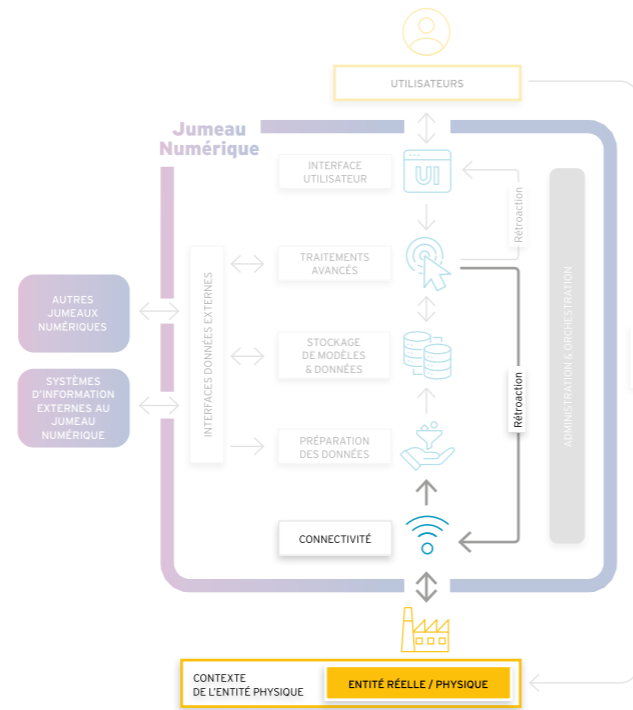
L'ensemble de ces cas d'usage et leur description peuvent être retrouvés dans cette brochure.



Cas d'usage [PCP-06] : Pilotage temps réel de la ligne de production

Bloc fonctionnel du Jumeau Numérique
 Gouvernance du Jumeau Numérique
 Entité numérique externe

Explication des éléments du schéma de l'architecture fonctionnelle



ENTITÉ RÉELLE / PHYSIQUE

Distinguer l'entité réelle / physique de son contexte est nécessaire pour bien comprendre leurs rôles respectifs.

L'ENTITÉ RÉELLE / PHYSIQUE

correspond à l'objet du monde réel représenté par le Jumeau Numérique, pour répondre à une problématique et des usages spécifiques.

Comme par exemple :

- un équipement industriel,
- une ligne de production,
- un processus,
- des flux, etc.

LE CONTEXTE DE L'ENTITÉ PHYSIQUE

constitue l'environnement physique de l'entité réelle :

- équipements en lien avec l'objet représenté,
- instruments de mesure des conditions ambiantes (température, hygrométrie...),
- réseau informatique, bâtiment industriel...

Des données issues de ces objets de contexte peuvent alimenter des systèmes d'information externes au Jumeau Numérique, comme par exemple un MES (*Manufacturing Execution System*).

CONNECTIVITÉ



Assurer la communication et la synchronisation du Jumeau Numérique avec les équipements connectés.

Par exemple, si l'entité physique est une ligne de production, il peut s'agir d'assurer la communication avec des capteurs, des contrôleurs ou des équipements industriels (pompes, moteurs, robots...) installés sur la ligne.

La couche de **connectivité** masque la complexité de la communication avec des équipements parfois anciens, qui peuvent utiliser des technologies reposant sur des réseaux filaires ou sans fil et des protocoles propriétaires variés. Dans certains cas, la couche de connectivité du Jumeau Numérique ne dialogue pas directement avec les équipements mais s'appuie sur une couche intermédiaire d'échange telle qu'un système SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) ou une plateforme IIoT (*Industrial Internet of Things*).

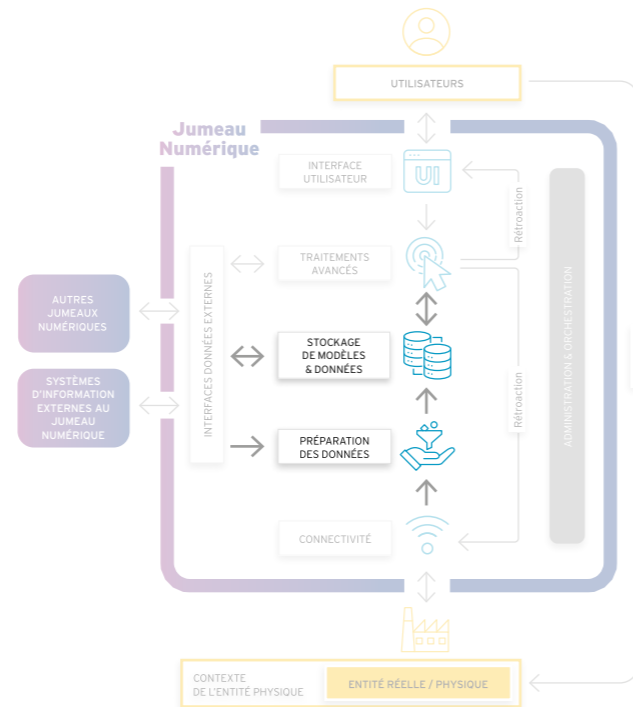
→ ENTRÉES

- Données venant du monde physique (niveaux 0-1-2 de la norme ISA-95) issues de capteurs, caméras, actionneurs, variateurs, moteurs, automates...
- Données de contrôle commande (rétroaction) venant de la couche **Traitements avancés** (niveaux 2-3-4 de la norme ISA-95) : consignes pour les équipements (départ cycle, arrêt, réglages, envoi de code machine...)

SORTIES →

- Données hétérogènes à destination du bloc **Préparation des données** devant être préparées avant utilisation par le bloc **Traitement des données** : séries temporelles, images, vidéos, données de mesure...
- Commandes compréhensibles par l'équipement (**entité réelle**) : ordres booléens, code machine, paramètres de réglage...

Explication des éléments du schéma de l'architecture fonctionnelle



PRÉPARATION DES DONNÉES



Rendre exploitables les données issues des équipements et capteurs via la couche de connectivité ou provenant de systèmes externes.

Cela peut consister notamment à :

- **Nettoyer les données** en vue des traitements avancés. Par exemple, en vue de la construction d'un modèle prédictif par apprentissage automatique, il peut être pertinent de filtrer certaines données aberrantes ou de remplacer des valeurs manquantes par des valeurs inférées.
- **Agréger statistiquement les données collectées.** Il n'est généralement pas nécessaire de stocker ni d'exploiter toutes les mesures d'un capteur, lesquelles peuvent être transmises très fréquemment. Par exemple, dans le cas de données émises toutes les millisecondes, on stockera plutôt une moyenne des valeurs collectées sur un plus grand intervalle de temps.
- **Structurer les suites de valeurs collectées en séries temporelles** avec un horodatage (*timestamp*) dans un fuseau horaire unique (typiquement UTC) afin que toutes les dates aient un sens clair et non ambigu.
- **Régulariser les séries temporelles**, par exemple en rendant tous les intervalles de temps constants, en arrondissant la composante temporelle à l'heure ou la minute.
- **Normaliser les données collectées**, par encodage, changements d'échelle ou d'unité de mesure, etc.
- **Contextualiser les données collectées**, il est important de savoir par exemple à quelle unité en cours de production se rapportent les mesures. Cette information peut être récupérée du MES (*Manufacturing Execution System*) via la couche d'interface aux données externes.
- **Anonymiser les données** si la confidentialité est nécessaire.

→ ENTRÉES

- Données brutes venant de la couche **Connectivité**, par exemple : séries de mesures, images vidéo, données d'état (ou descriptives) de la machine, etc.
- Données venant du bloc **Interfaces données externes** lorsque des informations complémentaires sont requises pour la préparation des données (par exemple : fuseau horaire, numéro de série issu de l'ERP).

SORTIES →

- Données pré-traitées (nettoyées, filtrées, agrégées, structurées, normalisées, annotées, contextualisées, anonymisées, etc.), prêtes à être stockées au niveau du bloc **Stockage de modèles & données** et assimilées par les outils de modélisation au niveau **Traitements avancés**, par exemple : données statistiques, images segmentées, etc.

STOCKAGE DE MODÈLES & DONNÉES



Assurer le formatage, le stockage et la mise à disposition des modèles et des données.

Ce bloc permet de structurer les données dans des bases et de leur associer une sémantique, par exemple en utilisant des ontologies.

Il assure l'accès aux informations collectées et produites par le Jumeau Numérique. Il permet la navigation dans les données et la recherche d'information par requêtes.

Il s'assure que les informations fournies respectent certaines règles (*notion de contrat*).

Il est responsable des méta-données (dates de collecte/mise à jour, origine de la donnée, unité de la donnée, identification du contenu, commentaire, etc.).

Le stockage recouvre les aspects historisation, archivage, choix des données et des modèles.

La sécurisation des données et de leur accès doit être prise en compte dans ce bloc fonctionnel.

→ ENTRÉES

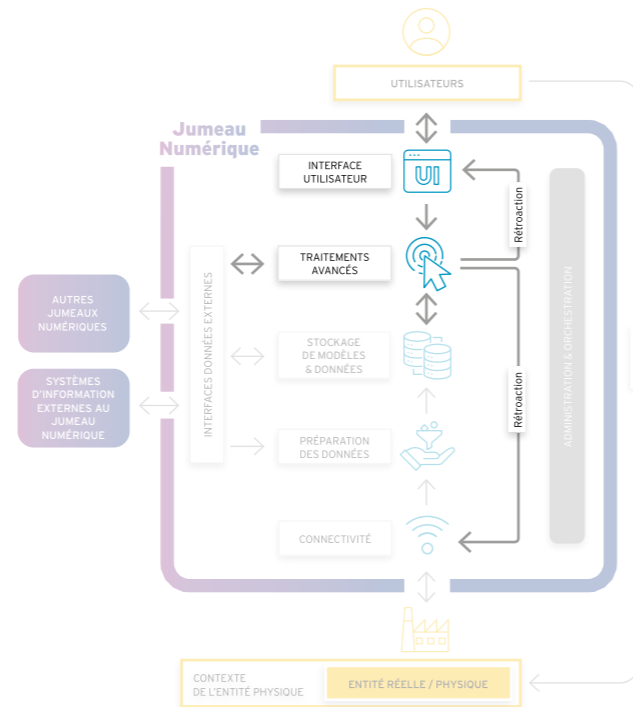
- Données provenant du bloc **Préparation des données** : données issues de l'entité physique, agrégées, contextualisées, anonymisées et préparées (données OT, *Operational Technology*) et aussi potentiellement les données brutes (par exemple pour archivage).
- Données et modèles provenant du bloc **Traitements avancés** :
 - > Données enrichies, rectifiées ou complétées par des traitements complexes, y compris par l'IA.
 - > Modèles de simulation, modèles 2D, 3D, modèles physiques, modèles d'Intelligence Artificielle (IA), algorithmes et tous éléments de configuration des simulateurs et outils de prédiction et d'apprentissage.
 - > Résultats de simulations, de prédictions et d'analyses diverses, recommandations, historique des décisions.
- Données issues du bloc **Interfaces données externes** : données IT (*Information Technology*) issues :
 - > Des autres Jumeaux Numériques.
 - > Des systèmes d'information d'entreprise ou externes à l'entreprise.
- Requêtes d'interrogation du système de stockage initiées par le bloc **Interfaces données externes** ou **Traitements avancés**.

SORTIES →

- Fichiers, bases de données, modèles, résultats de requêtes exploitables par le bloc **Traitements avancés** ou **Interfaces données externes**.



Explication des éléments du schéma de l'architecture fonctionnelle



INTERFACE UTILISATEUR



Présenter à l'utilisateur les résultats des traitements avancés.

Cela peut se traduire par exemple par :

- Des écrans d'aide à la décision intégrant des prédictions ou recommandations issues d'un modèle prédictif construit à partir des données de production.
- Une représentation numérique de l'entité réelle grâce au Jumeau Numérique, mise à jour régulièrement.
- Une représentation d'instructions de travail ou de défauts qualité en réalité augmentée sur fond de représentation 3D d'un produit manufacturé.
- Une simulation de déplacement dans l'environnement d'une usine grâce à la réalité virtuelle.
- Des retours sensoriels (haptique, audio).

→ ENTRÉES

- Données et modèles issus du bloc **Traitements avancés** pour la rétroaction vers l'utilisateur, par exemple : indicateurs de performance (KPI), alertes, historique de données, rapports d'analyses, recommandations, résultats de simulation, résultats d'optimisation, modèles géométriques et physiques.
- Actions et requêtes issues de l'**Utilisateur** via une interface homme-machine, par exemple : paramétrage du Jumeau Numérique, validations de modèles d'IA, demandes de lancement de simulation.

SORTIES →

- Données et modèles à destination du bloc **Traitements avancés**, par exemple : scénarios à mettre en œuvre (nouvelles prévisions, adéquation de la capacité de production, ajout/suppression d'une machine, etc.), commandes à exécuter sur l'entité réelle / physique.
- Informations à destination des **Utilisateurs**, par exemple : KPI pour un tableau de bord, alerte de dérive, proposition d'alternatives, aide au diagnostic de panne, aide à la réparation.



TRAITEMENTS AVANCÉS



Pouvoir extraire les informations nécessaires à l'analyse, à la prise de décision, à la rétroaction automatisée et à l'interaction avec l'utilisateur.

Ce bloc permet de comprendre, prédire et optimiser le comportement de l'entité réelle et déclencher les actions en conséquence.

