

Jumeaux Numériques des Territoires

Interopérabilité et collaboration

Architectures et standards d'échanges

Auteurs / Organismes

Frédéric Lé – AFNET (Animateur)

Franck Le Gall - EGM

Julien Hautemaniere - Cerema

Mohamed Chachoua – LASTIG/UGE/EIVP Paris

Dyhia Taleb – Territoire Énergie E61

Rachedi Abderrezak – Université Gustave Eiffel

Fabrice Vienne - Université Gustave Eiffel

Rémi Montorio – Lille Métropole (Animateur)

Louis Macquet - Lille Métropole

Alexis Leautier - Ecolab

Simon Pageaud – Balafenn

Rodolphe Delétage – Aveyron Innovation

Simon Vidal – Ville de Montréal

Autres participants / Organismes

Benoit Fredericque - IGN

Hervé Halbout – HH Consulting

Maud Guizol - COLAS

Philippe Larguier – Lille Métropole

Salvatore Dalfonso – TELT

Fréderique Bertrand – ENSA Paris La Villette

Guillaume Poujol – OpenIG

Armonie LAURENT - ISOGEO

Philippe Bour - IGO

Jean Brange - AFNET

Pierre Marie Brunet – CNES

Julien Fuseau – Bordeaux Métropole

Guillaume Picinbono – CSTB

Aurélie TALON - Polytech' Clermont Ferrand

Hypolite Verdier

Thème de rattachement : Interopérabilité et collaboration :
Architectures, standards d'échanges et plateformes

Décembre 2025

Résumé (FR)

Les jumeaux numériques territoriaux répondent à des besoins croissants des collectivités et acteurs de l'aménagement en matière de gestion et de simulation. Ces attentes incluent une meilleure visualisation des données, une optimisation des ressources techniques et une prise de décision éclairée. Le groupe de travail Jumeau Numérique Territorial de MINnD2050 et du Conseil national de l'information géolocalisée (CNIG) s'est penché sur cette thématique pour définir les axes structurants devant constituer l'élaboration d'un jumeau numérique, réplique virtuelle d'un objet physique, permettant de simuler, analyser et prédire des scénarios complexes.

L'architecture de référence d'un jumeau numérique territorial se compose de plusieurs couches : la couche de données, la couche de traitement, la couche de visualisation et la couche d'interaction utilisateur. Les composants de cette architecture incluent des capteurs de l'internet des objets (IoT), des bases de données géospatiales, des algorithmes d'analyse ou simulation et des interfaces utilisateur interactives, potentiellement 3D. L'intégration à un système d'information existant nécessite des stratégies bien définies, incluant l'interopérabilité des données, la mise à jour en temps réel et la sécurité des informations.

La cible utilisateur varie des experts métiers aux décideurs politiques, en passant par les citoyens. Les modèles de complexité doivent être adaptés aux besoins spécifiques de chaque utilisateur, allant de simples visualisations à des analyses prédictives avancées. La question d'échelle spatiale et temporelle est cruciale, car les jumeaux numériques doivent pouvoir fonctionner à différentes échelles, du quartier à la ville entière, et sur différentes périodes, de l'instantané au long terme. La place de la 3D, du BIM (Building Information Modeling) et des SIG (Systèmes d'Information Géographique) est centrale, car ces technologies permettent une représentation précise et détaillée des environnements urbains.

Le géoréférencement est essentiel pour assurer la précision et la cohérence des données. La structuration et la sémantique des données doivent être standardisées pour faciliter l'interopérabilité entre différents systèmes et plateformes. Les formats de données doivent être ouverts et standardisés afin de garantir une interopérabilité maximale. La reprise de l'existant pose des défis significatifs, notamment en termes d'incomplétude des données descriptives des actifs bâtis existants, de compatibilité des données et de mise à jour des systèmes existants. Les enjeux juridiques, de licence et de gouvernance sont également cruciaux, car ils concernent la propriété des données, la protection de la vie privée et la conformité aux réglementations locales et internationales.

Ainsi les jumeaux numériques territoriaux représentent une avancée majeure dans la gestion et la planification du territoire. Leur architecture complexe nécessite une approche intégrée et interdisciplinaire pour répondre aux besoins variés des usagers. Les critères d'analyse des cas d'usage et les critères de qualité et d'interopérabilité des données sont essentiels pour assurer le succès et la durabilité de ces systèmes. En surmontant les défis techniques, juridiques et organisationnels, les jumeaux numériques territoriaux peuvent transformer la manière dont nous concevons, gérons et vivons dans nos environnements urbains.

Abstract (EN)

Digital twins for territories or local digital twins meet the growing needs of local authorities and urban planning stakeholders in terms of urban management and planning. These expectations include better data visualization, IT resource optimisation and informed decision-making. The MINnD2050 and CNIG Territorial Digital Twin working group has examined this topic to define the key areas for developing a digital twin, a virtual replica of a physical object that can be used to simulate, analyse and predict complex scenarios.

Local digital twin reference architecture consists of several layers: the data layer, the processing layer, the visualisation layer and the user interaction layer. These components of this architecture include IoT sensors, geospatial databases, analysis and simulation algorithms and interactive user interfaces, which may include 3D rendering. Integration with an existing information system requires well-defined strategies, including data interoperability, real-time updating and information security.

The target users range from urban planners to policy makers and citizens. The complexity of the models must be adapted to the specific needs of each user, ranging from simple visualisations to advanced predictive analyses. The question of spatial and temporal scale is crucial, as digital twins must be able to operate at different scales, from the neighbourhood to the entire city, and over different time periods, from snapshots at a particular time to the long term. The role of 3D, BIM (Building Information Modelling) and GIS (Geographic Information Systems) is central, as these technologies enable accurate and detailed representation of urban environments. Georeferencing is essential to ensure data accuracy and consistency. Data structure and semantics must be standardised to facilitate interoperability between different systems and platforms. Data formats must be open and standardised to ensure maximum interoperability.

Integrating existing assets into the digital twin poses significant challenges, particularly in terms of incomplete descriptive data for existing built assets, data compatibility, and updating existing systems. Legal, licensing, and governance issues are also crucial, as they concern data ownership, privacy protection, and compliance with local and international regulations.

Local digital twins represent a major advance in urban management and planning. Their complex architecture requires an integrated and interdisciplinary approach to meet the varied needs of users. Use case analysis criteria and data quality and interoperability criteria are essential to ensure the success and sustainability of these systems. By overcoming technical, legal and organisational challenges, local digital twins can transform the way we design, manage and live in our urban environments.

Sommaire

TABLE DES MATIÈRES

1. AVANT-PROPOS	4
2. L'ARCHITECTURE DU JUMEAU NUMÉRIQUE	5
2.1 Besoin usagers et attentes	5
2.2 Définition et principe du jumeau numérique	5
2.3 L'architecture de référence	7
2.4 Composants de l'architecture de référence	10
2.5 Exemples d'implémentation.	12
2.6 Stratégies d'intégration à un SI existant	19
3. CRITÈRES D'ANALYSES DES CAS D'USAGES.....	23
3.1 Briques conceptuelles simplifiées.....	23
3.2 Cible utilisateur	24
3.3 Modèles de complexité	26
3.4 Question d'échelle spatiale et temporelle	28
3.5 Place de la 3D/BIM/SIG	31
4. CRITÈRES DE QUALITÉ ET INTEROPÉRABILITÉ DES DONNÉES.....	34
4.1 Géoréférencement	34
4.2 Structuration et sémantique	34
4.3 Formats et interopérabilité	38
4.4 Enjeux de la reprise de l'existant.....	39
5. ENJEUX JURIDIQUE, LICENCE ET GOUVERNANCE.....	41
5.1 Utilisation des données	41
5.2 Propriété technique des outils et produits	41
5.3 Perspectives.....	42
6. CONCLUSION	44
6.1 Résultats de l'étude	44
6.2 Perspectives de travail MINnD2050 / CNIG.....	46
7. REMERCIEMENTS.....	48

I. AVANT-PROPOS

Objectif du document	Ce document a pour objectif de proposer des éléments clefs d'analyse des jumeaux numériques territoriaux. Il propose une série de questions permettant de clarifier les éléments d'architecture techniques qui seront mobilisés par un jumeau numérique en réponse à un cas d'usage. Le document propose ainsi une série de sujets comme autant de points devant être clarifiés avant de choisir une architecture / solution cible.																								
Points clefs du document	Ce document a pour but de : <ul style="list-style-type: none"> • Définir un cadre de compréhension commun • Illustrer / expliquer les grands types architectures • De faire le lien entre cas d'usages et briques techniques • De souligner les enjeux d'interopérabilité 																								
Cible du document	Ce document s'adresse aux acteurs initiant ou souhaitant initier une démarche de jumeau numérique. Il vise à clarifier les cas d'usages clefs avant la constitution d'une architecture dédiée. Les acteurs clefs identifiés sont <ul style="list-style-type: none"> • Décideurs (élus, responsables SIG ou DSi) • Chefs de Projet • Responsable SI métiers • AMO, conseil ou Ingénieries • Enseignants/Chercheurs A noter que ce document reprend les bases posées par les documents produits par MINnD Saison2 avec notamment la « Vision partagée du Jumeau Numérique » (Lien 1)																								
Parties pris au regard du développement durable	MINnD2050 s'inscrit comme un catalyseur de la transition numérique des acteurs des infrastructures et de la construction et des gestionnaires de territoires, au service de la transition écologique, dans le cadre d'une politique européenne et avec des standards internationaux. A ce titre les éléments de propositions formulés dans ce document tendent à valoriser les démarches sobres, résilientes et à impact global positif tels que promus par la mission Climate-Neutral and Smart Cities (Lien 2)																								
Glossaire des Acronymes	<table> <tbody> <tr> <td>AR</td><td>Augmented Reality / Réalité augmentée</td></tr> <tr> <td>BI</td><td>Business Intelligence / Intelligence de la donnée</td></tr> <tr> <td>BIM</td><td>Building Information Model/Modelling/Management</td></tr> <tr> <td>DSI</td><td>Direction des systèmes d'informations</td></tr> <tr> <td>IFC</td><td>Industry Foundation Class</td></tr> <tr> <td>IoT</td><td>Internet of Things / Objets connectés</td></tr> <tr> <td>LD</td><td>Linked Data / Données liées</td></tr> <tr> <td>ML / DL</td><td>Machine Learning / Deep Learning</td></tr> <tr> <td>OGC</td><td>Open Geospatial Consortium</td></tr> <tr> <td>SI</td><td>Systèmes d'Informations</td></tr> <tr> <td>SIG</td><td>Systèmes d'Informations Géographiques</td></tr> <tr> <td>VR</td><td>Virtual Reality / Réalité Virtuelle</td></tr> </tbody> </table>	AR	Augmented Reality / Réalité augmentée	BI	Business Intelligence / Intelligence de la donnée	BIM	Building Information Model/Modelling/Management	DSI	Direction des systèmes d'informations	IFC	Industry Foundation Class	IoT	Internet of Things / Objets connectés	LD	Linked Data / Données liées	ML / DL	Machine Learning / Deep Learning	OGC	Open Geospatial Consortium	SI	Systèmes d'Informations	SIG	Systèmes d'Informations Géographiques	VR	Virtual Reality / Réalité Virtuelle
AR	Augmented Reality / Réalité augmentée																								
BI	Business Intelligence / Intelligence de la donnée																								
BIM	Building Information Model/Modelling/Management																								
DSI	Direction des systèmes d'informations																								
IFC	Industry Foundation Class																								
IoT	Internet of Things / Objets connectés																								
LD	Linked Data / Données liées																								
ML / DL	Machine Learning / Deep Learning																								
OGC	Open Geospatial Consortium																								
SI	Systèmes d'Informations																								
SIG	Systèmes d'Informations Géographiques																								
VR	Virtual Reality / Réalité Virtuelle																								