Comme illustré par les flèches **Rétroaction** du schéma fonctionnel, l'exécution des traitements avancés peut se traduire par :

- Une **action directe** sur l'entité réelle via la couche de **Connectivité**, par exemple pour l'optimisation de la production, ou pour réduire le risque de panne ou de casse machine (néanmoins, le Jumeau Numérique n'a pas vocation à se substituer aux fonctions de sécurité standard).
 - Une **remontée d'informations** à l'**Utilisateur** via la couche d'**Interface utilisateur**, dans des applications de visualisation et surveillance de l'installation ou d'aide à la décision (par exemple : remontée d'un écart sur un indicateur de production, détection de risques de troubles musculo-squelettiques).
- Pour obtenir ces résultats, ce bloc est chargé de la construction et de l'exécution de différents types de modèles avancés, variables selon les applications du Jumeau Numérique, comme par exemple :
- La simulation numérique et l'analyse des différents aspects de la physique de l'entité réelle (flux, déformations, échanges de chaleurs, etc.).
 - La prédiction du comportement de l'entité réelle et la recommandation d'actions.
 - Le calcul géométrique utilisé pour la détection de collision, pour la visualisation, pour l'analyse de défauts, etc.
 - La simulation fonctionnelle (exécution des processus en vue de la détection de déviations).
 - Le calcul d'optimisation pour aider à la prise de décision ou permettre une rétroaction automatisée.

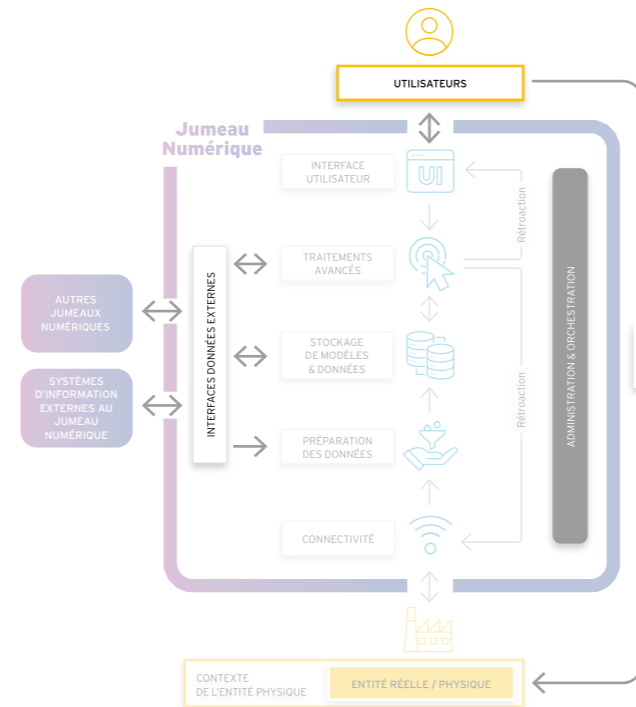
→ ENTRÉES

- Données issues du bloc **Stockage des données et des modèles**, par exemple : données historiques de production, d'exploitation ou de maintenance, méta-données.
- Données issues du bloc **Interface utilisateur**, par exemple : demande de calcul de prédiction de la qualité produit, lancement d'une simulation de flux, demande de recommandation de réglage, demande d'interaction avec l'entité réelle.
- Données issues du bloc **Interfaces données externes**, par exemple : données liées à l'environnement physique du Jumeau Numérique et nécessaires aux calculs de prédiction (météo, hygrométrie, autres équipements), données de contexte issues des systèmes d'information d'entreprise, données issues d'autres Jumeaux Numériques.

SORTIES →

- Données destinées au bloc **Stockage des données et des modèles**, par exemple : modèles prédictifs, modèles de représentation de l'entité physique selon une ou plusieurs dimensions (modèle de flux, modèle de câblage électrique, modèle mécanique...).
- Données de rétroaction vers le bloc **Interface utilisateur**, par exemple : recommandations de changement de réglage pour prévenir un problème de qualité, alertes et codes d'erreur, données permettant de localiser un défaut détecté par un système de vision intelligent, données permettant de visualiser un processus de production actuel ou simulé.
- Données de rétroaction vers le bloc **Connectivité**, par exemple : consigne d'arrêt d'un équipement pour éviter une panne imminente, paramètres de réglage calculés par un modèle d'IA, fichiers de reconfiguration d'équipement de télécommunication.
- Données en direction du bloc **Interface données externes**, par exemple : données à destination d'une application du système d'information de l'entreprise (ERP, GMAO...), demande de pièce à remplacer suivant la recommandation d'un algorithme de maintenance prédictive, rapports d'analyse des consommations énergétiques à destination des tableaux de bord de l'entreprise.

Explication des éléments du schéma de l'architecture fonctionnelle



UTILISATEURS



Il s'agit des utilisateurs humains du Jumeau Numérique.

Par exemple :

- un expert guidant un opérateur de maintenance à distance grâce au Jumeau Numérique,
- un opérateur en atelier utilisant la réalité augmentée pour être guidé dans son travail,
- un ingénieur de conception tirant parti des données issues des Jumeaux Numériques des produits en usage.

Dans certaines applications de qualité ou de contrôle, le Jumeau Numérique n'offre que des suggestions et il revient à l'utilisateur de décider de la conduite à adopter, comme par exemple effectuer un changement de réglage directement en atelier pour éviter un défaut qualité.

C'est ce qu'illustre la flèche de rétroaction entre les blocs « *Utilisateurs* » et « *Entité réelle / physique* ».

→ ENTRÉES

- Informations mises à disposition par le bloc *Interface Utilisateur* (tableaux de bord, résultats de simulations, visualisations 3D ou 2D, alertes...) sur des équipements variés (écran, tablette, casque de réalité virtuelle ou augmentée, dispositif sonore, retour haptique, etc).

SORTIES →

- Actions déclenchées via *l'interface utilisateur* du Jumeau Numérique, par exemple : demande d'exécution d'une simulation, de calcul d'une prédiction ou d'une recommandation.
- Commandes déclenchées directement sur *l'entité réelle* telle qu'un équipement de production : par exemple, un changement de réglage (température d'un four, durée de cuisson...), selon les résultats de l'analyse effectuée par ou à l'aide du Jumeau, avec l'appui possible d'un modèle d'IA.

ADMINISTRATION & ORCHESTRATION

Administrer, orchestrer et sécuriser.

Ce bloc prend en charge toutes ces tâches transverses :

- **Administration** : gestion des utilisateurs, des rôles et des droits d'accès afférents, déclaration des différents équipements connectés et configuration de leur accès. Gestion des différentes versions du Jumeau Numérique.
- **Orchestration** : configuration automatique, gestion et coordination des différents systèmes, applications et services. Par exemple, cette fonction est essentielle dans une architecture technique de type « micro-services ».
- **Sécurité** : capacité à assurer la disponibilité, la confidentialité et l'intégrité des données et des modèles du Jumeau Numérique, et à le protéger des attaques malveillantes.

INTERFACES DONNÉES EXTERNES

Assurer la communication du Jumeau Numérique avec les systèmes d'informations externes à son périmètre et avec les autres Jumeaux Numériques.

Les échanges avec les systèmes OT (*Operational Technology*) sont, eux, pris en charge par la couche de **connectivité**. Grâce à cette interface, il est possible de masquer la complexité et la variété des modalités de connexion aux systèmes externes. Selon leur nature et leur niveau d'agrégation, les données transitant par cette couche peuvent être échangées avec différentes entités fonctionnelles du Jumeau Numérique, comme illustré dans le schéma. Les données issues de ces différents blocs peuvent par ailleurs être préparées avant d'être publiées à l'extérieur du Jumeau Numérique (anonymisation, chiffrement, etc.).

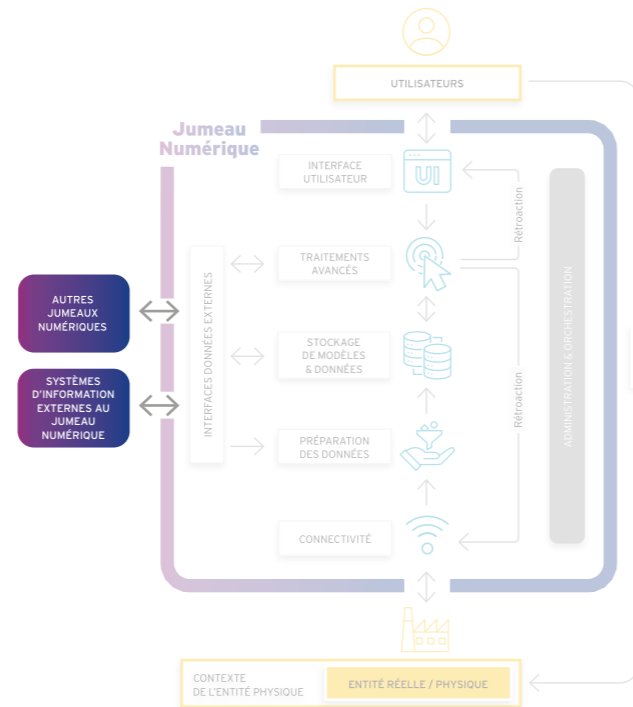
→ ENTRÉES

- Données et modèles issus des **systèmes d'information externes**, par exemple : données issues de l'ERP, du MES, des systèmes de gestion des stocks, données du contexte de l'environnement du jumeau physique, telles que des informations météorologiques.
- Données issues **d'autres Jumeaux Numériques**, par exemple : données agrégées d'un processus de production amont, données de géolocalisation d'un transporteur provenant du Jumeau Numérique d'un réseau logistique.
- Données provenant des blocs **Traitements avancés, Stockage de modèles & données** et **Préparation des données** : toutes données pouvant être utiles aux systèmes d'information de l'entreprise et aux autres Jumeaux Numériques.

SORTIES →

- Données et modèles à destination des **systèmes d'information externes**.
- Données et modèles à destination des **autres Jumeaux Numériques**.
- Données utiles aux blocs **Traitements avancés, Stockage de modèles & données** et **Préparation des données**.

Explication des éléments du schéma de l'architecture fonctionnelle



AUTRES JUMEAUX NUMERIQUES

Dans les applications les plus avancées, il est souvent nécessaire d'établir une connexion bidirectionnelle avec d'autres Jumeaux Numériques.

Par exemple, pour faciliter une opération d'assemblage grâce à la réalité augmentée, on devra disposer non seulement du Jumeau Numérique du produit en cours de production (avec sa représentation 3D à jour) mais aussi du Jumeau Numérique du processus industriel, afin de connaître la séquence des instructions de travail restant à effectuer.

Autres exemples :

- Le Jumeau Numérique d'un véhicule en mouvement peut communiquer avec le Jumeau Numérique de l'infrastructure routière.
- Différents Jumeaux Numériques peuvent communiquer le long d'une chaîne de valeur, afin de faciliter l'approvisionnement.
- Le Jumeau Numérique d'un système complexe, comme un navire, un réseau d'énergie ou de télécommunication, peut communiquer avec les Jumeaux Numériques des différents systèmes qui le composent.
- Le Jumeau Numérique d'un robot peut communiquer avec celui d'un autre robot afin d'éviter les collisions.



SYSTEMES D'INFORMATION EXTERNES AU JUMEAU NUMERIQUE

On distingue deux catégories de systèmes d'information externes au Jumeau Numérique :

- Systèmes d'information d'entreprise, par exemple de type ERP (*Enterprise Resource Planning*), MES (*Manufacturing Execution System*), WMS (*Warehouse Management System*), PLM (*Product Lifecycle Management*), LIMS (*Laboratory Information Management Systems*) ou SIL (Système d'Information Logistique). Les données de ces systèmes permettent de fournir un contexte de production, de conception, de mesure de qualité, ou un contexte financier, complétant les données dites OT issues de l'atelier.
- Systèmes d'information hors entreprise utiles au Jumeau Numérique. Par exemple, dans le cas du Jumeau Numérique d'un réseau de livraison, il peut s'agir de données cartographiques ou météorologiques, parfois accessibles librement (*open data*).

→ ENTRÉES

- Données issues du bloc **Interface données externes** : par exemple, une demande de pièces de rechange ou de consommables, des données de retour d'expérience pour la conception de nouvelles lignes de production.

SORTIES →

- Données utiles au Jumeau Numérique, transmises au bloc **Interface données externes** : par exemple, des données issues de l'ERP comme les niveaux de stock ou les références des pièces de rechanges demandées, ou bien des données de trafic routier ou aérien et des données météorologiques.



02

EXEMPLES D'APPLICATION DE L'ARCHITECTURE FONCTIONNELLE

Ce chapitre présente cinq exemples de Jumeaux Numériques industriels, ainsi que la façon dont l'architecture fonctionnelle pourrait s'appliquer à chacun d'entre eux :

1 Jumeau Numérique de Bioréacteur

C'est un appareil dans lequel on multiplie des micro-organismes (levures, bactéries, champignons microscopiques, algues, cellules animales et végétales) pour la production de biomasse ou d'un métabolite, ou encore pour la bioconversion d'une molécule d'intérêt.

2 Jumeau Numérique d'une ligne de production

La production cadencée nécessite de synchroniser plusieurs postes de travail afin que chacun d'eux respecte la cadence et que l'ensemble de la ligne puisse avancer à un rythme régulier.

3 Jumeau Numérique d'équipement industriel en opération (machine de planage)

Ces machines sont composées d'un laminoir et d'une ligne de planage sous traction. Elles sont essentielles pour répondre aux contraintes géométriques et physiques des bandes métalliques produites par les professionnels de la sidérurgie.

4 Jumeau Numérique du processus de maintien en conditions opérationnelles (processus de maintenance)

Lors de la phase d'utilisation d'un système, il est intéressant de disposer d'un Jumeau Numérique du processus de maintien en conditions opérationnelles de ce dernier, afin par exemple d'optimiser sa maintenance et toute la chaîne logistique qui la soutient.

5 Jumeau Numérique d'infrastructure de réseau de communication

Son objectif est d'améliorer la conception (*design*), le dimensionnement (*sizing*), la configuration, la surveillance (*monitoring*) et l'optimisation de réseaux de communication (par exemple : un réseau 5G privé ou un réseau IoT) à l'aide de données de topologie, de mesure de trafic et de performance ainsi que de simulations de trafic, d'attaques ou de pannes.

1

Jumeau Numérique de Bioréacteur

CONTEXTE

Un bioréacteur est un appareil dans lequel on multiplie des micro-organismes (levures, bactéries, champignons microscopiques, algues, cellules animales et végétales) pour la production de biomasse ou d'un métabolite, ou encore pour la bioconversion d'une molécule d'intérêt ([source : Wikipedia](#)). Il s'agit d'améliorer la surveillance (*monitoring*) d'expériences réalisées dans les bioréacteurs, de construire des tableaux de bord, lever des alertes et collecter les données d'expériences à des fins d'analyse ultérieure. Les versions les plus simples du Jumeau Numérique ne prévoient pas de rétroaction automatique ou humaine.



ENTITÉ RÉELLE

Un bioréacteur et son logiciel de contrôle.



CONNECTIVITÉ

Serveur de communication (OPC-UA) pour l'accès aux données produites par le logiciel de contrôle (par exemple : oxygène, température, acidité).



PRÉPARATION DES DONNÉES

Habituellement non nécessaire.



MODÈLES NUMÉRIQUES

Les modèles numériques multiphysiques permettent des simulations et des prédictions de l'évolution de la population de micro-organismes (souche cible et altérants) dans un environnement spécifié. Exemple de fonction utilisée : CroissanceDeLaSouche = f(souche, oxygène, pH, température).



INTERFACE UTILISATEUR

Tableau de bord.



TRAITEMENTS AVANCÉS

- Simulations basées sur des modèles: augmentation d'information en appliquant les modèles sur les données collectées, pour obtenir des données abstraites et significatives pour les expérimentateurs (par exemple, coefficient d'impact de la température sur la croissance).
- Génération d'alertes issues de la surveillance du bioréacteur.

2

JUMENT NUMÉRIQUE D'UNE LIGNE DE PRODUCTION

CONTEXTE

La production cadencée nécessite de synchroniser plusieurs postes de travail afin que chacun d'eux respecte la cadence et que l'ensemble de la ligne puisse avancer à un rythme régulier.

Plus l'élément produit est complexe et de taille importante, plus la durée cumulée des temps opératoires peut être longue et le suivi des tâches complexes. Par ailleurs, un assemblage volumineux ne permet pas toujours de suivre d'un coup d'œil l'avancement de la production, certaines opérations affectant une face cachée du produit ou l'intérieur de celui-ci. Le Jumeau Numérique permet alors d'exposer l'avancement d'un assemblage sans contrainte de visibilité.

Au niveau de l'ensemble de la ligne, le Jumeau Numérique permet l'affichage d'informations liées à des zones nécessitant une attention particulière et pouvant notamment affecter la cadence (fermeture de station de travail, poste en attente de pièce, problème qualité signalé, etc...). Il donne ainsi une vue complète de l'état d'avancement de la production et permet de répondre plus rapidement à des imprévus grâce à un mécanisme d'alerte. Dans une version plus avancée, le Jumeau Numérique permet de visualiser des périodes de production passées ou de simuler des productions futures, par exemple pour répondre à un accroissement attendu de la demande.



ENTITÉ RÉELLE

Une ligne de production cadencée, c'est-à-dire un ensemble de stations de travail qui doivent travailler en rythme, incluant équipements industriels et personnel.

CONNECTIVITÉ

Connexion aux équipements de la ligne de production.

PRÉPARATION DES DONNÉES

Traitement des séries temporelles issues des équipements.

TRAITEMENTS AVANCÉS

Simulation de production future, calcul d'ordonnement des ordres de fabrication servant de support à la simulation, détection d'anomalie et maintenance prédictive donnant lieu à des alertes.

INTERFACE UTILISATEUR

Sous des formes multiples :

- Grand écran pour surveiller l'état global de la ligne (tableau de bord).
- Système d'alarme (Andon).
- Application pour smartphone permettant la réception de notifications pour les agents en déplacement.
- Poste PC de consultation.
- Tablette permettant la saisie d'informations sur le poste de travail.

INTERFACES DONNÉES EXTERNES

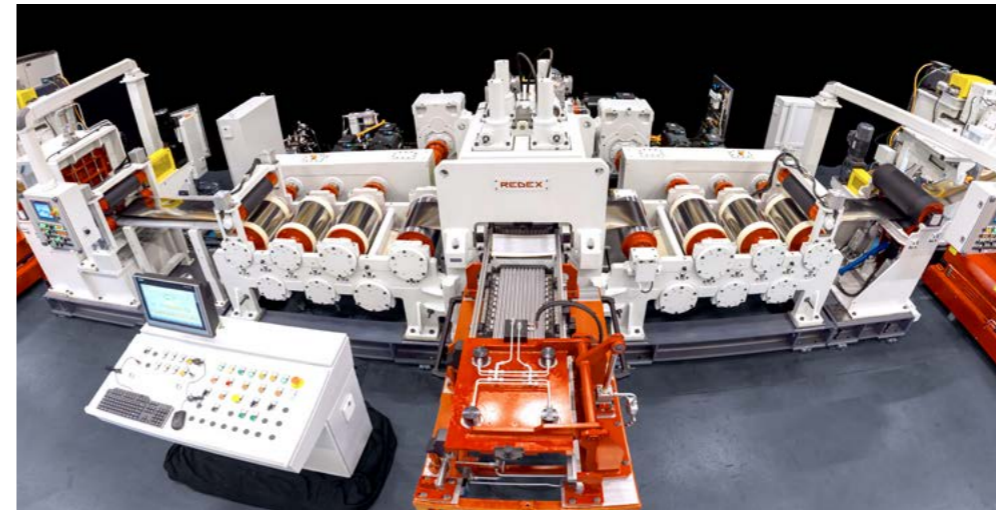
Communication avec le MES, l'ERP, le système qualité, le système de gestion des stocks et tout système pouvant contribuer au suivi de la production.

AUTRES JUMENTS NUMÉRIQUES

Le Jumeau Numérique d'une machine spécifique peut alimenter en données celui de la ligne, par exemple dans un scénario de maintenance prédictive où un arrêt de la ligne est nécessaire.

3

JUMENT NUMÉRIQUE D'ÉQUIPEMENT INDUSTRIEL EN OPÉRATION (MACHINE DE PLANAGE)



CONTEXTE

Les lignes de planage sous traction sont des équipements industriels destinés à corriger la planéité et à stabiliser les caractéristiques géométriques des bandes métalliques issues des procédés de transformation amont, notamment le laminage. Elles jouent un rôle essentiel pour répondre aux exigences géométriques et fonctionnelles des produits métalliques.

Généralement positionnées en aval d'un laminoir, elles permettent de réduire les défauts de planéité, d'homogénéiser le comportement mécanique du matériau et de limiter les contraintes résiduelles.

Dans un contexte industriel marqué par une demande croissante en précision, en épaisseurs toujours plus fines et en intégration de matériaux recyclés, la maîtrise du procédé de planage devient un enjeu majeur pour assurer la performance globale des lignes de production.

Le Jumeau Numérique d'une machine de planage permet alors de superviser l'équipement en temps réel, de le commander à distance, d'analyser son comportement, d'assister les opérations de maintenance et de former les opérateurs en exploitation ou en mise en œuvre virtuelle.

ENTITÉ RÉELLE

Ligne de planage sous traction.

CONNECTIVITÉ

Remontée des données depuis les capteurs, actionneurs, variateurs et moteurs électriques par les automates et transfert vers un PC industriel en bord de ligne. Entre la machine et l'automate, le protocole MODBUS TCP est utilisé et les données sont envoyées dans un système de type « Industrial Edge ». Les mises à jour du Jumeau Numérique sont envoyées par le protocole IP vers l'Industrial Edge.

INTERFACE UTILISATEUR

Elle s'appuie sur de multiples équipements selon les besoins des utilisateurs :

- Une application sur tablette afin de gérer les alertes.
- Un écran en bord de ligne afin d'annoter et de superviser au plus près de la production.
- Un dispositif de réalité augmentée connecté à un système de gestion des procédures pour suivre une opération de maintenance et mieux connaître le mode opératoire de ce type de machine très complexe.

Un tableau de bord « Industrie 4.0 » est disponible pour la supervision générale de la ligne, ainsi que des fonctions d'alerte, de calcul de capacité de production comme le TRS (Taux de Rendement Synthétique), de disponibilité machine, de prévision de maintenance, de réglage et de contrôle prédictifs.

INTERFACES DONNÉES EXTERNES

Une communication est mise en place afin de récupérer les données de systèmes d'information comme l'ERP.

AUTRES JUMENTS NUMÉRIQUES

Les Jumeaux numériques de différentes lignes de planage peuvent communiquer entre eux.

PRÉPARATION DES DONNÉES

Un chiffrement de données de type FHE est intégré sur le protocole TCP/IP.

TRAITEMENTS AVANCÉS

Une IA de contrôle de signal est utilisée afin de détecter les signaux faibles liés à la dégradation des composants, comme les dérives d'alignements d'axes, les déséquilibres de rotation (effets de balourd), les consommations d'huile, ou tout autre problème lié à la machine tournante.

4

JUMEAU NUMÉRIQUE DU PROCESSUS DE MAINTIEN EN CONDITIONS OPÉRATIONNELLES (PROCESSUS DE MAINTENANCE)

CONTEXTE

Lors de la phase d'utilisation d'un système, il est intéressant de disposer d'un Jumeau Numérique du processus de maintien en conditions opérationnelles de ce dernier, afin par exemple d'optimiser sa maintenance et toute la chaîne logistique qui la soutient. Ce Jumeau Numérique du soutien, orienté optimisation de la maintenance, permet d'avoir une bonne visibilité sur les maintenances à prévoir ainsi que la consommation de pièces de rechange et leur chaîne de réapprovisionnement. Il permet également d'optimiser les coûts de maintenance en conditions opérationnelles en regard de critères de performance tels que la disponibilité opérationnelle ou le temps d'indisponibilité du produit. Le Jumeau Numérique permet de remonter des alertes sur des dérives (par exemple : augmentation anormale du nombre de pannes ou augmentation du délai de réapprovisionnement des pièces de rechange) ou sur une utilisation du système inférieure à ce qui était attendu. Grâce à ces informations et après analyse, il est possible de prendre les décisions les plus appropriées pour optimiser les maintenances préventives et la disponibilité opérationnelle du système.



ENTITÉ RÉELLE

Un système complexe tel qu'un avion, un navire ou un train.

CONNECTIVITÉ

Connexion avec les systèmes HUMS (Health and Usage Monitoring Systems) du produit en suivant les recommandations de la spécification S5000F¹.

PRÉPARATION DES DONNÉES

Conversion des différents formats de données issues du produit et de ses capteurs pour les intégrer dans le Jumeau Numérique.

STOCKAGE DES MODÈLES ET DONNÉES

- Arborescence logistique du système et plan de maintenance associé.
- Organisation logistique de la maintenance et de la chaîne d'approvisionnement en pièces de rechange.

TRAITEMENTS AVANCÉS

Simulation de l'ensemble du processus de maintien en conditions opérationnelles, orientée coûts/performance et intégrant en particulier des éléments d'organisation logistique et de maintenance du produit.

INTERFACES DONNÉES EXTERNES

Interface avec les ERPs et les outils de GMAO :

- Connexion avec les outils de GMAO pour remonter les informations de l'entité réelle.
- Connexion avec les ERP pour les commandes de pièces de rechange via le processus S2000M².

INTERFACE UTILISATEUR

Tableau de bord et suivi d'indicateurs :

- Nombre de pannes constatées.
- Nombre de pièces de rechange consommées.
- Consommations à venir.
- Délai de réapprovisionnement des pièces de rechange.
- Disponibilité opérationnelle actuelle et à venir.

5

JUMEAU NUMÉRIQUE D'INFRASTRUCTURE DE RÉSEAU DE COMMUNICATION

CONTEXTE

L'objectif de ce Jumeau Numérique est d'améliorer la conception (*design*), le dimensionnement (*sizing*), la configuration, la surveillance (*monitoring*) et l'optimisation de réseaux de communication (par exemple : un réseau 5G privé ou un réseau IoT) à l'aide de données de topologie, de mesure de trafic et de performance ainsi que de simulations de trafic, d'attaques ou de pannes. Le traitement des données et le couplage avec les documents de configuration, les modèles de topologie de réseau, de suivi et de prévision de trafic, permet de réaliser des tableaux de bord dynamiques, de lever et signaler des alertes, de collecter les données opérationnelles pour des analyses hors-ligne ou des adaptations dynamiques et automatiques (*reconfiguration*). En effet, grâce aux outils de programmation réseau (*software-defined networks*) et aux fonctions réseau virtuelles (VNF), il est possible d'automatiser la reconfiguration des équipements (stations de base, équipements de bordure (edge), terminaux, etc.) et de migrer les tâches de traitement et d'analyse de flux en d'autres points du réseau. Le Jumeau Numérique permet de rendre cette programmation dynamique, robuste et cohérente.

ENTITÉ RÉELLE

Un réseau de communication constitué d'un ensemble d'équipements réseau (terminaux, stations de base, commutateurs, routeurs...) interconnectés par des liens filaires ou non filaires (radio).

TRAITEMENTS AVANCÉS

Les principaux traitements avancés sont relatifs à la détection d'anomalies et la génération d'alertes, à l'aide à la décision de reconfiguration, à l'orchestration des reconfigurations automatiques mais aussi à la simulation à événements discrets³ pour anticiper l'effet des reconfigurations ou des changements de politiques de contrôle de flux. L'apprentissage automatique de la charge et du comportement du réseau est aussi de plus en plus répandu.

CONNECTIVITÉ

La remontée des informations d'état et la transmission des ordres de reconfiguration des équipements réseau se font via le réseau de contrôle des équipements (*out of band*) ou sont intégrées dans les flux du réseau de données lui-même (*in band*).