2. L'ARCHITECTURE DU JUMEAU NUMÉRIQUE

2.1 Besoin usagers et attentes

Besoins	Les travaux de MINnD2050 et du CNIG ont mis en avant la nécessité de clarifier le contexte technique et technologique entourant les jumeaux numériques. Des questions récurrentes ont ainsi été posées pour lesquelles ce document tentera d'apporter des premiers éléments de réponse.
Comprendre	<ul style="list-style-type: none"> • Quelle est la définition d'un jumeau numérique ? • Quelles briques techniques le composent ? • Quel est le lien avec le BIM, le SIG ou la SmartCity ? • Quelles sont les normes ou standards existants ? • Quelle sont les stratégies de mise en œuvre • Par où commencer ? • Comment construire un jumeau à partir d'un SI existant ?
Mettre en œuvre	
Enjeux	Ces grands questionnements s'accompagnent de réflexions légitimes sur les moyens à mobiliser pour déployer de tels systèmes. Les principaux points soulevés méritent ci-dessous d'être mis en lumière. <ul style="list-style-type: none"> • Quel est l'écosystème actuellement en place pour soutenir la mise en œuvre de tels systèmes ? • Quelle est la capacité à concevoir et partager des communs techniques pour soutenir la mise en œuvre ? • Quels retours d'expérience des territoires pionniers ? Quelles sont les perspectives en matière de standardisation ? • Quel coût pour le jumeau numérique ? • Quels sont les enjeux liés en termes de cybersécurité ? • Comment adopter une stratégie responsable ?
Opportunités	
Freins	

2.2 Définition et principe du jumeau numérique

Définition orientée architecture	<p>Le jumeau numérique du territoire est une réplique virtuelle dynamique d'un espace géographique réel (ville, région, quartier, etc.), qui conjugue modélisation 3D (et souvent géospatiale), données en temps réel (via capteurs, données historiques, réglementaires, environnementales et comportementales), et capacités de simulation temporelle (passé, présent et avenir).</p> <p>Couplé à l'intelligence artificielle, il exploite des algorithmes d'analyse de données, de prédiction et d'aide à la décision, permettant d'anticiper des évolutions, de détecter des anomalies ou d'optimiser les choix de gestion. Il constitue ainsi un outil décisionnel pluridimensionnel permettant aux acteurs territoriaux de visualiser, comprendre, optimiser, prévoir et impliquer (citoyens, décideurs) dans la gouvernance, la planification, la gestion des infrastructures et la résilience des territoires.</p>
---	--

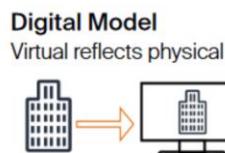
Modèle de l'objet réel

Le modèle capture la structure et le comportement de l'objet réel à un niveau de détail suffisant pour satisfaire les objectifs du JNT.

Ce modèle peut s'inspirer et aussi réutiliser les standards reconnus dans des domaines aussi variés que le SIG, le BIM, le CIM ou bien de l'internet des objets (IoT).

Couplage avec le réel

Il convient de souligner que l'on trouve, dans la littérature, des définitions diverses du jumeau numérique des territoires, lesquelles permettent d'en préciser et d'en enrichir la compréhension.



[\(Référence EPFL\)](#)

Dans cette vision, un jumeau numérique doit avoir des flux de données bidirectionnels entre physique et virtuel. Nous adopterons une vision non restrictive du jumeau ; les cas d'usages et besoin d'interactions entre le virtuel et le réel drivant l'architecture à mettre en œuvre.

Les composants clefs d'un JN.

La figure ci-dessous illustre les composants clefs d'un jumeau numérique d'un territoire et leurs principales interactions. Les différents modules le composant sont décrits dans les paragraphes suivants.

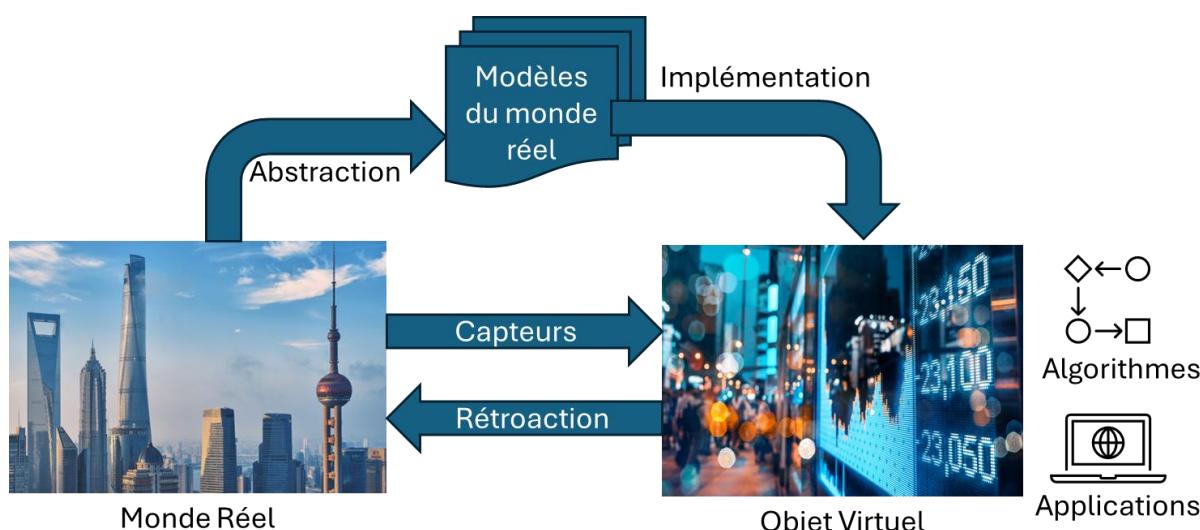


Fig 1. Principaux composants d'un JNT

<p>Objets réels</p> <p>Modèle des objets du monde réel</p> <p>Capteurs</p> <p>Algorithmes</p> <p>Applications</p> <p>Boucle de rétroaction</p> <p>Documents de références</p>	<p>Les objets du monde réel sont les objets physiques que le JN a pour objectif de représenter (par exemple les bâtiments, les ponts, les véhicules ou bien les routes). Le jumeau numérique peut aussi représenter des phénomènes qui ne se matérialisent pas par des objets physiques (le vent, les marées, l'énergie, la pollution de l'air).</p> <p>Un modèle est une abstraction des objets du monde réel. Plusieurs modèles des objets du monde réel peuvent être développés en fonction des objectifs du JNT.</p> <p>Les capteurs collectent des données observées dans le monde réel comme la température, la pollution de l'air ou bien la vitesse.</p> <p>Les données collectées sont exploitées par des algorithmes qui permettent, par exemple, de prédire l'évolution de l'objet physique, de réaliser des simulations, d'entraîner des modèles d'intelligence artificielle ou encore de prescrire des actions correctrices.</p> <p>Les applications correspondent aux usages et aux modalités de mise en œuvre du Jumeau Numérique des Territoires (JNT). Au-delà d'exemples liés à la mobilité, comme l'identification en temps réel des places de stationnement disponibles et l'orientation des véhicules vers les emplacements les plus proches, le JNT peut également jouer un rôle clé face aux défis du changement climatique. En effet, il peut être utilisé pour modéliser et anticiper les impacts de phénomènes météorologiques extrêmes sur les territoires, tels que les tempêtes, les feux de forêt, les inondations ou encore les vagues de chaleur. Ces simulations permettent aux collectivités d'optimiser leurs plans de prévention, de renforcer la résilience des infrastructures et de mieux protéger les populations.</p> <p>Les algorithmes produisent des résultats qui peuvent influencer l'évolution de l'objet réel, par exemple réguler les feux de circulation pour fluidifier le trafic.</p> <p>Pour approfondir ces éléments de définition, nous conseillons la lecture des ouvrages et documents suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Projet Européen DUET : Lien 1 et Lien 2 • IEC City information modelling and urban digital twins : Lien 3 • OGC - Urban Digital Twins: Integrating Infrastructure, natural environment and people : Lien 4 • Digital Twin Framework for Built Environment: A Review of Key Enablers : Lien 5 • JUMEAUX NUMÉRIQUES DU TERRITOIRE <i>Identification des enjeux et défis via une revue de la littérature scientifique</i>. Mars 2023 Rapport résumé en français., EPFL : Lien 6
--	---

2.3 L'architecture de référence

Architecture de référence

La figure ci-dessous présente l'architecture de référence d'un jumeau numérique : Conçue pour être suffisamment générique, elle peut être instanciée dans une grande variété d'implémentations. Elle constitue également un outil utile pour comparer les solutions logicielles disponibles et orienter les développeurs de jumeaux numériques dans leurs choix techniques.