STOCKAGE DES MODÈLES ET DONNÉES

Parmi les données et les modèles stockés dans le Jumeau Numérique, on trouve différents fichiers selon les cas d'usage (design, opération...). Ainsi, parmi les données possibles, figurent :

- Les séries temporelles brutes (sauvegardées pour archive ou pour la caractérisation du trafic ou la détection d'anomalies en temps réel).
- Des modèles de classification de flux.
- Des inventaires d'équipements.
- Des fichiers de description technique des équipements.
- Des fichiers de configuration.
- La description des topologies.
- Des modèles de simulation à événements discrets.
- Des modèles de trafic.
- Des modèles de propagation radio...

INTERFACE UTILISATEUR

Les utilisateurs du Jumeau Numérique peuvent visualiser les inventaires et les topologies, naviguer dans des tableaux de bord hiérarchiques qui permettent d'afficher les métriques de bas niveau pour surveiller l'état du réseau, de comprendre les alertes et résoudre les incidents et les pannes en temps réel⁴. C'est aussi à partir de cette interface que l'opérateur peut tester des hypothèses (*what-if scenarios*), lancer des simulations et les analyser et lire les recommandations générées avant d'effectuer les actions correctives.

PRÉPARATION DES DONNÉES

Cette entité fonctionnelle est notamment en charge du pré-traitement des séries temporelles pour en extraire des statistiques de performance en termes de débit, de latence, de taux d'erreurs, mais aussi du nombre de flux sur une période de temps. Ce traitement peut être localisé dans les équipements en bordure du réseau (*edge*). Il permet de déterminer des dépassements de seuil et éventuellement de modifier le trafic ou reconfigurer les équipements au plus près de leur source.

¹ « S5000F International specification for in-service data feedback » by AeroSpace and Defence Industries Association of Europe and Aerospace Industries Association of America (AIAA)
² « S2000M International specification for Material Management » by AeroSpace and Defence Industries Association of Europe and Aerospace Industries Association of America (AIAA)

³ Avec des outils comme NS3, OPNET, OMNET++...
⁴ Avec par exemple la plateforme Grafana

NORMES D'ARCHITECTURE DE Jumeaux NUMERIQUES

L'architecture fonctionnelle simple et pragmatique, proposée précédemment, est complémentaire de normes plus détaillées, traitant de l'implémentation et de l'interopérabilité des Jumeaux Numériques. Dans le domaine industriel, deux normes ISO ont vu le jour depuis 2021 ainsi qu'une norme IEC, proposée par l'IDTA (*Industrial Digital Twin Association*) en 2023.

- **La norme ISO/IEC 30173:2023** introduit les concepts et la terminologie associés au Jumeau Numérique. Contrairement à la plupart des études antérieures, cette norme établit une distinction entre le « Jumeau Numérique », un modèle numérique représentation d'une entité cible, et le « Système Jumeau Numérique », fournissant des fonctionnalités pour le Jumeau Numérique. Ce système est composé d'entités cibles interopérables, d'entités numériques, de connexions de données et enfin de modèles, données et interfaces impliqués dans le processus de connexion de données.
- **La norme ISO/IEC 23247-2:2021** définit et propose un cadre pour le Jumeau Numérique des systèmes de production. Elle présente les concepts, les usages, ainsi qu'une architecture fonctionnelle du Jumeau Numérique.
- **La norme IEC 63278-1:2023** définit quant à elle la structure d'une représentation numérique normalisée d'un actif (typiquement un équipement industriel). Cette représentation, appelée *Asset Administration Shell* (AAS), offre un accès uniforme aux informations et aux services de l'équipement. Les spécifications définissent la structure logicielle, l'interface et la sémantique de l'*Asset Administration Shell* et fournissent ainsi un des éléments fondateurs du *Digital Twin* standardisé.

Les normes **ISO/IEC 23247-2:2021** et **IEC 63278-1:2023**, qui sont les plus en relation avec l'architecture fonctionnelle, sont détaillées ci-contre.

3.1

ARCHITECTURE FONCTIONNELLE SELON LA NORME ISO 23247-2:2021

La norme ISO 23247-2:2021 propose une architecture fonctionnelle de référence pour les Jumeaux Numériques, appliquée au domaine de la production industrielle. Cette architecture constitue un cadre normatif visant à structurer l'implémentation des Jumeaux Numériques de manière systématique et interopérable, tout en assurant la cohérence entre le monde physique et sa représentation numérique.

Elle repose sur la définition et l'orchestration d'**Entités Fonctionnelles (EF)** regroupées en couches conçues pour matérialiser les différentes dimensions du cycle de vie, et sur l'exploitation des **Éléments de Manufacturing Observables (EMO)**.

- La couche *Device Communication Entity* est dédiée à l'acquisition des données et à leur pré-traitement, garantissant ainsi une transition fiable entre l'environnement physique et le système numérique. Elle intègre des fonctions de collecte, de filtrage, d'agrégation et de contrôle qui assurent la continuité et la qualité des flux de données en provenance des EMO.

- La couche *Digital Twin Entity* constitue le noyau central de l'architecture. Elle regroupe des EF essentielles telles que la synchronisation entre l'état du système physique et sa réplique numérique, la représentation numérique des propriétés structurelles et comportementales, la simulation prédictive du fonctionnement et l'analyse des données pour extraire de la valeur décisionnelle. Cette entité est également renforcée par une EF de support à l'interopérabilité, permettant une intégration harmonieuse avec les systèmes d'information industriels tels que les ERP, PLM ou MES.
- La couche *User Entity* occupe une place particulière dans cette architecture, en assurant l'interaction directe entre les acteurs humains et le Jumeau Numérique. Elle permet une visualisation intuitive, une supervision efficace et un pilotage interactif des systèmes, contribuant ainsi à une prise de décision éclairée.
- Enfin, les *Cross System Entities* transversales fournissent des services de portée globale à

l'ensemble du système. Elles intègrent notamment la vérification de la qualité et de l'intégrité des données, la sécurité et la confidentialité des communications, ainsi que la traduction et l'harmonisation des protocoles de données afin de favoriser une interopérabilité élargie au sein d'écosystèmes hétérogènes.

Cette architecture fonctionnelle normalisée dépasse le simple rôle de description technique : elle propose un cadre méthodologique et conceptuel facilitant le déploiement des Jumeaux Numériques dans des environnements industriels complexes. En intégrant la surveillance en continu, la mise à jour dynamique des données, la simulation prospective et l'analyse avancée, elle soutient des objectifs stratégiques tels que le contrôle en temps réel, la maintenance prédictive et l'optimisation des processus industriels.

On retrouve dans cette norme des éléments architecturaux comparables aux blocs de l'architecture fonctionnelle proposée dans ce document.

3.2

LA NORME IEC 63278-1:2023

La norme IEC 63278-1:2023 définit le concept d'*Asset Administration Shell* (AAS). Elle est portée par l'IDTA (*Industrial Digital Twin Association*), un consortium d'industriels et d'universitaires dont l'objectif est de promouvoir l'industrie 4.0 par la rédaction de standards industriels.

L'AAS sert de modèle standardisé d'un artefact (appelé «actif»), qu'il soit matériel (comme une machine) ou immatériel (comme un logiciel, ou un Jumeau Numérique). Cette représentation numérique normalisée des actifs, joue un rôle crucial dans l'amélioration des caractéristiques de performance des systèmes basés sur les technologies de l'information et de la

communication. Selon la norme IEC 63278-1:2023, la structure AAS permet un accès uniforme aux informations et aux services et un échange d'informations fiable et sécurisé. L'AAS contribue à la réalisation des principes du référentiel RAMI⁵, un modèle d'architecture pour l'Industrie 4.0, en fournissant une spécification standardisée des actifs industriels avec des interfaces et des fonctionnalités.

Ainsi, l'AAS a deux objectifs principaux. D'une part, il offre un modèle d'information complet, capturant les données statiques et dynamiques relatives aux actifs tout au long de leur cycle de vie, depuis la conception et la fabrication jusqu'à l'exploitation et la

maintenance. D'autre part, il permet l'interopérabilité entre les différents systèmes et plateformes en fournissant une structure standardisée pour l'échange de données et d'informations. Pour cette raison particulière, il est intéressant pour l'industrie 4.0 et est aujourd'hui utilisé comme élément clé du Jumeau Numérique.

Cette norme propose ainsi un modèle d'information rigoureux pour les interfaces et les échanges entre les éléments fonctionnels du schéma d'architecture proposé dans ce document.

⁵ https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/a2-schweichhart-reference_architectural_model_industrie_4_0_rami_4_0.pdf

CADRE DE MISE EN ŒUVRE DE L'ARCHITECTURE FONCTIONNELLE

Ce chapitre présente différentes considérations de mise en œuvre du Jumeau Numérique, et notamment la question de la convergence IT/OT. Il recense également les spécificités des projets Jumeau Numérique.

4.1 | MÉTHODOLOGIE DE MISE EN ŒUVRE

4.1.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

La conception, le développement, le déploiement et l'exploitation d'un Jumeau Numérique est un processus complexe qui demande une méthode rigoureuse. Celle-ci pourra suivre un processus classique d'[ingénierie logicielle](#)⁶, à savoir :

Analyse des exigences pour comprendre le problème à résoudre en recueillant, analysant, modélisant, spécifiant, validant et gérant les besoins des différentes parties prenantes. Les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles seront prises en compte.

L'existant pourra aussi être inventorié pour être intégré au projet. Le tableau périodique des capacités proposé par le *Digital Twin Consortium* (DTC) peut être utilisé pour alimenter le recueil des exigences (voir tableau périodique du DTC ci-après).

Conception de l'architecture fonctionnelle pour décomposer le système en composants logiciels majeurs et définir leurs responsabilités, interfaces et interactions. L'architecture fonctionnelle (ou conceptuelle) donne une vue d'ensemble du système à construire. C'est lors de cette étape que le modèle d'architecture fonctionnelle proposé ici pourra être utilisé.

Le tableau périodique des capacités proposé par le DTC pourra être utile pour vérifier ensuite la couverture fonctionnelle.

Conception de l'architecture logique pour définir les composants de manière détaillée : les classes, les structures de données, les interfaces, les algorithmes et autres spécificités de plus bas niveau. L'architecture logique ainsi détaillée reste indépendante de la technologie et montre comment le système fonctionne. Elle précise les briques de base, les flux de données et les interactions, éventuellement le placement des composants logiciels pour répondre aux exigences.

Implémentation logicielle / architecture technique pour transformer l'architecture logique en code exécutable avec ses structures de données associées. Les normes et directives de codage sont respectées pour implémenter les composants qui répondent aux exigences spécifiées.

Les autres étapes à prendre en compte lors de l'implémentation sont les tests logiciels, le déploiement, la maintenance, la gestion de la configuration et de la qualité logicielle.

4.1.2 LE TABLEAU PÉRIODIQUE DU DIGITAL TWIN CONSORTIUM

DESCRIPTION

Le *Digital Twin Consortium Capabilities Periodic Table (DTC-CPT)*, ou tableau périodique du Consortium du Jumeau Numérique, est un cadre méthodologique, publié initialement en mars 2022, puis mis à jour régulièrement. Il vise à soutenir l'identification et la gestion des exigences de capacité pour les Jumeaux Numériques, de manière indépendante de toute architecture ou technologie spécifique. Son objectif principal est de permettre aux organisations de concevoir, déployer et faire évoluer leurs Jumeaux Numériques en se fondant sur les besoins des cas d'usage, plutôt que sur des solutions technologiques prédéfinies.

Le DTC-CPT facilite la collaboration entre les parties prenantes en aidant à expliciter les exigences dans des contextes multidisciplinaires, tout en offrant un langage commun et visuel, accessible à toutes les parties prenantes. Il agit comme un guide, aussi bien pour initier des démarches que pour faire progresser la maturité des projets de Jumeaux Numériques.

Le DTC-CPT est structuré autour de six grandes catégories de capacités :

- *Data Services (DS)*
- *Integration (IR)*
- *Intelligence (IC)*
- *User Experience (UX)*
- *Management (MN)*
- *Trustworthiness (TW)*

Chaque catégorie regroupe des capacités aux propriétés similaires, couvrant aussi bien la gestion des données, l'intégration des systèmes, l'analyse intelligente, l'expérience utilisateur, la gestion de l'écosystème que les aspects de fiabilité et de sécurité.

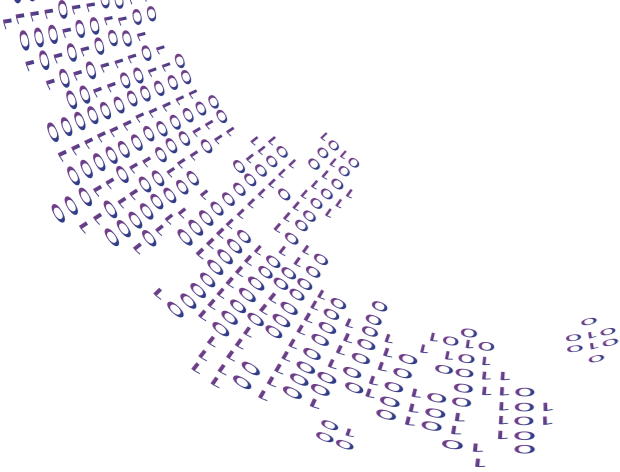
La version 1.2 du DTC-CPT contient 61 capacités, chacune définie par une catégorie, un identifiant unique, un nom, une description fonctionnelle et une finalité. Ces capacités peuvent être décomposées en niveaux de détail plus fins (Niveau 2 voire Niveau 3) pour s'adapter à la complexité et aux spécificités des cas d'usage.

Dans le cadre du processus d'ingénierie d'un système complexe, le DTC-CPT s'avère particulièrement précieux lors de la phase de recueil des exigences. Cette phase, souvent délicate, vise à capter et formaliser les besoins des parties prenantes pour les traduire en exigences techniques précises.

Le DTC-CPT contribue activement à cette démarche en facilitant la collaboration entre les acteurs impliqués, grâce à sa lisibilité et sa capacité à servir de support visuel.



⁶ <https://www.computer.org/education/bodies-of-knowledge/software-engineering/v4>



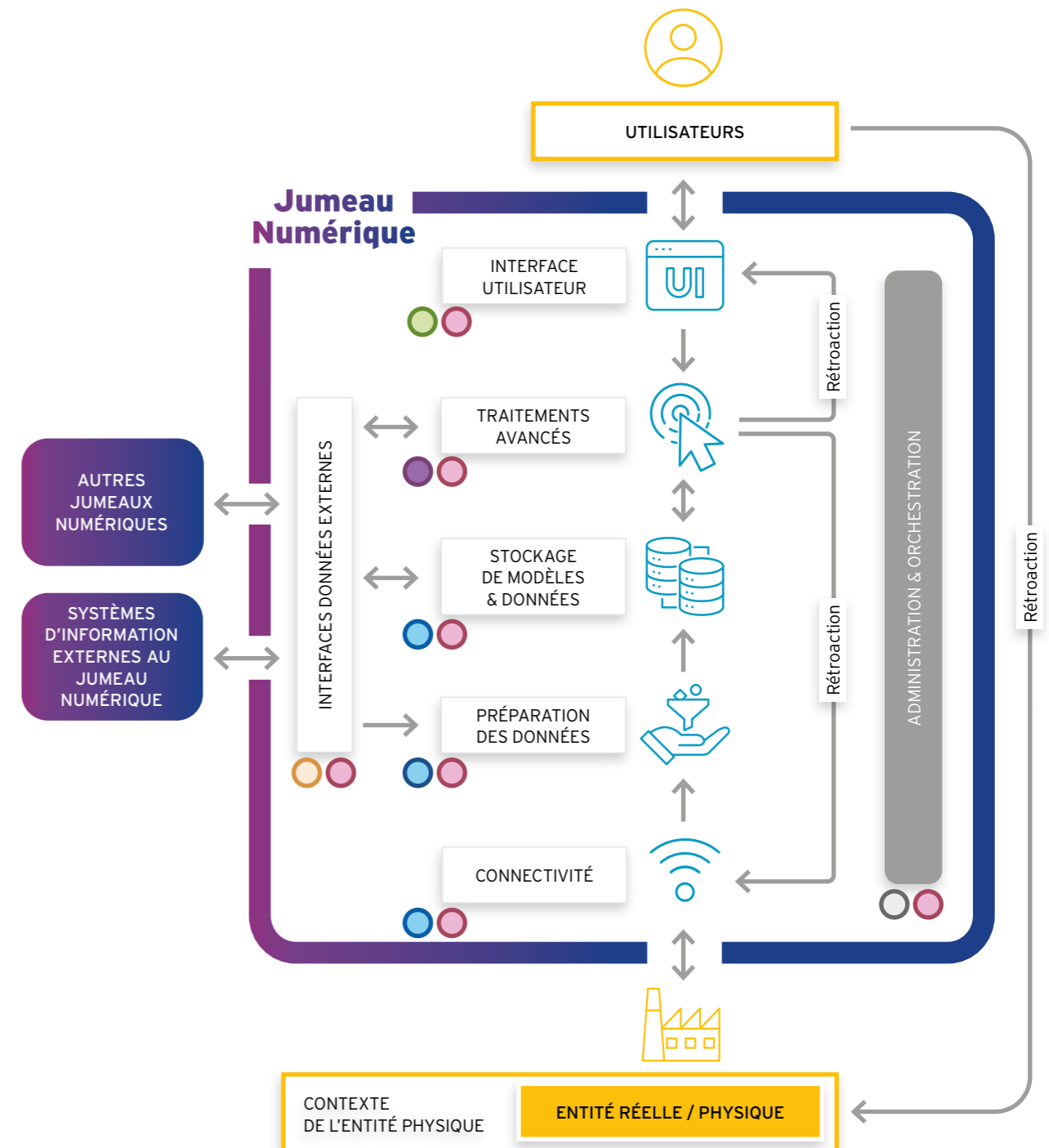
Le tableau périodique du DTC

Version 1.2

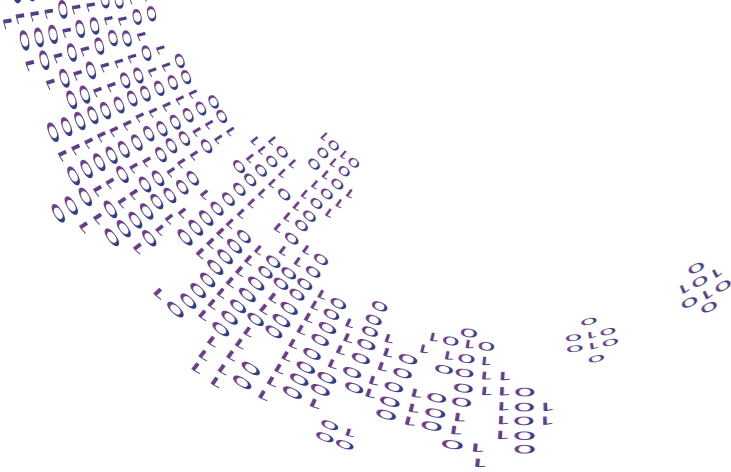
DS.AR AI Model Repository	DS.AG Data Aggregation	IR.AS API Srvices				UX.GM Gamification	UX.DB Dashboards
DS.SR Simulation Model Repository	DS.AS Asynchronous Integration	IR.CL Collaboration Platform Integration	IC.CS Composition	IC.SM Simulation	IC.RP Reporting	UX.3R 3D Rendering	UX.XR Extended Reality (XR)
DS.SA Data Storage and Archive Services	DS.RT Real-time Processing	IR.DT Digital Twin Integration	IC.DL Distributed Ledger and Smart Contracts	IC.FL Federated Learning	IC.AL Alerts and Notifications	UX.GE Gaming Engine Visualization	UX.ER Entity Relationship Visualization
DS.DS Domain Specific Data Management	DS.BP Batch Processing	IR.IO OT/IoT System Integration	IC.BR Business Rules	IC.AI Artificial Intelligence	IC.OS Orchestration	UX.BP Business Process Mgmt & Workflow	UX.RM Real-time Monitoring
DS.IR Digital Twin Instance Repository	DS.CX Data Contextualization	IR.EG Engineering Systems Integration	IC.PS Prescriptive Recommendations	IC.PR Prediction	IC.IC Command and Control	UX.BI Business Intelligence	UX.AV Advanced Visualization
DS.RP Digital Twin Model Repository	DS.TR Data Transformation and Wrangling	IR.ET Enterprise System Integration	IC.MA Mathematical Analytics	IC.AA Data Analysis and Analytics	IC.SR Search	UX.CI Continuous Intelligence	UX.BV Basic Visualization
DS.ON Ontology Management	DS.ST Data Streaming	MG.DG Data Governance	MG.SM System Monitoring	TW.RP Responsibility	TW.RL Reliability	TW.PR Privacy	TW.DS Device Security
DS.SG Synthetic Data Generation	DS.AI Data Acquisition and Ingestion	MG.EL Event Logging	MG.DM Device Management	TW.RS Resilience	TW.SF Safety	TW.SC Security	TW.EX Data Encryption

● Data Services
 ● Integration
 ● Intelligence
 ● User Experience
 ● Management
 ● Trustworthiness

Le schéma ci-dessous illustre comment les blocs de l'architecture fonctionnelle proposée dans ce document peuvent être mis en relation avec les catégories du DTC-CPT.



Bloc fonctionnel du Jumeau Numérique
 Gouvernance du Jumeau Numérique
 Entité numérique externe
● Data Services ● User Experience
● Integration ● Management
● Intelligence ● Trustworthiness



4.2

DU JUMEAU NUMÉRIQUE À LA CONTINUITÉ NUMÉRIQUE

La mise en œuvre d'un Jumeau Numérique permet d'assurer la continuité numérique en rapprochant le monde IT de celui de l'OT. Différents aspects de la convergence IT/OT et de la continuité numérique sont développés ci-dessous.

APPLICATION DU DTC-CPT À L'EXEMPLE DU MAINTIEN EN CONDITIONS OPÉRATIONNELLES

Afin d'illustrer la compatibilité entre l'architecture fonctionnelle et le tableau périodique du *Digital Twin Consortium* (DTC), voici son application sur l'exemple de maintien en conditions opérationnelles décrit en page 28. Pour cet exemple, les capacités qui ne sont pas utilisées ont un fond blanc sur la figure ci-dessus.

DS.AR AI Model Repository	DS.AG Data Aggregation	IR.AS API Srvices				UX.GM Gamification	UX.DB Dashboards
DS.SR Simulation Model Repository	DS.AS Asynchronous Integration	IR.CL Collaboration Platform Integration	IC.CS Composition	IC.SM Simulation	IC.RP Reporting	UX.3R 3D Rendering	UX.XR Extended Reality (XR)
DS.SA Data Storage and Archive Services	DS.RT Real-time Processing	IR.DT Digital Twin Integration	IC.DL Distributed Ledger and Smart Contracts	IC.FL Federated Learning	IC.AL Alerts and Notifications	UX.GE Gaming Engine Visualization	UX.ER Entity Relationship Visualization
DS.DS Domain Specific Data Management	DS.BP Batch Processing	IR.IO OT/IoT System Integration	IC.BR Business Rules	IC.AI Artificial Intelligence	IC.OS Orchestration	UX.BP Business Process Mgmt & Workflow	UX.RM Real-time Monitoring
DS.IR Digital Twin Instance Repository	DS.CX Data Contextualization	IR.EG Engineering Systems Integration	IC.PS Prescriptive Recommendations	IC.PR Prediction	IC.IC Command and Control	UX.BI Business Intelligence	UX.AV Advanced Visualization
DS.RP Digital Twin Model Repository	DS.TR Data Transformation and Wrangling	IR.ET Enterprise System Integration	IC.MA Mathematical Analytics	IC.AA Data Analysis and Analytics	IC.SR Search	UX.CI Continuous Intelligence	UX.BV Basic Visualization
DS.ON Ontology Management	DS.ST Data Streaming	MG.DG Data Governance	MG.SM System Monitoring	TW.RP Responsibility	TW.RL Reliability	TW.PR Privacy	TW.DS Device Security
DS.SG Synthetic Data Generation	DS.AI Data Acquisition and Ingestion	MG.EL Event Logging	MG.DM Device Management	TW.RS Resilience	TW.SF Safety	TW.SC Security	TW.EX Data Encryption

● Data Services
 ● Integration
 ● Intelligence
 ● User Experience
 ● Management
 ● Trustworthiness

4.2.1 PROBLÉMATIQUE ET NÉCESSITÉ DE LA CONVERGENCE IT/OT

La convergence des **technologies de l'information (IT)** et des **technologies opérationnelles (OT)** s'impose aujourd'hui comme une nécessité incontournable pour toute organisation industrielle aspirant à la compétitivité et à l'innovation. Loin d'être un simple rapprochement technique, cette fusion redéfinit la chaîne de valeur de la donnée, en créant un lien entre le monde physique des équipements et le monde virtuel des systèmes d'information. La convergence IT/OT matérialise le lien réel-virtuel, du composant hardware jusqu'au système d'information, et transforme la donnée brute en facteur de décision.

- **Innovation et nouveaux services:** Développement de nouveaux services basés sur la donnée, comme la personnalisation de produits, la maintenance à distance ou encore des modèles économiques basés sur l'usage (*pay-per-use*).

Dans ce contexte, la **cybersécurité** devient un enjeu majeur, car l'interconnexion de systèmes autrefois isolés les expose aux menaces du monde informatique.

LE LIEN RÉEL-VIRTUEL : DU HARDWARE AU SYSTÈME D'INFORMATION

La convergence IT/OT matérialise le concept de lien réel-virtuel, dont le Jumeau Numérique est l'incarnation la plus aboutie. Ce lien se construit à tous les niveaux de l'organisation :

- **Le composant hardware (réel) :** Tout part du capteur, de l'automate ou de l'actionneur intégré à l'équipement physique. Ces composants de l'OT collectent des données brutes sur l'état et le fonctionnement de la machine (température, pression, vibration, etc.).
- **La connectivité (le pont ou EDGE) :** Des protocoles de communication industriels (OPC-UA, MQTT, etc.) et des infrastructures réseau sécurisées permettent de faire remonter ces données des équipements OT vers les systèmes IT (plateforme IoT). C'est le pont qui connecte le monde physique au monde numérique.
- **Le Jumeau Numérique (virtuel) :** Les données collectées alimentent en temps réel un modèle virtuel de l'équipement, de la ligne de production, voire de l'usine entière. Ce Jumeau Numérique n'est pas une simple maquette 3D, il est une réplique dynamique qui évolue au même rythme que son homologue réel.
- **Le système d'information (stratégique) :** Le Jumeau Numérique et les données qu'il génère sont intégrés au système d'information de l'entreprise (ERP, MES, PLM, etc.). Ils fournissent une information contextualisée et enrichie qui vient nourrir les processus de décision à tous les niveaux, de la planification de la production à la stratégie d'investissement.