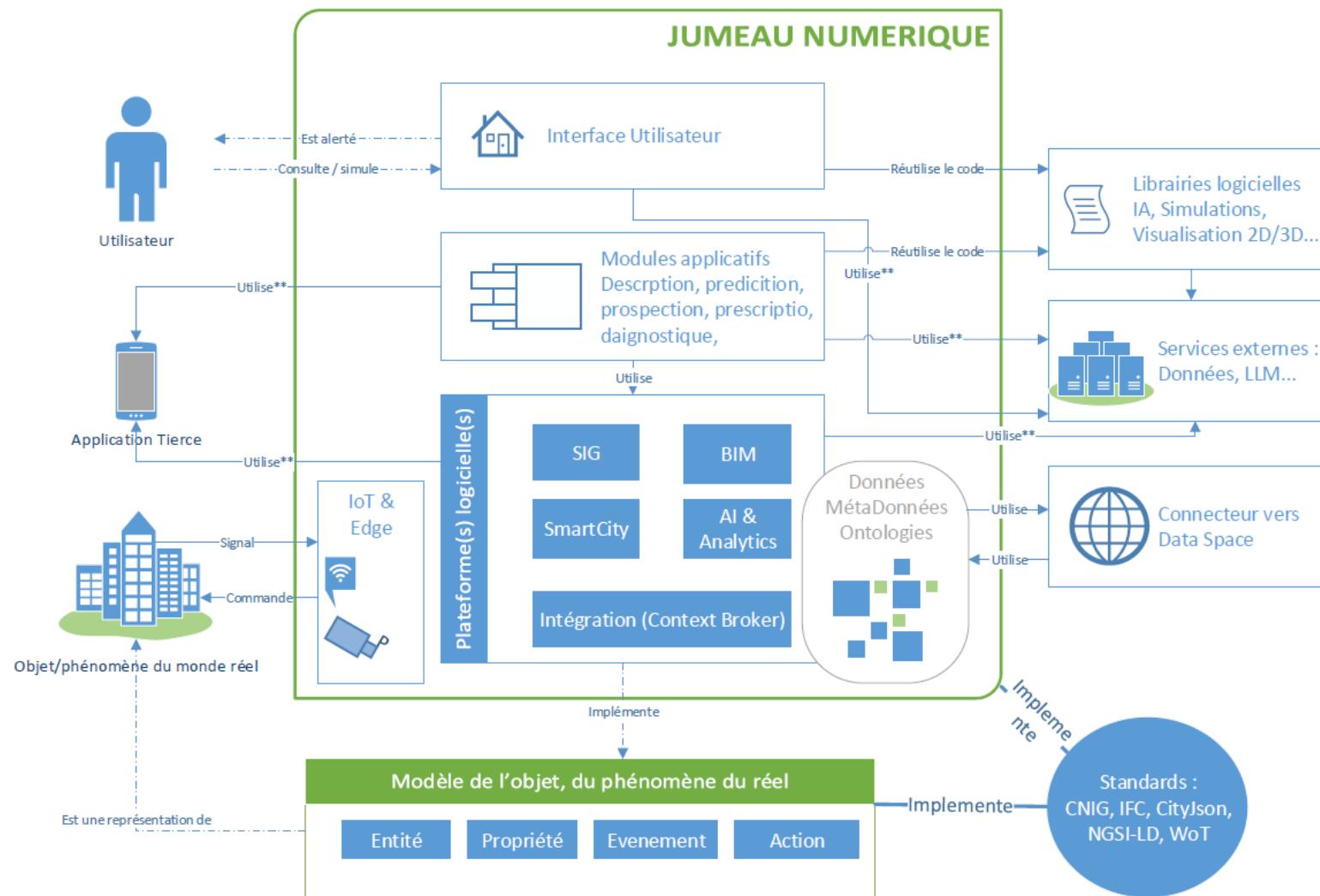


Fig 2. Architecture de référence d'un JN

2.4 Composants de l'architecture de référence

Modélisation de l'objet ou phénomène du monde réel

Les objets ou phénomènes du monde réel sont représentés par des modèles qui sont des abstractions fidèles de celui-ci et qui peuvent être transformés en des artefacts logiciels.

Un même objet du monde réel pourra avoir une représentation différente en fonction des objectifs du jumeau numérique. Comme un même jumeau numérique peut faire cohabiter des modèles différents pour représenter des aspects différents de la réalité, il est critique de définir un système d'identification des objets du monde réel. Par exemple la directive INSPIRE demande que chaque objet géographique possède un identifiant unique et pérenne (voir [guide-de-saisie-des-elements-de-metadonnees-inspire-v2.0-allege.pdf](#))

Les formalismes

Une variété de formalisme sont utilisés pour représenter la structure et le comportement des objets ou des phénomènes du monde réel :

- Les modèles Entité-Relation, par exemple le langage de modélisation de données EXPRESS ([Lien 1](#))
- Les Entité-Types peuvent être représentées comme les Classes d'un Modèle Objet. A titre d'exemple, le modèle IFC définit chaque élément d'un bâtiment comme une classe, par exemple IfcWall ou bien IfcDoor ou bien le Modèle Objet de l'OGC qui définit la Classe Feature pour représenter un phénomène réel (par exemple, un bâtiment, une rivière ou une route).
- Le format JSON ou JavaScript Object Notation étant devenu un standard de fait pour représenter les structures de données manipulées par les APIs, des versions « JSON » des Modèles Objets standardisés ont été développées. Par exemple CityJSON ou bien NGSI-LD. Cette évolution facilite la représentation des relations entre objets JSON sous forme d'hyper-liens. Plusieurs formats hypermédia basés sur JSON ont été définis, par exemple JSON :API ([Lien 2](#)).
- Comme les jumeaux numériques doivent changer d'état pour refléter des changements dans le monde réel, il n'est pas suffisant de modéliser la structure des objets du monde réel, mais aussi leur comportement. Par exemple, le Web of Things (WoT) fournit des métadonnées normalisées pour modéliser le comportement des objets du monde réel à différents niveaux de granularité (voir [Lien 3](#)).

	<p>WoT introduit une abstraction simple pour représenter les interactions. Le méta modèle du WoT définit les concepts d'événements et d'actions qui permettent de représenter le comportement d'un jumeau numérique.</p>
<p>La standardisation des modèles</p>	<p>Une modélisation spécifique à un JN est toujours possible en appliquant une méthodologie d'analyse et de conception d'un système, par exemple avec les formalismes E/R, UML ou bien SysML.</p> <p>Comme la connaissance d'un domaine capturée dans un modèle peut être utilisée pour construire plusieurs jumeaux numériques, la réutilisation de modèles standards peut accélérer et le développement des JN. On citera notamment le programme Smart Data Models dirigé par FIWARE, Open & Agile Smart Cities, IUDX et TM Forum.</p> <p>Les Modèles Objet standards développés par l'OGC ou bien les IFC peuvent non seulement faciliter le développement des modèles de JN, mais aussi faciliter leur interopérabilité grâce à la définition d'une sémantique partagée.</p>
<p>La plateforme logicielle</p>	<p><i>Un JNT repose sur une plateforme logicielle qui elle-même peut intégrer d'autres plateformes logicielles de différents types. Les plateformes les plus couramment utilisées par les jumeaux numériques du territoire sont de type SIG, BIM et NGSI-LD.</i></p>
<p>Couche d'intégration</p>	<p>Ces 3 types de plateformes ne sont pas exactement au même niveau : le SIG est très spécialisé sur le domaine géographique avec faible, voire aucune capacité temporelle, le BIM est très précis au niveau du bâtiment ou de l'objet d'art mais s'étend assez peu au niveau de la ville sauf si il est intégré avec une plateforme SIG ou bien NGSI-LD.</p> <p>Un JN peut fédérer plusieurs jumeaux numériques dont les modèles peuvent être différents. Il devient alors important d'assurer l'interopérabilité entre ces modèles. Dans le cas où un même objet du monde réel est représenté différemment, il est critique de gérer son identité afin que ses différentes présentations fassent bien référence au même objet réel.</p> <p>Par exemple un bâtiment aura une représentation différente dans un modèle géographique et dans un modèles BIM et le système d'identifiant devrait permettre de savoir qu'il s'agit de la même occurrence de bâtiment.</p> <p>Les principaux standards proposent des formats d'échanges qui facilitent l'intégration de composants hétérogènes. Par exemple NGSI-LD qui repose sur un méta-modèle standard et peut être décliné en structures de données de type JSON est particulièrement adapté pour la publication d'APIs REST.</p>

Données et métadonnées	<p>Les données échangées sont décrites par des méta-modèles qui sont utilisables par les humains et les machines. Ces métadonnées sont utilisées pour établir des correspondances entre des structures de données formatées différemment. La signification des métadonnées peut aussi être décrite dans des ontologies. Les données peuvent provenir d'autres JN ou espaces de données alimentés par connecteurs d'espaces de données ou Data Space Connectors.</p>
Méta modèles ou ontologies	<p>Comme chaque plateforme logicielle vient avec son propre modèle de données, leur intégration devient un problème majeur même si les standards peuvent aider. Les méta-modèles de données ou ontologies sont des éléments clefs qui facilitent la définition de correspondance entre des données dont la signification et le format peuvent varier. Ils définissent les données présentées dans les dictionnaires de données utilisées par le Jumeau.</p>
Modules applicatifs	<p>La ou les plateforme(s) logicielle(s) sur laquelle le JN repose permet le développement de modules applicatifs qui implémentent les cas d'usage des collectivités territoriales. Ces modules applicatifs peuvent intégrer des librairies logicielles externes et aussi appeler des services externes.</p>
API	<p>Les modules applicatifs consomment les services exposés par la plateforme logicielle du JN et peuvent aussi consommer des services externes au travers d'APIs qui sont le plus souvent de type REST (<i>REpresentational State Transfer</i>). REST est un style d'architecture logicielle définissant un ensemble de contraintes à utiliser pour créer des services web.</p> <p>La plateforme JN ainsi que les modules applicatifs exposent des APIs le plus souvent de type REST.</p>
Interface Utilisateur	<p>Les utilisateurs du JN interagissent avec lui au travers d'interfaces utilisateurs qui peuvent être de différents types. Par exemple les Interfaces utilisateur graphiques (GUI), les interfaces conversationnelles basées sur des échanges en langage naturel, ou bien les moteurs de jeu qui intègrent des systèmes complets pour créer des interfaces utilisateur (UI) dans l'environnement graphique du jeu.</p>

2.5 Exemples d'implémentation.

Jumeaux numériques basés sur le SmartCity / standard NGSI-LD

La figure ci-dessous montre comment le modèle d'un objet réel est spécifié en utilisant les principes de la SmartCity et en particulier le standard NGSI-LD. Les objets du monde réel sont représentés comme des Entité ayant de Propriétés ainsi que des Relations avec d'autres Entités.

Un Context Broker FIWARE peut implémenter un modèle de type NGSI-LD au travers des APIs qu'il fournit. Le standard NGSI-LD peut aussi servir de standard d'échange.

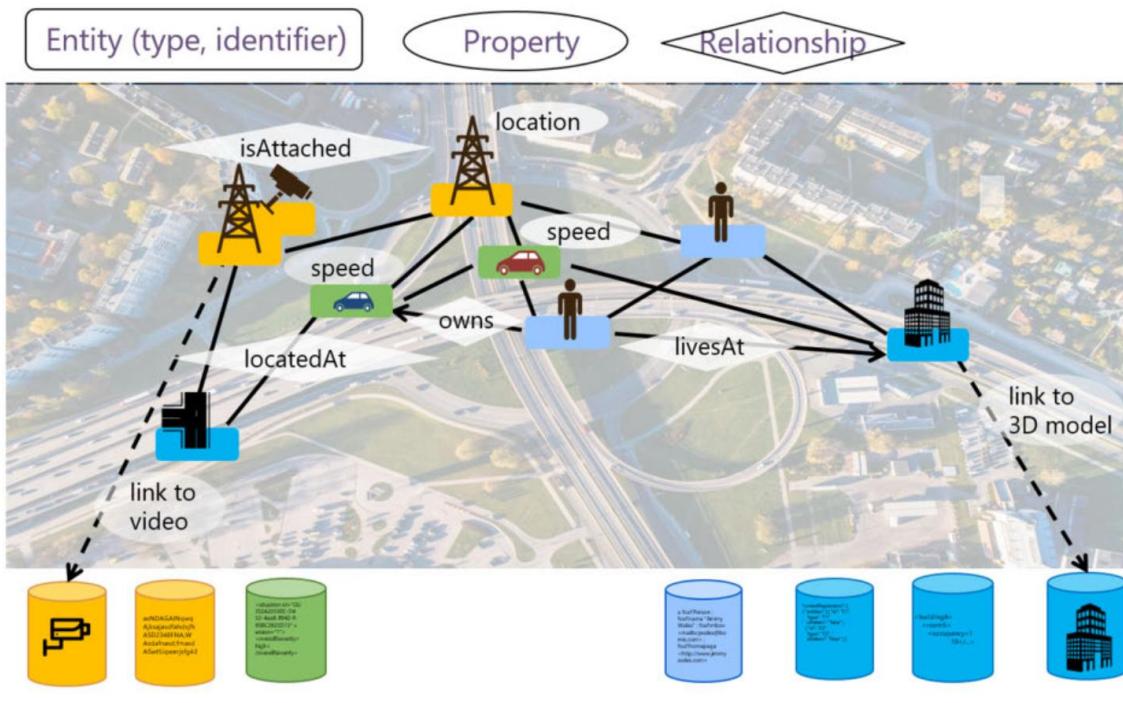


Photo by Aleksejs Bergmanis from Pexels

All clipart is under Creative Commons BY 4.0 Licence from <https://www.svgrepo.com>

Fig 3. Figure citée dans l'article de Martin Bauer et al., *Urban Digital Twins – A FIWARE-based model*.