LA PROBLÉMATIQUE : DEUX MONDES HISTORIQUEMENT SÉPARÉS

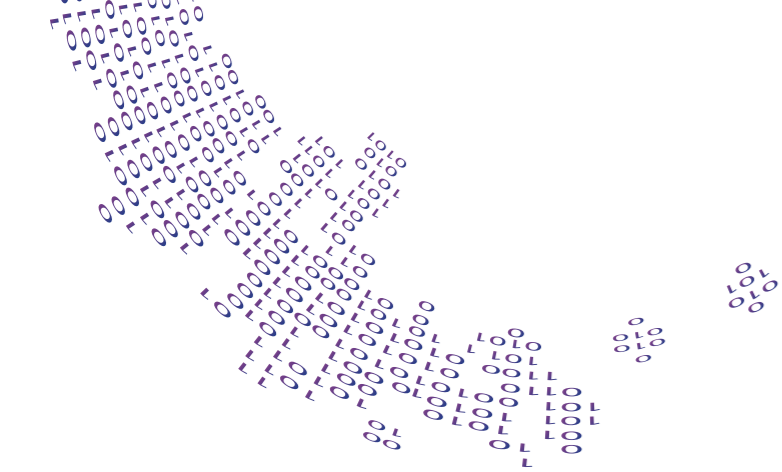
Historiquement, l'IT et l'OT ont évolué en parallèle, avec des objectifs et des technologies distincts. D'un côté, l'IT, univers des données, des applications et de la connectivité, est axé sur la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité de l'information. De l'autre, l'OT, monde des machines, des automates et des capteurs, privilégie la sécurité des biens et des personnes, la disponibilité et la performance des équipements de production.

Cette séparation a engendré des silos de données, limitant la visibilité globale des opérations et freinant l'optimisation des processus. Les données de production (OT) restaient souvent confinées au niveau de l'atelier, tandis que les systèmes de gestion d'entreprise (IT) manquaient d'informations en temps réel pour piloter efficacement l'activité.

VERS UNE VISION UNIFIÉE ET INTELLIGENTE

La transformation numérique et l'avènement de l'Industrie 4.0 rendent cette séparation obsolète. La nécessité de la convergence IT/OT découle de plusieurs impératifs stratégiques :

- **Visibilité et contrôle en temps réel:** Les entreprises veulent une vue à 360° de leurs opérations. Cette visibilité permet un pilotage plus réactif, une identification précoce des anomalies et une prise de décision agile face aux aléas de la production ou aux fluctuations du marché.
- **Optimisation et performance:** L'analyse croisée des données de production et des données de gestion ouvre la voie à des optimisations jusqu'alors impossibles : maintenance prédictive, amélioration du rendement synthétique (TRS), optimisation des consommations énergétiques, gestion fine de la chaîne logistique, etc.



LA CHAÎNE DE DONNÉES: DE LA DONNÉE À LA DÉCISION (DIKW)

La convergence IT/OT donne toute son ampleur à la chaîne de valeur de la donnée, que l'on peut illustrer par la pyramide DIKW (*Data, Information, Knowledge, Wisdom*), un modèle conceptuel qui décrit la transformation de la donnée brute en sagesse décisionnelle. Prenons l'exemple concret d'un moteur sur une chaîne de production :

- **Data** (Donnée) : Un capteur de vibration sur le moteur enregistre une valeur brute : « 1,2 mm/s ». Cette donnée, isolée, n'a que peu de signification.
- **Information** : En la contextualisant (moteur X sur la ligne Y, fonctionnant à telle vitesse) et en la comparant aux mesures précédentes, cette donnée devient une information : « L'amplitude des vibrations du moteur X a augmenté de 20 % en 24 heures ».
- **Knowledge** (Connaissance) : En croisant cette information avec la base de connaissances de maintenance (historique des pannes, manuels techniques) et les données d'autres capteurs

(température, consommation électrique), on acquiert une connaissance : « Une augmentation de 20 % des vibrations sur ce type de moteur, corrélée à une légère hausse de la température, indique une usure probable du roulement principal avec 85 % de certitude ». Le système peut alors automatiquement générer un ordre de travail pour une inspection.

- **Wisdom** (Décision) : À un niveau stratégique, l'analyse agrégée de ces connaissances sur l'ensemble du parc de moteurs permet d'atteindre la « sagesse ». Par exemple, la direction peut décider d'investir dans un nouveau type de roulement plus résistant pour tous les moteurs similaires, ou de modifier les plans de maintenance préventive pour optimiser les coûts et la disponibilité des équipements à long terme. Cette décision est le fruit d'une compréhension profonde des phénomènes, de leurs implications et des actions optimales à mener.

Ce qu'il faut retenir :

La convergence IT/OT n'est pas une simple évolution technologique, mais une véritable révolution organisationnelle et stratégique. En créant un flux de données continu et intelligent entre le monde physique et le monde virtuel, elle permet de transformer le potentiel immense des données industrielles en un avantage concurrentiel durable. Le Jumeau Numérique est le système technique mettant en œuvre cette convergence.



4.2.2 VALORISATION DE LA CHAÎNE DE DONNÉES

Des volumes importants de données numériques sont générés aussi bien lors de l'exploitation des systèmes (avec des technologies telles que l'IT/OT - cf. section précédente) que durant leur conception (modèles et documents). Ces éléments sont perçus par les parties prenantes comme données, informations, connaissances ou sagesse (DIKW).

Pour rester exploitables par le Jumeau Numérique, les DIKW doivent être organisées, cohérentes, pertinentes et traçables tout au long du cycle de vie. Elles doivent également être partagées afin de supporter la prise de décision. Cependant, les parties prenantes n'utilisent pas nécessairement les mêmes outils, langages et pratiques de modélisation. Ces problématiques d'interopérabilité font classiquement l'objet de trois types d'approches :

- **Intégration** : tout est conçu pour être nativement interopérable.
- **Unification** : des blocs permettant la conversion sont mis en place.
- **Fédération** : combinaison et échange d'éléments à volonté et à n'importe quel moment.

Les approches d'interopérabilité intégrée et unifiée ne sont pas suffisantes car elles impliquent un traitement au cas par cas de données massives, hétérogènes et en évolution. Seule une approche fédérée semble pertinente pour assurer la cohérence globale du [Jumeau Numérique](#)⁷.

4.2.3 COMPOSITION DE JUMEUX NUMÉRIQUES

À mesure que le nombre de Jumeaux Numériques augmente et que leur diversité s'accroît, leur coordination devient un sujet d'importance. Leur interconnexion doit donc être envisagée lors de leur conception.

Le simple déploiement de plusieurs Jumeaux Numériques ne garantit ni l'efficacité, ni la cohérence, ni la résilience globale. La multiplication des Jumeaux Numériques s'accompagne d'une complexité croissante de leurs interactions. Ainsi, les informations remontées peuvent ne plus être alignées et des comportements émergents venir impacter la prise de décision. L'émergence désigne des comportements qui ne sont pas directement liés au comportement d'un seul sous-ensemble, mais découlent de leurs interactions. Des changements mineurs dans un seul constituant peuvent se répercuter en cascade et produire des résultats disproportionnés. Ces effets émergents sont difficiles à simuler, et par conséquent difficiles à prévoir.

Par ailleurs, le pilotage d'un système de Jumeaux Numériques implique non seulement la gestion des

opérations courantes, mais aussi une adaptation continue à l'évolution des configurations, des missions et des technologies au fil du temps. La complexité s'accroît avec des Jumeaux Numériques ayant de longs cycles de vie, qui évoluent indépendamment et à des rythmes différents. Pour surmonter ces limites, des recherches récentes suggèrent la composition, la fédération ou l'imbrication de Jumeaux Numériques, bien connue de [l'Ingénierie Dirigée par les Modèles](#)⁸.

Par ailleurs, concilier une prise de décision décentralisée avec la réalisation d'objectifs systémiques peut s'avérer complexe. En raison de l'indépendance managériale et opérationnelle des Jumeaux Numériques, ces derniers poursuivent souvent des objectifs locaux qui peuvent entrer en conflit avec les priorités globales.

Le pilotage de systèmes de Jumeaux Numériques doit donc gérer des composants locaux, mais aussi anticiper et réagir aux effets inattendus à l'échelle du système, et gérer son évolution dans le temps.

4.3 | SPÉCIFICITÉS DES PROJETS JUMEAU NUMÉRIQUE

Les projets de développement et déploiement de Jumeau Numérique présentent des particularités qui sont décrites dans ce chapitre.

4.3.1 UN ÉQUILIBRE ENTRE RIGUEUR ET AGILITÉ DANS LA GOUVERNANCE ET LA GESTION DE PROJET

La réussite d'un projet de Jumeau Numérique repose sur une **gouvernance robuste** et une **gestion de projet incrémentale**.

La définition claire des objectifs, le dimensionnement adapté aux usages et la validation rigoureuse des modèles et des données sont des étapes critiques. L'intégration du Jumeau Numérique dans le cycle industriel nécessite une réorganisation centrée sur la donnée, où la répétabilité, la traçabilité et la certification deviennent des piliers. La conduite du changement est également essentielle : elle implique une montée en compétences des équipes, une appropriation des outils

par les utilisateurs finaux, et une gestion proactive des aspects juridiques, notamment en matière de propriété intellectuelle et de protection des données (RGPD, AI Act).

L'incrémentalité de la démarche permet de limiter les risques et d'adapter le Jumeau Numérique aux évolutions technologiques et organisationnelles. Une approche progressive, combinée à une analyse de cycle de vie systématique, garantit la durabilité et la pertinence du système, tout en optimisant les coûts et les ressources.

4.3.2 VERS UNE INDUSTRIE INCLUSIVE ET RESPONSABLE

L'adoption des Jumeaux Numériques soulève des **défis organisationnels** majeurs. L'acceptabilité des outils, leur intégration dans les processus existants, et la formation des équipes sont des facteurs clés de succès. La confiance dans les outils d'exploitation avancés, notamment ceux intégrant de l'Intelligence Artificielle (IA), est un enjeu central. Les utilisateurs doivent être convaincus de la fiabilité des prédictions, des recommandations et des automatismes proposés par le Jumeau Numérique, tout en restant maîtres des décisions critiques.

Sur le plan sociétal, les Jumeaux Numériques doivent être conçus pour être inclusifs, accessibles à tous les niveaux de l'organisation, et **respectueux des règles éthiques et juridiques**. La protection des données personnelles, la transparence des algorithmes, et la responsabilité des acteurs sont des impératifs. Une vision souveraine de la donnée arrive peu à peu dans les projets, notamment liée à la cybersécurité et aux enjeux géopolitiques.

⁷ C. Gregory, S. Rabah, V. Chapurlat, F. Burčiar, M. Herchlová (2026) « Leveraging model-based systems and software engineering for digital twin engineering : Methods and digital Thread opportunities », Journal of Industrial Information Integration, 50, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.101023>

⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Ing%C3%A9nierie_dirig%C3%A9e_par_les_mod%C3%ABles

4.3.3 UN IMPÉRATIF DE DURABILITÉ ENVIRONNEMENTALE À INTÉGRER DÈS LA CONCEPTION

L'impact environnemental des Jumeaux Numériques ne peut être ignoré. Leur infrastructure logicielle et matérielle, ainsi que leur couplage avec les systèmes physiques, doivent être optimisés pour minimiser cet impact (empreinte carbone, consommation d'eau...). Cela passe par :

- **Un dimensionnement précis**, évitant le stockage de données inutiles ou la surconsommation de ressources.
- **De bonnes pratiques de développement**, incluant des mises à jour régulières et une maintenance proactive pour prolonger la durée de vie du Jumeau Numérique.

4.3.4 UN INVESTISSEMENT STRATÉGIQUE POUR L'INDUSTRIE

Les considérations économiques associées aux Jumeaux Numériques sont doubles : elles concernent à la fois les coûts de développement et de maintenance, et les gains générés par leur exploitation.

Pour les PME et les grands groupes, l'enjeu est de maximiser le retour sur investissement en :

- **Ciblant les fonctionnalités essentielles**, évitant ainsi les développements superflus qui alourdissent le système sans valeur ajoutée.
- **Exploitant les données** pour créer de nouveaux modèles économiques, comme **l'économie de la fonctionnalité**, dans laquelle le produit est loué ou intégré dans un service, plutôt qu'acheté.

4.3.5 L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, ACCÉLÉRATEUR DE VALEUR POUR LES JUMEAUX NUMÉRIQUES

L'Intelligence Artificielle (IA) représente une opportunité majeure pour amplifier la valeur des Jumeaux Numériques. En intégrant des algorithmes d'apprentissage automatique, de vision par ordinateur, ou de traitement du langage naturel, les Jumeaux Numériques deviennent capables de :

- **Détecter des anomalies, prédire des pannes**, optimiser des processus en s'appuyant sur l'analyse de volumes massifs de données en temps réel.
- **Automatiser des tâches complexes**, comme la génération de scénarios de maintenance prédictive ou l'optimisation dynamique des flux de production.

- **Une analyse systématique des impacts environnementaux**, intégrée dès la phase de conception et tout au long du cycle de vie du système.

Les Jumeaux Numériques, en permettant une meilleure maîtrise des processus industriels, peuvent contribuer à réduire les déchets, optimiser les consommations énergétiques, et améliorer l'efficacité globale des systèmes physiques⁹. Ils deviennent ainsi des alliés de la transition écologique, à condition d'être conçus et exploités de manière responsable.

- **Intégrant les évolutions technologiques** pour garantir la pérennité et l'évolutivité du Jumeau Numérique

Les Jumeaux Numériques offrent des avantages compétitifs majeurs : réduction des coûts et des délais, amélioration de la qualité et création de nouveaux services à valeur ajoutée. Ils permettent également de **simuler et valider des innovations** avant leur déploiement, réduisant ainsi les risques et accélérant la mise sur le marché.

- **Personnaliser les interactions** avec les utilisateurs, en fournissant des recommandations contextuelles et des visualisations adaptées à leurs besoins.

L'IA permet ainsi de transformer les Jumeaux Numériques en systèmes autonomes et proactifs, capables d'anticiper les besoins et de s'adapter en continu aux évolutions de leur environnement. Cependant, son intégration doit être réfléchie et maîtrisée, pour garantir la transparence, la fiabilité et l'éthique de décisions potentiellement automatisées.

CONCLUSION

Ce document a proposé une architecture fonctionnelle pour le Jumeau Numérique, à destination d'acteurs industriels. L'architecture décrite comporte cinq blocs, organisés en couches, correspondant aux principales fonctionnalités du Jumeau Numérique.

Ces fonctionnalités permettent de récupérer les données de l'entité réelle et de :

- Les préparer
- Les stocker
- Les traiter
- Les présenter à l'utilisateur

L'architecture est complétée par un bloc d'administration et d'orchestration et un autre bloc en charge de la connexion avec les systèmes externes.

L'utilisation de ce modèle d'architecture a ensuite été illustrée par cinq exemples industriels :

- Ligne de production
- Équipement industriel
- Bioréacteur
- Processus de maintenance
- Infrastructure de réseau de communication)

Cette architecture a ensuite été mise en perspective avec deux des normes relatives au Jumeau Numérique : ISO/IEC 23247-2:2021 et IEC 63278-1:2023.

Pour compléter l'architecture proposée et guider les lecteurs vers l'implémentation, les spécificités de la mise en œuvre d'un projet Jumeau Numérique ont été décrites, avec notamment la problématique de la convergence IT/OT, la question de l'apport de l'IA et les impératifs de prise en considération de l'humain et de l'impact environnemental.

PERSPECTIVES

La mise en œuvre d'un Jumeau Numérique dans un contexte industriel ne se limite pas à une simple transposition numérique d'un système physique.

Elle représente une transformation profonde des processus, des organisations et des modèles économiques et doit prendre en compte des enjeux sociétaux, environnementaux et juridiques. À travers les différentes phases de son cycle de vie – de la conception à l'industrialisation, en passant par le déploiement, la maintenance et le retrait – le Jumeau Numérique s'impose comme un **levier stratégique** pour l'industrie du futur.

Les Jumeaux Numériques, enrichis par l'IA, pourraient ouvrir la voie à une **industrie plus intelligente, plus agile et plus durable**. Leur succès dépendra de la capacité des organisations à :

- **Concilier innovation technologique et responsabilité sociétale**
- **Former et accompagner les équipes** pour qu'elles deviennent des acteurs clés de cette transformation
- **Intégrer les enjeux environnementaux et économiques** dès la conception des systèmes
- **Organiser le développement autour des principes du génie logiciel** pour assurer l'évolutivité et l'interopérabilité

En relevant ces défis, les Jumeaux Numériques deviendront bien plus qu'un outil technologique : ils seront le fondement d'**une nouvelle ère industrielle, où l'humain, la donnée et la durabilité convergent** pour créer de la valeur partagée.

⁹ Voir à ce sujet la précédente brochure : [Jumeau Numérique : un levier de réduction des impacts environnementaux de l'industrie ?](#)



ANNEXES

Glossaire

Il recense les principaux acronymes utilisés dans ce document. Chaque entrée comporte la signification de l'acronyme, une courte définition et un lien vers une page Wikipedia.

SIGNIFICATION	DÉFINITION	WIKIPEDIA
API : Application Programming Interface ou interface de programmation d'application	Ensemble normalisé de classes, de méthodes, de fonctions et de constantes qui sert de façade par laquelle un logiciel offre des services à d'autres logiciels.	
IHM : Interface Homme-Machine	Couche logicielle permettant le dialogue entre un logiciel et une personne.	
ERP : Enterprise Resource Planning ou PGI (Progiciel de Gestion Intégré)	Système d'information unifié pour la gestion et l'intégration de l'ensemble des processus d'une entreprise.	
GMAO : Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur	Logiciel de gestion et d'optimisation de la maintenance d'un parc d'équipements.	
IT : Information Technology ou Technologies de l'information	Technologies relatives au traitement, à la sécurisation et à l'échange de données, complémentaires des technologies OT.	
KPI : Key Performance Indicator ou ICP (indicateur clé de performance)	Mesure d'évaluation de la performance d'une entreprise, d'une organisation, d'un projet ou d'un processus spécifique.	

SIGNIFICATION	DÉFINITION	WIKIPEDIA
LIMS : Laboratory Information Management System	Logiciel de gestion intégré et spécialisé assurant les principaux processus d'un laboratoire.	
MES : Manufacturing Execution System	Système temps réel de collecte d'informations et de pilotage des opérations de production.	
OT : Operational Technology ou technologie d'exploitation	Composants matériels ou logiciels permettant la surveillance ou le contrôle direct d'équipements, d'actifs, de processus industriels.	
PLM : Product Lifecycle Management	Ensemble de concepts, de méthodes et d'outils logiciels pour la gestion des produits industriels tout au long de leur cycle de vie.	
SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition ou système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel	Système de télégestion en temps réel pour le traitement de télémessures et le contrôle à distance d'installations techniques.	
WMS : Warehouse Management System	Système de gestion d'entrepôts.	

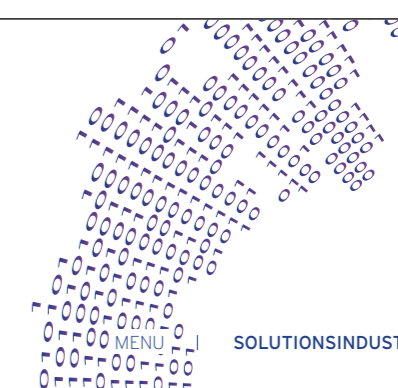


Tableau de correspondance entre les blocs de l'architecture fonctionnelle et les normes et standards

AIF (2025)	DTC-CPT ¹⁰ (2022)	ISO 23247-2:2021 (2024)
Connectivité	Data services	Data Collection and Device control entity (DCDCE)
Préparation des données	Data services	Data Collection and Device control entity (DCDCE)
Stockage modèles et données	Data services	Core Element (CE)
Traitements avancés	Intelligence	Core Element (CE)
Interface utilisateur	User experience	User Element (UE)
Données externes	Integration	User Element (UE)
Administration et Orchestration	Management	Core Element (CE)

¹⁰ DTC-CPT : Digital Twin Consortium Capabilities Periodic Table


Tableau de correspondance entre l'architecture fonctionnelle et les exemples de Jumeaux Numériques

L'architecture fonctionnelle du Jumeau Numérique proposée dans ce document comporte un ensemble de blocs fonctionnels à portée générale (Interface utilisateur, traitements avancés...), ainsi que des flux de données reliant ceux-ci.
 Pour aller davantage dans le détail et concrétiser cette architecture, chacun des blocs a été divisé en sous-blocs. Chacun de ces sous-blocs présente une fonctionnalité particulière.

Les tableaux ci-après livrent, à titre d'illustration, une description de sous-blocs fonctionnels pertinents pour chacun des exemples du chapitre 2 (voir page 24). Certains sous-blocs seront communs à différents exemples, avec éventuellement de légères variations. La présence d'un sous-bloc ne signifie pas forcément que celui-ci est nécessaire à la réalisation de l'exemple, mais plutôt qu'il pourrait être utile pour contribuer à la valeur du Jumeau Numérique.

Il est à noter que la pertinence de tel ou tel sous-bloc peut varier fortement en fonction du cas d'usage. Ils ne sont donc pas présents dans tous les cas.
 Par exemple, le sous-bloc « Réalité virtuelle » du bloc fonctionnel « Interface utilisateur » permet d'envisager la visite virtuelle d'une ligne de production. Par contre, la réalité virtuelle ne serait sans doute pas utile dans le cas du Jumeau Numérique d'un réseau de communication.

Tableau de correspondance entre l'architecture fonctionnelle et les exemples de Jumeaux Numériques

Blocs fonctionnels et "sous-blocs"	Blocs logiques		Blocs logiques		
	Bioréacteur	Ligne de production	Équipement industriel machine de planage	Maintien conditions opérationnelles-processus de maintenance	Réseau communication
 Interface utilisateur					
Tableau de bord	Tableau de bord (surveillance de la température, de l'acidité, résultat de la simulation - population de micro-organismes, alarmes)	Tableau de bord (reporting, BI)	Tableau de bord (reporting)	Tableau de bord (reporting, KPI, tendances, aide à la prise de décision en mode surveillance ou en mode simulation, comparaison et gain apporté)	Tableau de bord (reporting)
Système de notification	Système de notification d'alertes (limites de température, d'acidité) ; extension possible (détection de mousse)	Système de notification d'alertes (écrans partagés, notifications, sms...)	Système de notification d'alertes (message d'engorgement ou d'équipement en panne)	Système de notification d'alertes (limite basse des performances du soutien bientôt atteinte, temps limite pour se réapprovisionner en pièces, dérive de l'utilisation, etc.)	Système de notification d'alertes (message d'engorgement ou d'équipement en panne)
Suivi (temps-réel ou asynchrone)	Collecte des données (température, acidité...) en temps réel	Système de suivi temps réel (vue courante de la ligne de production)	Système de suivi temps réel (équilibre de charge de travail de la machine)	Système de suivi selon la fréquence de transmission des données (pas de temps réel)	Système de suivi temps réel (équilibre de charge de trafic)
Visualisation 2D ou 3D	Visualisation 2D des courbes (température, acidité, évaluation de la population) ; visualisation 3D du gradient de température	Visualisations 2D/3D (vue du produit en cours de fabrication, vue de la ligne de production)	Visualisation 3D de la ligne de production Visualisation sur lunette 3D (realWare) du mode opératoire, validation du processus	Visualisation 2D (carte des lieux avec les quantités de pièces de rechange ou de réparation par site, etc.) Visualisation 3D des matériels en service et liens interactifs avec la gestion de configuration maintenue	Visualisation 2D/3D (carte animée temps-réel représentant l'état des liens et des équipements du réseau)
Visualisation basique ou avancée	Visualisation des données simulées, collectées en temps réel ou rejouées dans un temps contrôlable			Interface de visualisation des résultats de simulation, aide à la décision (ex. visualisation du niveau des stocks (KPI) selon le rôle (responsable d'approvisionnement, décideur...))	Visualisation des données simulées et des résultats de simulation, interface de génération de scénarios de simulation «what-if»
Interface avec entité physique		Action sur équipement (arrêt d'urgence, déclenchement d'une fabrication)	Action sur équipement par IHM (arrêt d'urgence, déclenchement d'une fabrication)		Action sur équipement (redémarrage, téléopération)
Réalité augmentée et réalité virtuelle		Système immersif (vérification de l'accessibilité des équipements de la ligne)			
Agents conversationnels				IHM orientée « assistant vocal » pour permettre une navigation et une utilisation fluide, moderne et intuitive pour tous les types d'utilisateurs (avancés, basiques, occasionnels,...)	
Autres interfaces utilisateur (gamification)				IHM plaisante et orientée « gamer » pour l'adhésion et l'utilisation par tous (manager, support produit, soutien logistique intégré (SLI), achat, client, etc.), Business Intelligence	

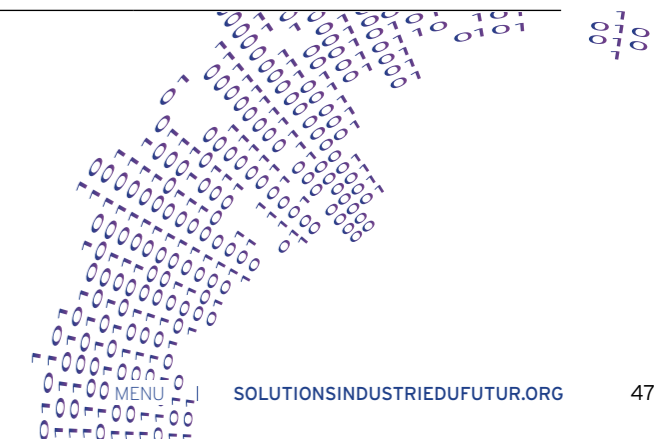



Tableau de correspondance entre l'architecture fonctionnelle et les exemples de Jumeaux Numériques

Blocs fonctionnels et "sous-blocs"	Blocs logiques		Blocs logiques		
	Bioréacteur	Ligne de production	Équipement industriel machine de planage	Maintien conditions opérationnelles-processus de maintenance	Réseau communication
 Traitements avancés					
Analyse de données (statistiques)	Calcul de coefficients d'impact des facteurs environnementaux sur la croissance des souches		Récupération, mise en forme, traitement et transmission des données		
Détection d'anomalies	Spécification et détection de dépassement de seuils d'acidité ou de température		Analyse de réseaux et de détection d'anomalies, de génération d'alerte	Workflow clair pour l'analyse et la prise de décision ainsi que pour la mise en production une fois les décisions prises (humain dans la boucle)	Analyse de réseau, détection d'anomalies et génération d'alertes
Apprentissage automatique	Maintenance prédictive (détection d'anomalies machine, génération d'alertes) et maintenance prescriptive		Maintenance prédictive (détection d'anomalies machine, génération d'alertes) et maintenance prescriptive	Reconstruction d'un Jumeau Numérique du soutien à partir de données réelles pour les systèmes anciens et reconstruction de la partie utilisation et fiabilité pour les systèmes récents	Algorithmes d'apprentissage automatique des profils de trafic, des configurations optimales, génération de trafic synthétique
Simulations numériques et fonctionnelles	Modèles d'évolution des populations bactériennes	Simulation évènements discrets (simulation de production)	Simulation évènements discrets (simulation de la cadence de production)	Simulations résultant de besoins internes ou client, optimisation du soutien dans des situations particulières	Simulation à évènements discrets des reconfigurations du réseau ou de pannes, d'attaques ou de changement de charge et d'évolution de trafic
Génération et filtrage d'alertes	Systèmes de génération d'alertes		Systèmes de génération d'alertes	Systèmes de génération d'alertes	Systèmes de génération et de filtrage d'alertes
Contrôle/Commande entité physique			Fonctions réseau de haut-niveau : VNF (sécurité, ingénierie de trafic, routage, reconfiguration, lissage de trafic...)		
Optimisation	(Ré-)ordonnancement des opérations		Comparaison des performances avant et après optimisation (aide à la décision, reporting, réunion client, etc.)		
Décision et recommandation			Intégration d'un ou plusieurs logiciels d'optimisation du soutien (optimisation du couple coût/disponibilité plus fine, aide à la décision, gestion des rechanges, etc.), prédictions statistiques sur la base du retour d'expérience pour associer des pannes à des évènements et ainsi prédire de futures pannes		
Calcul géométrique	Simulation du gradient de température à l'aide de modèles ComSol				