Implémentation et fédération

Un Context Broker FIWARE comme Orion, Stellio ou Scorpio implémente un modèle NGSI-LD par appel des APIs que celui-ci fournit.

La figure ci-dessous illustre comment un JN, par exemple celui de la mobilité urbaine peut fédérer d'autres JNs.

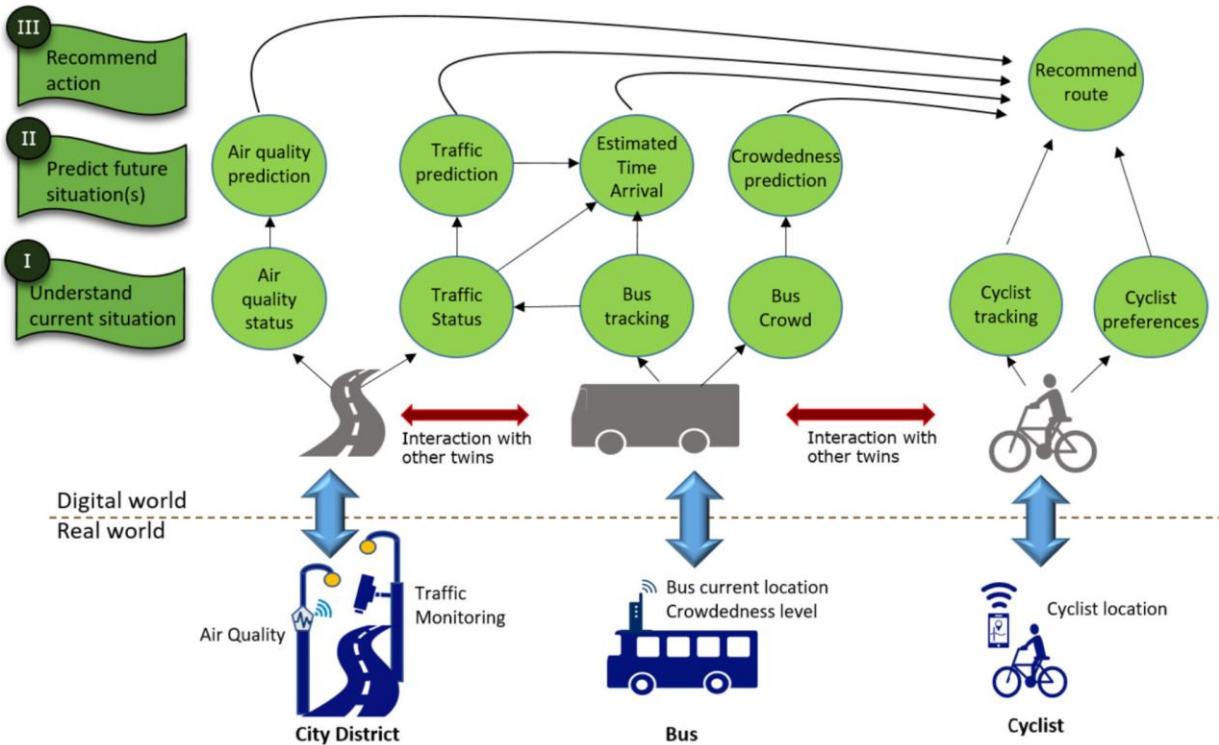


Fig 4. Une fédération de JN

Standardisation des interactions

Un Context Broker FIWARE peut aussi agir comme un middleware qui intègre les données de plusieurs JN, voir figure 5.

Le standard NGSI-LD joue alors le rôle de standard d'échange pour standardiser les interactions entre JNs. Un JN qui n'utilise pas NGSI-LD publie des APIs qui permettront de l'intégrer dans une fédération.

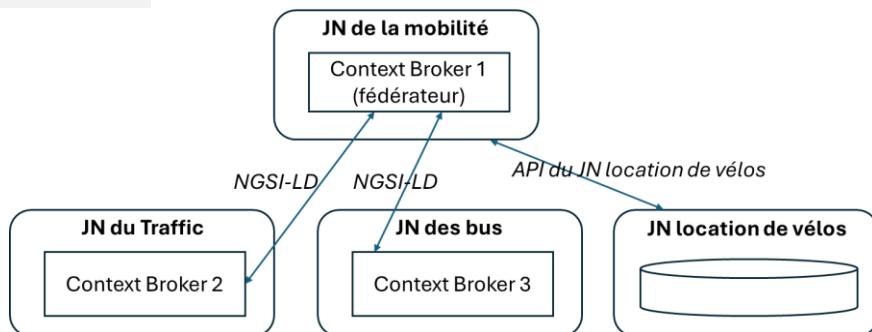


Fig 5. Fédération de JNs

Jumeaux numériques basés sur une plateforme SIG

SIG pour la modélisation du territoire

Exemple GIROS

Pour les JNTs des collectivités territoriales, la représentation géographique du territoire revêt une importance particulière. C'est pourquoi beaucoup de JNT de territoire reposent sur un Système d'Information Géographique.

L'Open Geospatial Consortium (OGC) développe et promeut des normes ouvertes pour les données géospatiales. Une plateforme logicielle géographique comme arcGIS ou bien QGIS définit une hiérarchie de classes qui comprend :

- Des Couches (Layer)
- Des Entités (Feature) pour représenter une entité géographique avec géométrie et attributs comme un bâtiment.
- Des projets et cartes qui contiennent toutes les couches, styles, et paramètres d'un projet ainsi que les Canvas pour gérer l'affichage cartographique.

Les objets du monde réel du territoire comme les bâtiments ou bien les routes sont représentés par des entités (Feature).

GIROS est basé sur la plateforme SIG Open Source QGIS ([Lien 1](#)) qui implémente le modèle du comportement du fleuve Garonne depuis Bordeaux jusqu'à l'embouchure, voir la figure 6 ci-dessous.

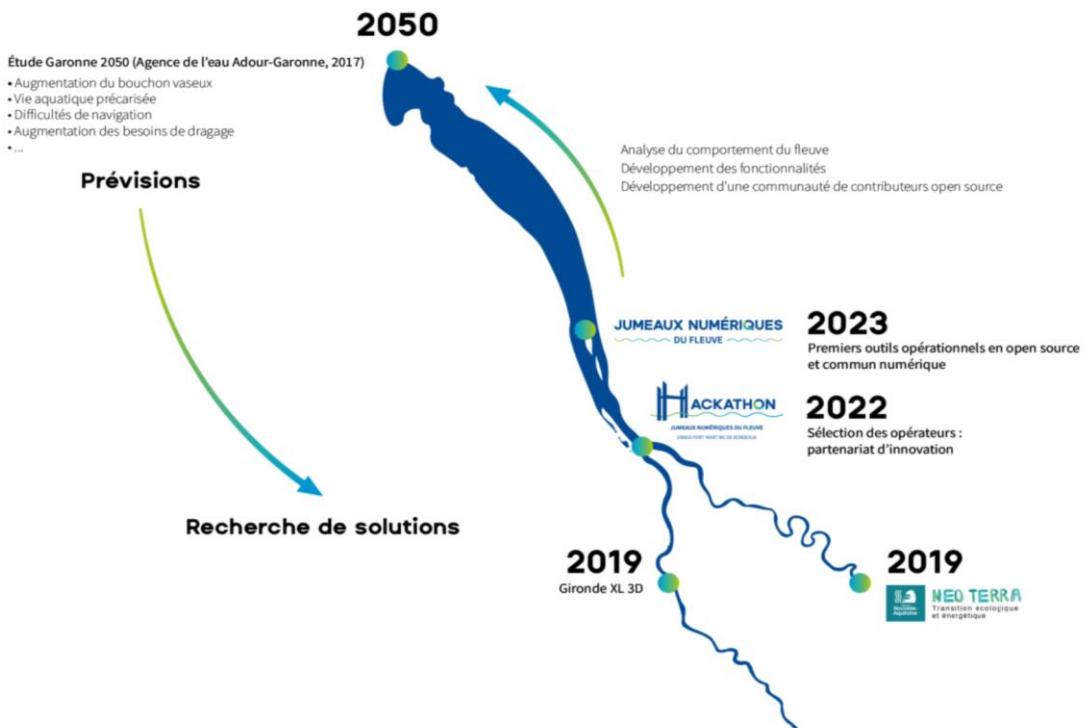


Fig 6. Jumeau Numérique du fleuve Garonne

<p>Cas d'usages</p> <p>Le JN GIROS modélise et anticipe l'évolution de l'estuaire de la Gironde. Grâce aux technologies de simulation il prédit les flux hydrosédimentaires, la qualité de l'eau et la biodiversité et aide à la prise de décision pour une gestion durable du territoire. GIROS comprend cinq modules applicatifs interconnectés :</p> <ul style="list-style-type: none">• Consultation des données du fleuve : accès aux données environnementales et hydrologiques.• Projection climatique : simulation des impacts du changement climatique selon les scénarios du GIEC.• Navigabilité et dragage : outils pour optimiser les opérations portuaires et la sécurité de la navigation.• Études environnementales : aide à la décision pour les aménagements et la gestion durable.• Modélisation hydrosédimentaire : prévision des flux, qualité de l'eau, biodiversité. <p>Déploiement technique</p> <p>GIROS utilise la plateforme WebSIG qui fournit une Interface cartographique interactive pour visualiser les données et les simulations.</p> <p>Les données sur l'estuaire sont collectées par la télédétection par satellite et capteurs mobiles. L'IA joue un rôle clé :</p> <ul style="list-style-type: none">• Simulation de 120 capteurs virtualisés.• Analyse prédictive pour anticiper les impacts d'un événement (tempête, crue, sécheresse).• Optimisation pour proposer des solutions pour limiter les risques ou améliorer la résilience.• Apprentissage continu pour que le système s'améliore avec l'ajout de nouvelles données.• Analyse prédictive pour anticiper les impacts d'un événement (tempête, crue, sécheresse). <p>Jumeaux numériques basés sur le BIM.</p> <p>Le BIM est utilisé pour représenter avec différents niveaux de détail les actifs bâti :</p> <ul style="list-style-type: none">• Modélisation initiale. Le BIM fournit une base géométrique et informationnelle précise de l'actif bâti.• Collaboration. Le BIM facilite la coordination entre les acteurs du projet. <p>Grâce aux formats ouverts comme IFC développés par BuildingSMART France (auquel MINnD a contribué depuis 2019), les données BIM peuvent être intégrées dans des systèmes de jumeaux numériques.</p> <p>Interopérabilité.</p> <p>Prenons la plateforme open source iTwin pour illustrer l'architecture d'un JN basé sur le BIM. iTwin est un jumeau numérique d'infrastructure, mis en œuvre sous la forme d'une fédération de représentations numériques telles que des iModèles, des données représentant la réalité physique, des données de capteurs (IoT), etc.</p> <p>La plateforme iTwin.</p>	
---	--