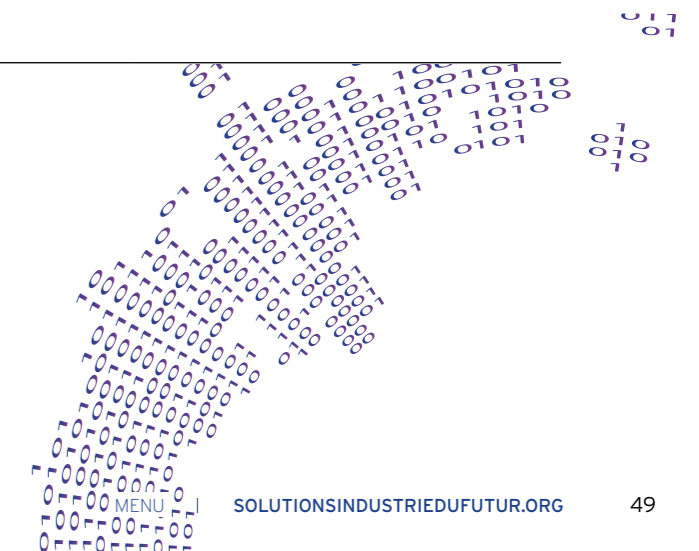


Tableau de correspondance entre l'architecture fonctionnelle et les exemples de Jumeaux Numériques

Blocs fonctionnels et "sous-blocs"	Blocs logiques		Blocs logiques		
	Bioréacteur	Ligne de production	Équipement industriel machine de planage	Maintien conditions opérationnelles-processus de maintenance	Réseau communication
Stockage des données et des modèles					
Stockage et archivage	Stockage dans des modèles MATLAB et COMSO, stockage des données dans des fichiers CSV	Modèle 3D ligne de production (équipements, opérateurs), modèles 3D produits, données d'exécution (équipements, composants et produits, opérations, opérateurs), ordres de fabrication (en cours et à venir)	Stockage des modes opératoires sous forme de fiches techniques (stockées directement ou dans un système externe, dossier fabrication), données d'exécution (automates, équipements, composants et produits, opérations, opérateurs), ordres de fabrication (en cours et à venir)	Stockage et archivage des données d'entrée du soutien provenant des clients (HUMS, logbook, retour d'expérience, utilisation, fait technique, gestion de configuration « as maintained », obsolescence, environnement, organisation client, données de soutien), archivage de chaque donnée de sortie de l'optimisation, des modèles de simulation et des décisions associées	Base de données de configuration d'équipements (OpenFlow Configuration Protocol (OFConfig), Open Virtual Switch DataBase (OVSDB), description des topologies)
Sécurité des données et contrôle d'accès	Géré par l'OS		Chiffrement homomorphe permettant de faire du calcul sans visibilité de la donnée, et permettant l'usage du Web pour l'industriel en toute confiance		Politiques (sécurité, ingénierie de trafic, routage, contrôle d'accès...)
Séries temporelles			Stockage des séries temporelles, des indicateurs d'usage et de performance (volume de trafic, d'entrée et de sortie, débit, latence, erreurs observées....) par équipement		Séries temporelles des indicateurs d'usage et de performances (volume de trafic d'entrée et de sortie, débit, latence, erreurs observées (par équipement...))
Gestion d'autres données	Définition d'un processus de production		Définition du processus de production (mode opératoire)	Définition du processus de pilotage du Jumeau Numérique du soutien, définition du processus de modification d'un modèle (si remise en cause du concept de soutien), système de mise à jour des modèles en temps réel et archivage	
Préparation des données					
Nettoyage, agrégation, structuration					Pré-traitement des données du client pour intégrer le datalake ou datawarehouse de l'industriel
Régularisation des séries temporelles	Pré-traitement de séries temporelles (issues des équipements)		Traitement de séries temporelles (issues des équipements)		Pré-traitement de séries temporelles (issues des équipements)
Normalisation, contextualisation					Traitement des données entre les différentes briques logicielles de l'industriel
Anonymisation et chiffrement			Chiffrement, déchiffrement	Chiffrement, déchiffrement pour les envois/receptions des données clients	Anonymisation, chiffrement, déchiffrement

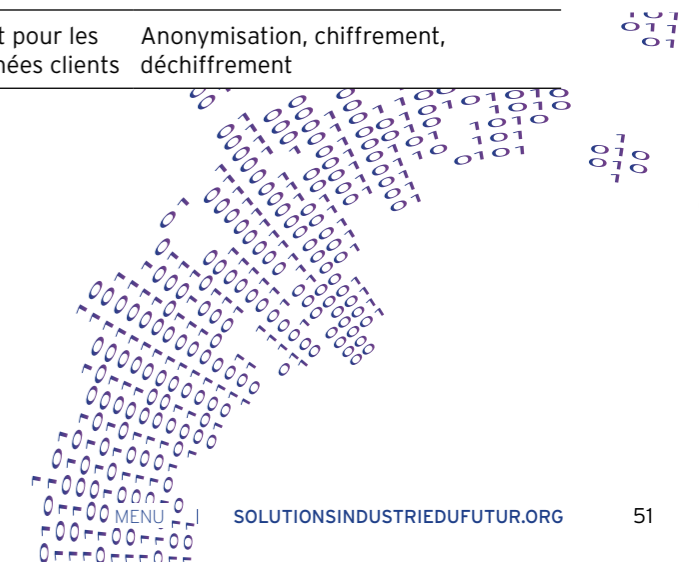


Tableau de correspondance entre l'architecture fonctionnelle et les exemples de Jumeaux Numériques

Blocs fonctionnels et "sous-blocs"	Blocs logiques		Blocs logiques		
	Bioréacteur	Ligne de production	Équipement industriel machine de planage	Maintien conditions opérationnelles-processus de maintenance	Réseau communication
Connectivité					
Collecte des données	Collecte via OPCDA	IIoT (remontée de données machines/ postes)	Échange des informations via réseau de terrain (type MODBUS TCP entre machine et automate)	Remontée des infos du soutien du système en service via un portail sécurisé mis en place entre le client et l'industriel (liaison sécurisée)	Sondes, outils de monitoring pour collecter des séries temporelles, Interception du trafic
Connectivité et transport de données	Collecte via OPCDA		MQTT en 5G entre machine et certains capteurs	Récupération des données de HUMS de manière automatique (techno à définir : Li-Fi, RFID, LoRA, 5G...)	Remontée des données de monitoring et des informations de configuration via réseau de contrôle du réseau (out-band ou in-band)
Communication	Collecte via OPCDA		TCP/IP entre industrial EDGE et serveur / datacenter		SNMP pour la gestion des équipements, protocoles flow-based (NetFlow et sFlow) pour l'analyse de trafic, et ICMP pour les diagnostics
Couplage et synchronisation	Collecte via OPCDA		API PLC entre machine et ses composants (interface Jumeau Numérique via STEP et table Automate)	Connectivité entre les différentes briques logicielles de l'industriel pour un traitement automatique des données	Traduction des décisions de reconfiguration ou de programmation en commande d'équipements (plan de contrôle)
Interface données externes					
Sorties fonctionnelles du JN (API)			API REST (Representational State Transfer) pour l'interopérabilité des systèmes		
Couplage SI externe	Interface Panorama permettant d'exposer les données et configurations	Interface Système de pilotage de la production (MES), Interface ERP (ordres de fabrication), Interface Système de gestion de la qualité (QMS), Interface Système de gestion d'entrepôt (WMS)	Interface ERP (ordres de fabrication)	Interface ERP (commande des pièces de rechange, réparations, ...), interface avec le système de pilotage de la production (pour les rechanges et réparations notamment), retour d'expérience facilité pour les programmes futurs	Systèmes de gestion du réseau et de l'infrastructure IT, plate-forme DevOps, dépôts et annuaire des fonctions réseau (NRF pour 5G)
Couplage autres jumeaux numériques		Interface Jumeau Numérique (entre les machines dans la ligne de production)		Interface Jumeau Numérique (avec JN de gestion de configuration, JN de conception, etc.)	

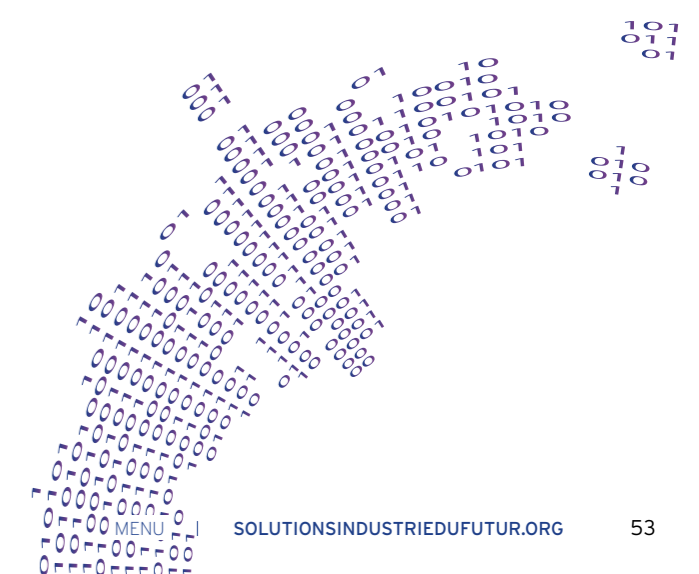
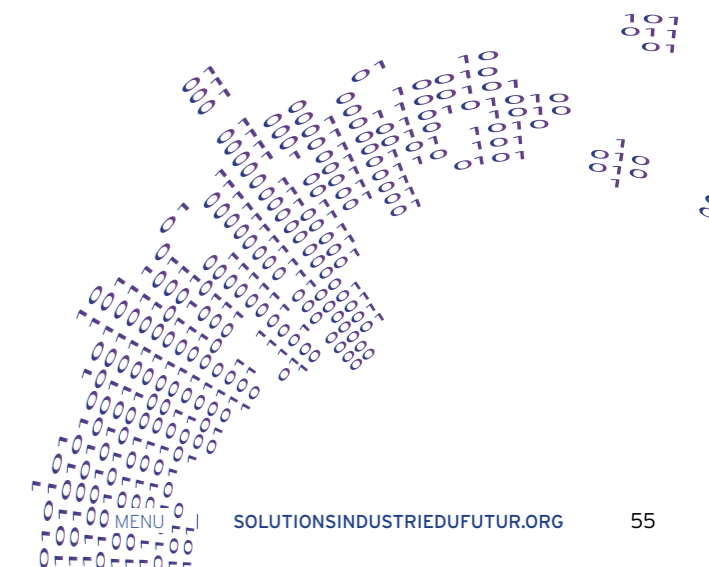


Tableau de correspondance entre l'architecture fonctionnelle et les exemples de Jumeaux Numériques

Blocs fonctionnels et "sous-blocs"	Blocs logiques			Blocs logiques	
	Bioréacteur	Ligne de production	Équipement industriel machine de planage	Maintien conditions opérationnelles- processus de maintenance	Réseau communication
Administration & Orchestration					
Gestion des rôles et des droits d'accès		Gestion des rôles et droits d'accès utilisateur	Gestion des rôles et droits d'accès utilisateur	Gestion des rôles et droits d'accès utilisateur	Gestion des rôles et droits d'accès utilisateur
Configuration et contrôle	Scripts d'installation	Gestion des équipements connectés, configuration des composants logiciels du JN	Gestion des équipements connectés, configuration des composants, logiciels du JN (exemple 3D Step)	Configuration des composants logiciels du JN (exemple : OPUS, résilience, fiabilité du JN (données de confiance), respect des critères ESG (Environnementaux, Sociaux et de Gouvernance), intégration aux processus de l'entreprise	Configuration des composants logiciels du JN, intégration au plan de gestion du réseau (en charge de la gestion des plans contrôle et des plans données)
Gestion de la sécurité des données		Gestion de la sécurité des données	Gestion de la sécurité des données	Cybersécurité, résilience, fiabilité du JN (données de confiance)	Gestion de la sécurité des données





Créée en 2015, l'Alliance Industrie du Futur (AIF), association loi 1901, organise et coordonne, au niveau national, les initiatives, projets et travaux des PME/ETI, pour la modernisation des outils industriels et la transformation de leur modèle économique, notamment par l'apport de nouvelles technologies.

Présidée par Frédéric Sanchez puis par Jean-Claude Fayat depuis octobre 2025, elle porte la Filière Solutions Industrie du Futur labellisée par le Conseil National de l'Industrie :

www.solutionsindustriedufutur.org

REMERCIEMENTS

L'AIF tient à remercier tous les participants du Comité Technique « Jumeau Numérique » pour leur contribution à la réalisation de cette brochure, et en particulier :

- Emmanuelle Abisset-Chavanne, Ensam
- Antoine Beugnard, IMT Atlantique
- Christian Chaplais, Dassault Systèmes
- Blaise Conrard, CRISTAL - Univ. Lille
- Thierry Coupaye, Orange
- Fahad Golra, Agileo Automation
- Clarissa Gregory, SyCoIA, IMT Mines Alès
- Hervé Labarge, 3DVERSE
- Clara Lacroix, INSA Lyon
- Damien Lamy, Mines Saint-Etienne
- Jannik Laval, Laboratoire DISP, Univ. Lyon 2
- Yvan Picaud, Orange
- Ariane Piel, CEA
- Souad Rabah-Chaniour, SyCoIA, IMT Mines Alès
- Thomas Rousselot, AFNeT Services
- Olivier Scart, Dassault Systèmes
- Aicha Sekhari, Laboratoire DISP, Univ. Lyon 2
- Nathalie Toulouse, MBDA
- Pascale Vicat-Blanc, INRIA