<p>Modélisation</p>	<p>iTwin modélise les objets du monde réel dans des iModels spécifiés avec des Base Infrastructure Schemas (BIS).</p> <p>Les BISs sont utilisés pour modéliser :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les infrastructures physiques dans l'espace physique • Les systèmes fonctionnels mis en œuvre par les infrastructures physiques (usines de traitement) • Les entités non physiques (mais spatiales) liées aux infrastructures physiques (lignes de délimitation, lignes de quadrillage, etc.) • Les modèles mathématiques d'analyse et de simulation des infrastructures physiques • Les processus impliqués dans les flux de travail/workflows des projets de construction. • Les modélisations des domaines sont organisées en couches en fonction du caractère générique ou spécialisé du sujet traité, voir la figure 7 ci-dessous.
----------------------------	---

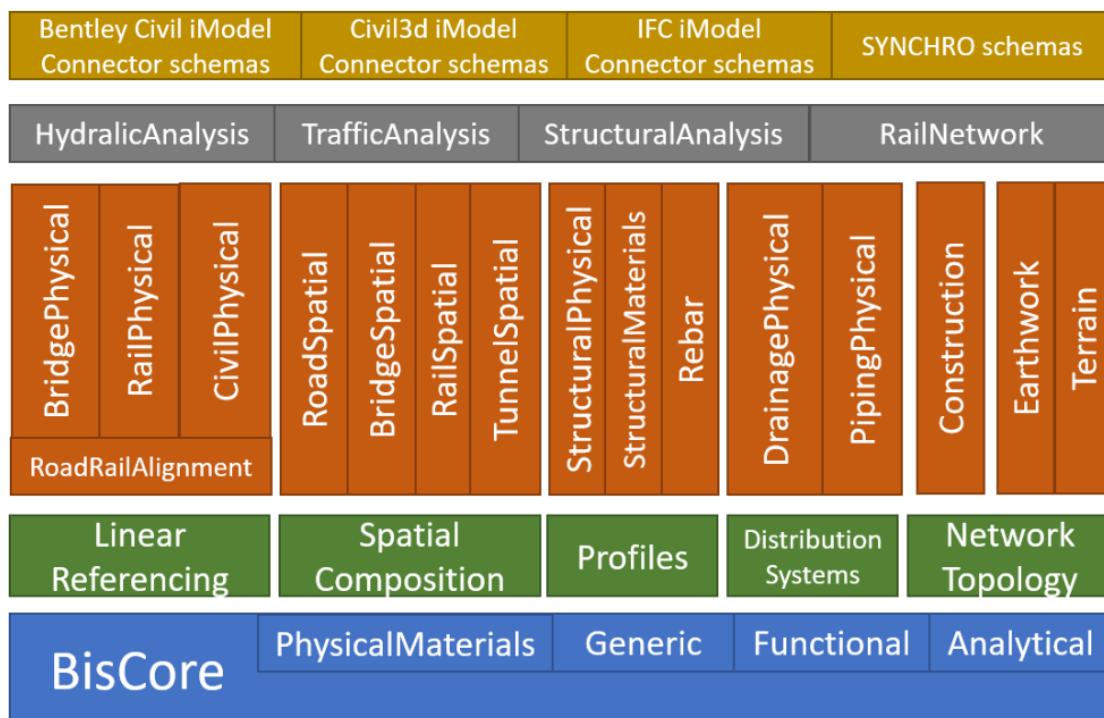


Fig 7. Modélisation en couche

Principes techniques

iTwin ([Lien 1](#)) prend en charge les IFC comme format d'interopérabilité. iTwin peut intégrer des modèles IFC en les synchronisant vers un iModel, afin de les visualiser. Une fois intégrés, ces contenus peuvent ensuite être réexportés en IFC si nécessaire.

Les BIS sont une famille de schémas « ouverte » et extensible. Elle est modularisée en domaines. Le domaine « BIS Core » exprime les concepts fondamentaux de la modélisation. Chaque domaine est exprimé sous la forme d'un schéma ECSchema distinct qui inclut BIS Core. Toute personne est autorisée à créer un nouveau schéma de domaine, à condition de respecter les règles et les directives établies dans cette documentation. Les utilisateurs peuvent également étendre les schémas de domaine en ajoutant des classes, des propriétés et des relations personnalisées.

Cette approche est comparable à celle des Smart Data Models de Fiware et permet de représenter le modèle d'un domaine métier avec NGSI-LD. Les deux utilisent d'ailleurs une modélisation de type Entité-Relation.

Principes techniques

iTwin prend en charge les IFC comme format d'interopérabilité. iTwin peut intégrer des modèles IFC en les synchronisant vers un iModel, afin de les visualiser. Une fois intégrés, ces contenus peuvent ensuite être réexportés en IFC si nécessaire.

Les BIS sont une famille de schémas « ouverte » et extensible. Elle est modularisée en domaines. Le domaine « BIS Core » exprime les concepts fondamentaux de la modélisation. Chaque domaine est exprimé sous la forme d'un schéma ECSchema distinct qui inclut BIS Core. Tout le monde peut créer un nouveau schéma de domaine en suivant les règles et les directives de cette documentation. Les utilisateurs peuvent également étendre les schémas de domaine en ajoutant des classes, des propriétés et des relations personnalisées.

Cette approche est comparable à celle des Smart Data Models de Fiware et permet de représenter le modèle d'un domaine métier avec NGSI-LD. Les deux utilisent d'ailleurs une modélisation de type Entité-Relation.

Chaque modèle peut être géolocalisé en utilisant un système de coordonnées géographiques.

Manipulations

Une fois le modèle d'un domaine spécifié, il peut être manipulé en utilisant ECSQL qui est une implémentation de SQL qui permet d'effectuer des opérations de type créer, lire, mettre à jour, supprimer. Ceci est comparable à l'utilisation des APIs NGSI-LD qui permettent aussi d'effectuer des opérations sur un modèle NGSI-LD. Une application iTwin comprend un back-end et un front-end, voir la figure 8 ci-dessous.

Adoption et pratiques

Pour plus d'informations sur l'adoption du jumeau numérique et ses premières mises en pratique nous vous conseillons la consultation des documents suivants :

- Adoption of digital twins : [Lien 2](#)
- Angers loire Metropole : [Lien 3](#)
- Jumeau numérique de la Gironde : [Lien 1](#) et [Lien 2](#)
- Valencia : [Lien 3](#)

Software Architecture – Web

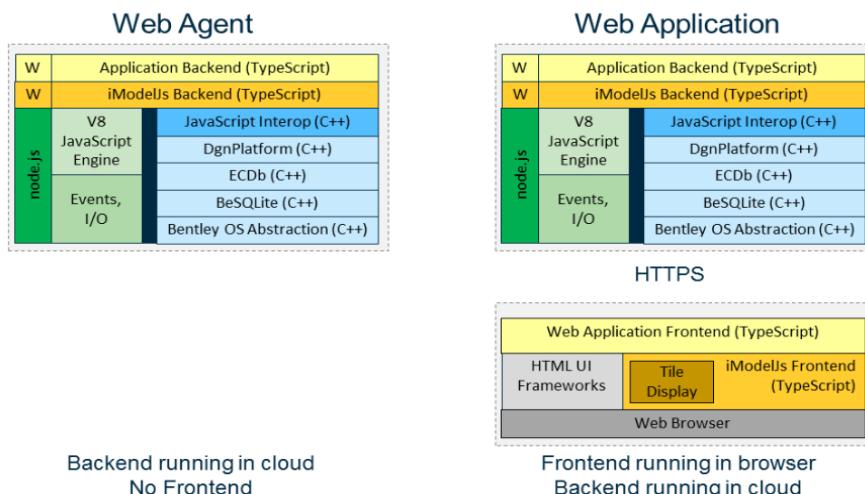


Fig 8. Architecture logicielle

2.6 Stratégies d'intégration à un SI existant

Du SI géographique au Jumeau territorial

Les JNT des territoires doivent souvent intégrer des modèles géographiques avec des modèles des actifs bâties du territoire. Une grande variété d'approches peut être utilisée. On citera notamment les deux approches suivantes basées sur le NGSI-LD et le CityGML

NGSI-LD

NGSI-LD définit dans son ontologie 'cross-domain' des propriétés géographiques par exemple pour localiser une Entité.

CityGML

CityGML définit des objets type par spécialisation de la classe 'Feature' pour représenter les bâtiments ou les parties distinctes d'un bâtiment. CityGML définit 5 niveaux de détail (LoD) et permet de représenter des géométries et des topologies exprimées en GML (Geography Markup Language).

Unification du modèle d'un JN du territoire.

La multiplicité des modèles d'un JNT du territoire aboutit à une situation où un même objet du monde réel peut avoir différentes représentations dans un même JN. A titre d'exemple un commerce peut être connu en SIG comme une adresse, une parcelle cadastrale ou par un propriétaire alors qu'il sera connu dans un

contexte BIM comme un ensemble de zones et de bien immeubles et enfin dans un contexte Smart comme un lieu d'activité auquel sont associés des capteurs.

Dans le cadre du jumeau numérique d'un territoire, il devient clef de gérer l'identité d'un objet du monde réel quelques soient ses différentes implémentations.

Systèmes d'identification

Les standards ont des exigences hétérogènes en ce qui concerne l'identification des objets, par exemple :

- Dans NGSI-LD, chaque entité, propriété ou relation doit être identifiée par une URN ou Uniform Resource Name.
- CityGML demande que chaque entité (bâtiment, arbre, route, etc.) soit dotée d'un identifiant unique (gml:id), mais ne dit pas comment implémenter cet identifiant unique.
- Chaque entité IFC possède un attribut GlobalId, qui est un identifiant unique généré automatiquement. Le standard ne dit rien sur la manière de générer cet identifiant unique.

En l'absence d'un système d'identification commun, il sera impossible de déterminer par exemple si une instance de bâtiment CityGML représente ou non le même bâtiment dans le monde réel qu'une instance de ifcBuilding.

Mécanismes d'identification

Plusieurs mécanismes se mettent en place pour aider à la résolution de ce problème, par exemple :

- La directive INSPIRE demande que chaque objet géographique soit doté d'un identifiant unique, persistant et non ambigu et recommande l'utilisation d'un URI (Uniform Resource Identifier).
- En France La BDNB (Base de Données Nationale de Bâtiments) est un référentiel qui regroupe tout ce qui concerne chaque bâtiment et qui l'identifie de manière unique.

Grâce à la BDNB, une instance de bâtiment CityGML et une instance d'ifcBuilding pourront faire référence au même bâtiment en utilisant ce référentiel partagé.

Limite pour l'unification totale	<i>L'unification totale du modèle d'un JNT n'est souvent ni réalisable ni rentable.</i>
Convergence géométriques des modèles	<p>En effet, même s'il est possible de traduire partiellement un modèle BIM dans son équivalent géographique (ou l'inverse) sa complète traduction est ré-implémentation n'est ni possible, ni souhaitable. Chaque standard est porté par des communautés d'experts distinctes et répond à des objectifs et des usages spécifiques. Des composants logiciels deviendraient impossible à réutiliser en cas de changement de leur modèle sous-jacent.</p> <p>Au même titre que la convergence des modèles de données, la convergence géométrique peut être nécessaire suivant les systèmes utilisés.</p> <p>Les paragraphes suivants présentent de manière sommaire un exemple de processus d'intégration des objets BIM dans le cadre d'un projet Jumeau Numérique à dominante géographique.</p>

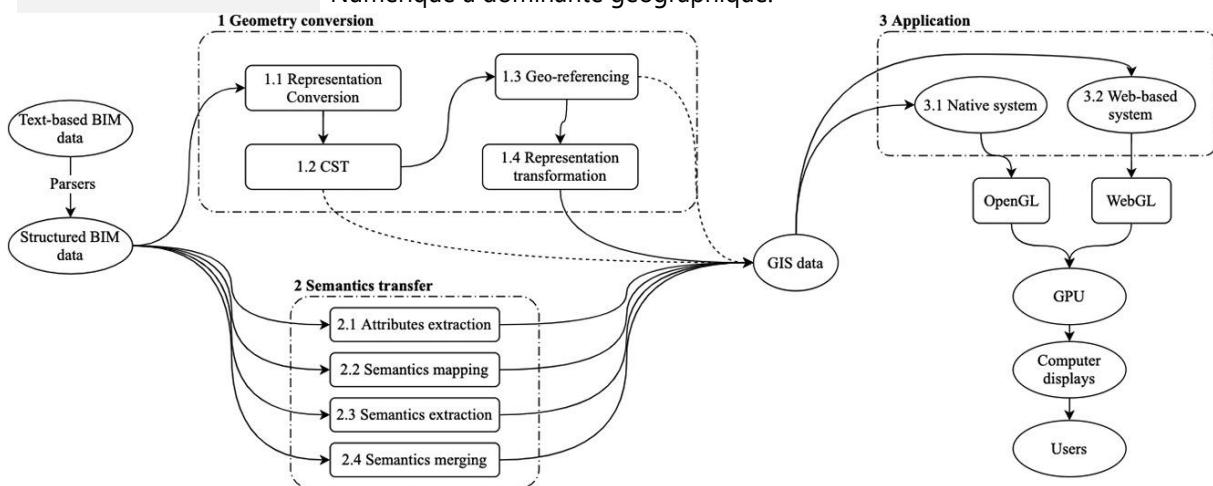


Fig 9. BIM/GIS data integration from the perspective of information flow (Author: Junxiang Zhu,Peng Wu - April 2022)

1- Géoréférencement préalable	Les modèles BIM (souvent au format Revit ou IFC) doivent être géo-référencés pour s'insérer correctement dans l'environnement SIG.
2 -Transformation classes	L'utilisation d'un outil pour transformer les fichiers BIM en classes d'entités spatiales permet d'exploiter les objets BIM dans un modèle géographique.
3- Création de couches	Les objets BIM sont regroupés en couches prêtes à être visualisées en 3D dans le SIG.
4 -Publication	Les couches de bâtiment sont converties en Scene Layer Packages (.slpk), puis publiées dans le système SIG pour rendre le JNT interactif.

Limites sur l'unification géométrique

Là encore il apparaît illusoire de vouloir faire converger la totalité des modèles géométriques qui ont leurs utilités propres et des niveaux de détail adapté aux usages.

Dans une logique de sobriété on tendra ainsi à favoriser des transcriptions partielles des données nécessaires aux cas d'usages identifiés.

Documents de références

Pour plus d'informations sur ces sujets, nous vous conseillons la lecture des documents suivants :

- Fiware : [Lien 1](#), [Lien 2](#) et [Lien 3](#)
- LDT Toolbox specifications : [Lien 4](#)
- European Data SSpace for Smart COmmunities (DS4SC) : [Lien 5](#) et [Lien 6](#)

3. CRITÈRES D'ANALYSES DES CAS D'USAGES

3.1 Briques conceptuelles simplifiées

3 catégories de composants

Les briques liées à la donnée

Afin de faciliter l'analyse conceptuelle ainsi que les liens entre les cas d'usage et les briques techniques, il est proposé dans ce document de simplifier les composants technique du JNT en les regroupant en 3 catégories.

Cette catégorie regroupe à la fois les données brutes que les composants nécessaires à la gestion, au catalogage, au stockage des données. Les éventuels canaux de collecte (IoT, satellite, mobile...) sont également inclus dans cette catégorie.

Le briques d'analyse

Cette catégorie regroupe l'ensemble des modèles de données, traitements algorithmiques (géomatique, IA ML/DL) ou analyse de type simulation utilisés pour valoriser ou enrichir la donnée.

Les briques d'interface, de restitution ou de visualisation

Cette catégorie rassemble les éléments d'interfaces utilisateurs (Front) permettant d'interagir avec le jumeau que ce soit via un logiciel dédié ou une application tierce. Cette catégorie regroupe toutes les problématiques de restitution de type DataViz, BI et 3D/VR/VA.

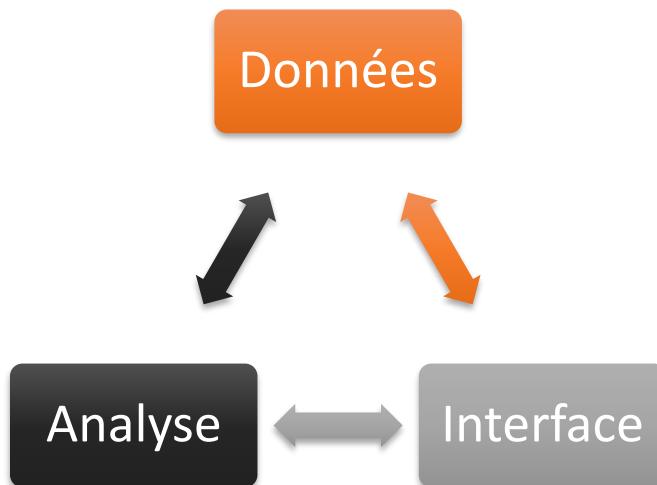


Fig 10.Catégories de composants génériques

3.2 Cible utilisateur

Quels sont les utilisateurs cibles ?

Les travaux du groupe de travail ont en effet mis en évidence la versatilité des approches et modes de restitution permettant d'adresser autant des usages experts que des usages grands publics.

L'identification de la cible ou des cibles utilisateurs apparaît comme essentiel pour la mise en œuvre pertinente d'une stratégie de type jumeau numérique de territoire.

De l'expert au grand public

A titre d'exemple sur une même thématique de l'analyse des risques, on peut à la fois imaginer l'utilisation de moteurs simulation permettant de prédire l'impact d'évènements et de concevoir des scenarios de gestion (cible experte) ou à l'opposé des outils de sensibilisation aux risques à travers des vues pédagogiques avec un degré de liberté pour mesurer l'influence de certains facteurs (grand public).

Cibles prioritaires / secondaires

La cible utilisateur n'est toutefois pas forcément unique. En effet l'outil peut cibler une cible primaire tout en permettant d'adresser une cible secondaire à travers une vision plus limitée, simplification ou interface dédiée. À titre d'exemple, un agent territorial au profil technique pourra ainsi tester et évaluer une multitude de scenarios à travers une interface s'appuyant sur le jumeau numérique d'où seront extrait uniquement quelques scenarios clefs qui pourraient être présentés à un élu ou partie prenante sans que celui-ci ait forcément accès aux capacités d'analyse du jumeau.

Influence sur l'architecture et standards

Les choix en matière d'utilisateurs cibles auront des influences fortes sur :

- Les données (haut degré de fiabilité, complexité des données, ...)
- La brique d'analyse (calcul d'indicateur, modèle de données, complexité moteur de simulation...)
- La brique de restitution / visualisation (visuels simple ou complexe, place laissée à l'intelligence de la donnée, ergonomie)

Quelle place pour la conception et élaboration de scenarios ?

Capacité de création

La capacité laissé à l'utilisateur de modifier des paramètres voire de faire évoluer le référentiel du territoire dans une optique de « test » de situations futures ou de scenarios alternatif apparaît comme un élément structurant fortement les choix techniques.

En effet, la liberté de créer des états alternatifs du modèle induit des interfaces et des outils de conception ou paramétrage directement dans l'interface utilisateur. Ces outils destinés à créer de nouvelles valeurs ou éléments de modélisation induit de maîtriser les formats de données cibles et une gouvernance des scénarios créées pour maîtriser ces créations de données.

<p>Influence sur l'architecture et standards</p> <p>Quel besoin de construction d'un récit territorial ?</p> <p>Le jumeau comme support à une vision sensible du territoire</p> <p>Influence sur l'architecture et standards</p> <p>Enjeux de gouvernance</p>	<p>Ce choix aura ainsi des influences fortes sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les données (standardisation, interopérabilité, gouvernance de la donnée) • La brique de restitution / visualisation (interface permettant la création de jeux de données) <p>Un point essentiel à aborder ici est la place plus ou moins forte laissée au « récit » dans l'accompagnement du jumeau.</p> <p>En effet le dialogue avec les services des collectivités suite aux échanges du GT CNIG/MINnD2050 montre que l'on attend rarement de l'outil une décision ferme sur la solution à adopter.</p> <p>Le plus souvent, le jumeau apparaît comme un outil permettant l'aide à la décision en fournissant un panel d'information, d'indicateurs et d'analyses convergeant vers un panel de solutions et leurs impacts. La solution ou orientations choisies devront ainsi pouvoir s'appuyer sur un récit construit à partir de cette connaissance.</p> <p>Pour illustrer cela, on peut prendre l'exemple de jumeau de visualisation de territoires grands publics pour lesquels on retrouvera des zooms par thématiques et par territoire à partir desquels nous sommes invités à découvrir une problématique, un contexte et projet associés. Dans le cas présent l'outil est au service d'une certaine pédagogie ou communication au service d'un projet ou d'un territoire.</p> <p>Ce choix aura ainsi des influences fortes sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La brique d'analyse (niveau de complexité) • La brique de restitution / visualisation (capacité à scénariser l'expérience utilisateur et à documenter/commenter les éléments clefs) <p><i>La responsabilité des données et la gestion des droits sont des aspects cruciaux dans le contexte des jumeaux numériques des territoires.</i></p> <p>On notera particulièrement les points suivants comme clefs dans la gestion de la gouvernance de ces systèmes :</p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>Définition des Propriétaires</i>: Il est essentiel de clairement définir qui possède les données utilisées dans les jumeaux numériques. Cela peut inclure des gouvernements locaux, des entreprises privées, des institutions académiques et des citoyens, ... – <i>Droits de Propriété</i>: Les droits de propriété doivent être établis pour éviter les conflits et assurer que les données sont utilisées de manière appropriée et légale. – <i>Politiques d'Accès</i>: Des politiques d'accès doivent être établies pour définir qui peut accéder aux données et dans quelles conditions. Cela peut inclure des niveaux d'accès différents pour différents types d'utilisateurs.
--	--



- *Utilisation Éthique* : Les données doivent être utilisées de manière éthique, en évitant les biais et les discriminations. Cela implique des directives claires sur l'utilisation acceptable des données.
- *Respect des Lois* : Les jumeaux numériques doivent respecter les lois et réglementations en vigueur, y compris celles sur la protection des données et la cybersécurité.
-

Ces enjeux auront des influences fortes sur :

- Les données (gestion des droits, gestion des contrats/convention – smart contract, transactions, traçabilité de la propriété et des traitements...)

3.3 Modèles de complexité



Les usages des jumeaux numériques des territoires peuvent avoir plusieurs modèles de complexité. Il est à noter qu'il s'agit bien d'une taxonomie par d'une hiérarchisation / modèle de maturité.

Les 5 modèles identifiés sont les suivantes :

- Descriptif - Comprendre
- Prédictif - Analyser
- Prospectif - Simuler
- Prescriptif - Agir
- Diagnostique - Contrôler la pertinence

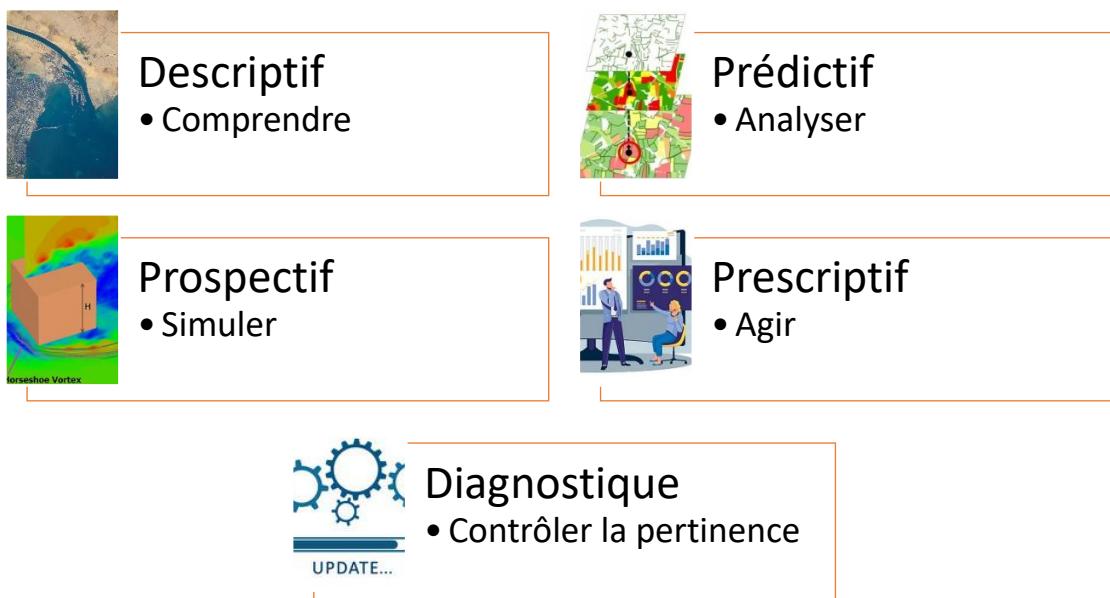


Fig 11. Modèles de complexité des Jumeaux Numériques

Descriptif	<p>Ce premier modèle consiste en la visualisation statique d'un territoire (à l'aide de données dites froides), réalisée à l'aide d'outils tels que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ou la modélisation 3D... L'objectif principal est de faciliter la compréhension de l'organisation spatiale du territoire et de ses composantes (Bâtiments, routes, ...).</p>
Prédictif	<p>Ce second modèle consiste à Intégrer et utiliser des données dynamiques (dites chaudes) pour faire des analyses prédictives de l'évolution du territoire et phénomènes écologiques et/ou urbains (prévision des risques environnementaux comme les inondations, la pollution, trafic routier, mobilité, ...). Les données utilisées sont issues généralement de capteurs IOT et sont traitées et analysées par des modèles d'intelligence artificielle. L'objectif principal de cet usage est de fournir une aide à la décision.</p>
Prospectif	<p>Ce troisième modèle consiste à utiliser les données existantes (froides et chaudes) d'un jumeau numérique de territoire pour tester différents scénarios possibles (aménagement, évaluation de l'impact des politiques publiques et des projets d'infrastructure). Le principal objectif est d'anticiper les évolutions futures en intégrant des données en temps réel et des modèles prédictifs. Grâce aux simulations, les décideurs peuvent optimiser l'usage des ressources, améliorer la résilience face aux crises (climatiques, économiques, sanitaires) et favoriser une approche durable du développement territorial.</p>
Prescriptif	<p>Ce quatrième modèle consiste à exploiter le jumeau numérique pour optimiser la gestion opérationnelle des territoires en s'appuyant sur notamment sur des outils l'analyse avancée des données et de l'intelligence artificielle. Le principal objectif est de faciliter la gestion, voire d'automatiser la prise de décision en proposant des recommandations précises aux gestionnaires des collectivités et aux entreprises. Grâce à l'intégration de capteurs en temps réel et à des outils adaptés, ce niveau facilite l'anticipation des dysfonctionnements, l'optimisation des flux (énergie, transport, eau) et l'amélioration de la résilience des territoires. Il offre ainsi une gestion proactive, réduisant les coûts, les risques et les impacts environnementaux tout en améliorant la qualité de vie des citoyens.</p>
Différents modes d'actions	<p>Il est intéressant de souligner ici que ce modèle peut lui-même être sous-découpé sous plusieurs formes liées au degré d'autonomie du système. On citera à minima les degrés suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aide à la décision (prise de décision autonome par l'utilisateur) • Alerte et actions semi-automatiques (validation par l'utilisateur) • Actions autonomes (prise de décision autonome du système, eg. J'orienté un usager vers une place de parking qui vient de se libérer)

Diagnostique

Contrôle de la pertinence / correction

Ce niveau représente l'usage le plus avancé des jumeaux numériques, permettant une évaluation continue de la performance et de la pertinence des actions mises en place.

Il repose sur des boucles de rétroaction, combinant analyse des écarts, détection d'anomalies et ajustements automatisés. Grâce à des techniques avancées d'analyse de données, le jumeau numérique devient un outil d'audit et d'amélioration continue, garantissant que les stratégies territoriales restent alignées avec les objectifs fixés. Le principal objectif est l'adaptation en permanence des politiques publiques, des infrastructures et des services, en assurant une gouvernance fondée sur des données fiables et dynamiques.

3.4 Question d'échelle spatiale et temporelle

Dimensions du jumeau

Le jumeau numérique territorial vise à comprendre le territoire, ses dynamiques, à se projeter sur des scénarios d'évolutions voir à agir de manière éclairée en situation de crise. Les travaux du groupe de travail ont montré que ces différents niveaux d'usages induisent deux critères clefs pour la définition et la mise en œuvre d'un jumeau territorial.

Dimension spatiale

Premièrement, il apparaît comme critique la prise en compte des échelles d'analyse : de la parcelle foncière à la vision régionale ou nationale, il est attendu du jumeau une capacité à discréteriser ou à consolider la donnée suivant les différents prismes attendus des acteurs.

Les objets « métiers » visés par le jumeau numérique doivent également être bien définis (par exemple pour un réseau d'eau, faut-il modéliser uniquement le réseau souterrain ou aussi les foyers comme points de consommation, les centres de traitement, les nappes phréatiques, les données météorologiques etc.)

Dimension temporelle

Deuxièmement, la dimension temporelle revient très fréquemment comme critère clef pour la caractérisation de l'architecture de données associée au jumeau. L'analyse de configurations du territoire dans le passé, le présent ou le futur ainsi que le lien avec les données chaudes venant du terrain, de capteurs ou de données massives (valideurs transports, réseaux mobiles...) semblent autant de critères dimensionnant pour le système d'information à élaborer.

Échelle et zoom

L'analyse des cas d'usages cibles pour le jumeau numérique développé par la Groupe de Travail a montré que les périmètres d'études varient dans un grand nombre de cas : échelle du bâtiment, du quartier, élément d'infrastructure ou réseau dans son ensemble, commune ou métropole sont d'autant d'échelle d'analyse pertinentes suivant le public adressé.

Un même cas d'usage doit le plus souvent permettre un niveau de zoom fin permettant de voir son lieu de résidence, le projet ou un objet du territoire mais il devra pouvoir être contextualisé, relié et comparé aux éléments proches ou situés

Petite échelle	<p>dans la même zone d'étude. L'enjeu sera ici de trouver un équilibre entre clarté et fidélité en réponse au cas d'usage.</p> <p>Les échelles les plus importantes pourront ainsi adresser des problématiques France entière (ex : dynamiques changement climatique), aux grands bassins versants (ex : gestion de la ressource en eau) ou aires métropolitaines (ex : dynamiques associées aux mobilités).</p>
Grande échelle	<p>Les échelles les plus fines peuvent descendre au quartier (îlots de chaleur urbain), au carroyage 200x200m type INSEE (ex : santé environnementale) voir inférieure au logement (ex : rénovation habitat) ou à l'objet urbain (ex : suivi consommation au mat éclairage).</p> <p>Pour l'exploitation des réseaux une échelle plus fine est nécessaire (1/200).</p>
Niveau de détail / LOD	<p>Au même titre que les échelles, le niveau de détail attendu sera lui aussi déterminant quant à la complexité des données souhaitant être analysées ou restituées à l'utilisateur. On voudra ainsi dans certains cas vouloir pour des simulations aérauliques uniquement l'enveloppe d'un bâtiment (LOD100) quand dans un cas d'analyse de risques incendie la modélisation fine (LOD300 ou plus) pourra s'avérer nécessaire.</p>
Influence sur l'architecture et standards	<ul style="list-style-type: none"> ● Ce facteur et capacité associées auront des influences importantes sur : <p>Les données (granularité, extrapolation/discréétisation ou agrégation)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● La brique de restitution / visualisation (dataviz, capacité navigation, tableaux de bord, BI)
Du passé au futur	<p>Il est attendu du jumeau numérique territorial d'apporter une connaissance d'un secteur permettant de nourrir les décisions influençant son futur. La dimension temporelle apparaît ainsi primordiale : piloter le présent, aller dans le passé et se projeter dans le futur.</p>
Présent	<p>La synchronisation avec le présent du jumeau est un élément intrinsèque à sa définition. Chaque cas d'usage doit ainsi pouvoir mobiliser un état le plus proche possible du territoire tel qu'il fonctionne. Cette capacité génère un référentiel vivant du territoire qui peut être important d'historiser. On peut citer en usages concentrés sur le présent les outils dédiés à la mobilité et aux réseaux de transport notamment.</p>
Passé	<p>L'historisation du présent induit par ailleurs la capacité à reprendre des configurations passées. Ces données peuvent également provenir de sources externes (cartes, études anciennes, analyses statistiques) permettant de « peupler » les bases de données plus anciennes. Ces deux sources permettront d'enrichir la profondeur de la connaissance d'un site, de dessiner des dynamiques d'évolution ou de nourrir des modèles prédictifs.</p>
Futur	<p>Enfin, la capacité de prédire ou de simuler des états futurs et leurs incidences mobilise la capacité du système à établir des états de références projetés. Ces scénarios pré-calculés ou ensemble de paramètres projetés doivent pouvoir ainsi être gérés comme d'autant de situations probables ou possibles. Ces gestions de</p>

Pas d'analyse
Influence sur l'architecture et standards
Instantané vs données froides ou agrégées
Données froides
Données chaudes
Données agrégées

configurations doivent faire l'objet d'une gouvernance permettant le partage entre plusieurs utilisateurs voire la prise en compte dans le cadre d'analyses croisées (influences sur la demande de transports de deux projets aménagements voisins par exemple).

Un dernier sous-paramètre lié à cette notion pourra être la question du pas de temps. On voit en effet que le nombre d'enregistrements de la vie du territoire sera un facteur important pour la finesse de l'analyse mais induira nécessairement un volume de donnée important, pénalisant la sobriété du système.

Ce facteur et capacité associées auront des influences importantes sur l'ensemble du système :

- Les données (granularité, extrapolation/discréétisation ou agrégation)
- La brique d'analyse (calcul d'indicateur, modèle de données, complexité moteur de simulation...)
- La brique de restitution / visualisation (dataviz, capacité navigation, tableaux de bord, BI)

La capacité du jumeau à traiter les données temps réelles est un élément clef du dimensionnement de son architecture. Il est ainsi important de qualifier le besoin de données chaudes ou instantanées issues de capteurs, données agrégées issues de ces mêmes systèmes (valeur mini, maxi, moyenne) ou données froides constituant les données de références du système étudié.

Les données froides ou de référentiel jouent un rôle crucial en fournissant des informations fiables et standardisées. Les données de référentiel sont des jeux de données officiels et fiables sur lesquels les collectivités peuvent s'appuyer pour leurs analyses et décisions. Parmi les données de référentiel, on trouve des informations comme le Registre parcellaire graphique (RPG), le plan de corps de rue simplifié (PCRS), le référentiel patrimonial de la commune ou le , le lidar HD de l'IGN

Les capteurs ou campagnes régulières de collectes de données terrains génèrent de grandes quantités de données qui doivent être gérées, sécurisées et intégrées dans les systèmes de jumeaux suivant les cas d'usages ciblés. Ces données peuvent être de sources multiples : capteurs de parkings, données GSM, flux vidéos, photos satellitaires journalières... L'accès aux données doit être facilité pour permettre leur réutilisation par différents services et acteurs. On notera toutefois des problématiques de sobriété de la donnée posées par ce type de sources du fait des nombreuses séries temporelles produites.

On pourra ainsi réduire une série de donnée en créant une donnée composite, indicateur ou extrait. On pourra ainsi calculer un taux d'occupation journalier maximum pour le parking, un nombre moyen de déplacement cycles sur la base de données GSM ou générer des mesures d'écart pour détecter des modifications entre deux images. Ces données agrégées présentent l'avantage de fournir des informations synthétiques et exploitables pour les utilisateurs et notamment les

Influence sur l'architecture et standards

décideurs publics. Elles ne véhiculent toutefois pas toute la richesse des données sources. Au-delà de l'évidente elles permettent de mieux comprendre les dynamiques territoriales et d'orienter les politiques publiques de manière plus efficace.

Les besoins en données chaudes ou agrégées pour les cas d'usages ciblés auront des influences fortes sur :

- Les données (disponibilité, traitement des suites temporelles, ...)
- La brique d'analyse (calcul d'indicateur, modèle de données, complexité moteur de simulation...)
- La brique de restitution / visualisation (capacité à accéder aux données d'un capteur ou à visualiser des évolutions temporelles, ergonomie)

En amont le recours à un ensemble de capteurs déployés sur le territoire nécessitera une réflexion globale sur les typologies de capteurs, protocoles de remontées de données et réseau associé cellulaires et non cellulaires (3G/4G/5G, LoraWan,...) ainsi que sur les potentiels plateformes de pilotage / agrégation de ces données de capteur.

3.5 Place de la 3D/BIM/SIG

Du bon usage de la 3D et du BIM

L'évolution de la pensée sur la thématique du jumeau numérique soulève des questionnements jusqu'ici laissés de côté dans les réflexions. L'un des points d'évolution majeur dans cette évolution concerne la place de la donnée 3D au sein du jumeau numérique. Effectivement, il est évident que le jumeau numérique n'est pas juste une maquette 3D, cette catégorisation initialement faite pour faciliter la communication sur la thématique est erronée.

Place de la 3D

Si on parle de jumeau numérique de territoire, il paraît important d'avoir une dimension altimétrique (Z) dans la représentation, en particulier dans les environnements urbains denses et /ou aux topographies variées. Selon les cas d'usage, cette dimension est essentielle. Elle apporte une immersion totale dans le territoire et facilite l'interprétation des données spatiales par les politiques publiques.

Ce paramètre est fortement lié au profil de l'utilisateur. Un utilisateur technique pourra se passer d'une visualisation 3D, mais l'absence de l'information altimétrique (donnée Z) compromettrait sa capacité à exécuter ses opérations ou processus métier de manière efficace.

À l'inverse, pour des profils moins technique tels que les élus ou le grand public la 3D facilitera l'appropriation des données complexes et soutient la prise de décision en rendant l'information visuellement intuitive.

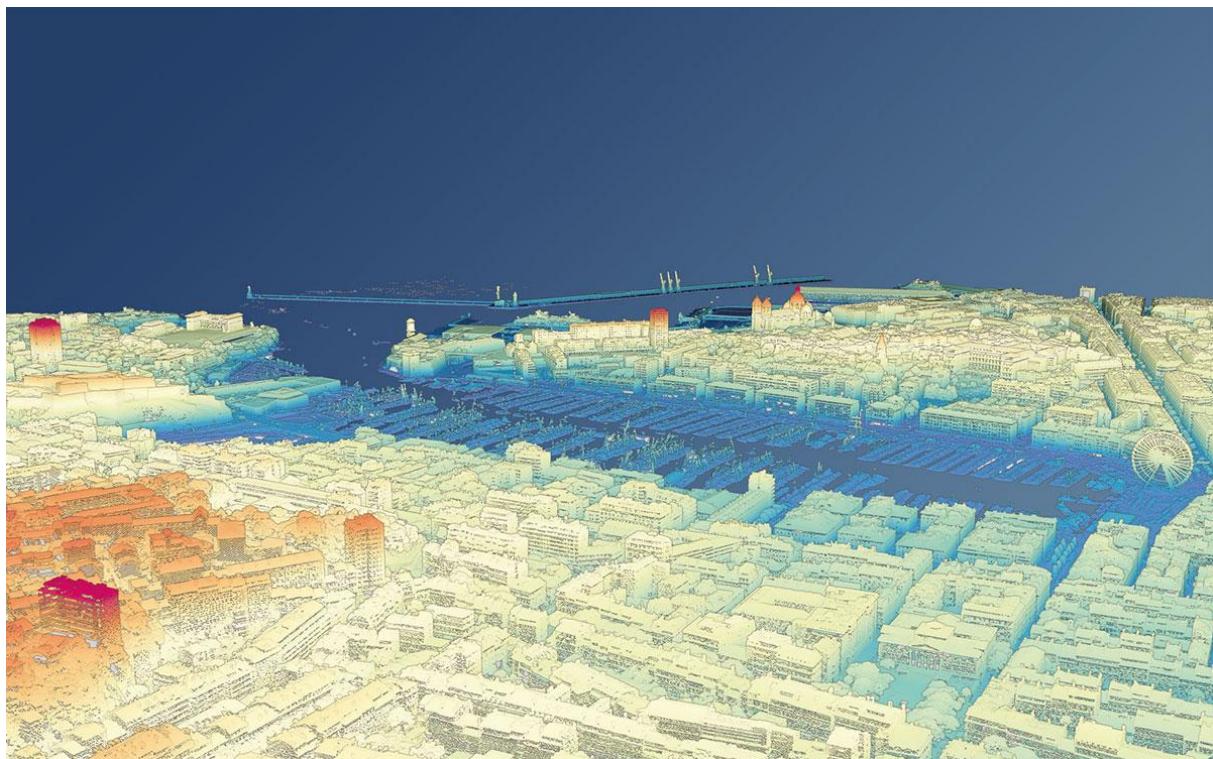


Fig 12. Vue du Lidar HD – IGN

Information et utilisation des données 3D et BIM

La donnée 3D reste une partie intégrante du jumeau numérique. En premier lieu, cette donnée est d'une grande importance dans l'affichage pour les problématiques à l'échelle micro, telles que la construction d'ouvrages et leur interaction avec les éléments préexistants, notamment via l'intégration de maquettes BIM représentant des projets d'aménagement futurs dans leur contexte territorial. En second lieu, la donnée 3D est d'une utilité indéniable dans les processus de calcul pour des données dépendantes de ce facteur (topographie, cartes de pentes, niveau des eaux, déplacement du son en ville, du vent, etc.), et pouvant d'ailleurs ne même pas être nécessairement utilisée dans la représentation finale.

Place de la 2D et de la cartographie

Il est tout à fait juste qu'un nombre important de cas d'usage sont bien plus adaptés pour une diffusion en format cartographique classique, principalement ceux mettant en scène des problèmes à l'échelle macro, par exemple la représentation de la mobilité ou encore les enjeux de développement durable à échelle régionale. L'autre grand point fort de la représentation cartographique est la simplicité de la couche servant de référentiel, permettant d'afficher des données complexes par-dessus et évitant la surcharge d'informations, améliorant ainsi l'expérience de l'utilisateur

Place du SIG

Le SIG contribue au jumeau numérique en fournissant un complément d'information géospatial permettant à la fois la gestion des données géographiques et topographiques et l'intégration des données contextuelles essentielles pour une représentation plus complète et précise du territoire.

La prise en compte de la précision géographique et de la fiabilité des données constitue un prérequis lorsqu'on aborde le rôle du SIG dans un jumeau numérique. Cette précision conditionne la qualité des analyse, la cohérence des modélisations et la pertinence des simulations produites par le jumeau numérique.

L'intégration de données 3D ou contextuelles basées sur les technologies SIG induiront de fortes contraintes sur les choix suivants :

- Les données (existence de données 3D du territoire type Lidar HD)
- La brique d'analyse (capacité des moteurs de simulation à intégrer des données 3D complexes)
- La brique de restitution / visualisation (capacité co-visualiser données 3D, SIG et autres sources de données générées par le jumeau). On pourra recourir ici à des technologies issues de jeux vidéo (game engine, VR, AR) pour offrir une expérience utilisateur enrichie et ergonomique.

Influence sur l'architecture et standards

4. CRITÈRES DE QUALITÉ ET INTEROPÉRABILITÉ DES DONNÉES

4.1 Géoréférencement

Place du géoréférencement	Le géoréférencement permet de placer un modèle 2D ou 3D dans un référentiel géographique exact, ce qui est essentiel pour l'intégration avec des données et la coordination avec d'autres disciplines du projet. Les propriétés du géoréférencement (système de référence, exactitude, point de référence, responsable) doivent faire partie des métadonnées des objets pour en assurer la traçabilité.
Standardiser les pratiques	Avec la multiplication des différents types de données venant s'ajouter dans les réflexions sur la thématique du jumeau numérique, et dont une grande partie sont des données contenant des coordonnées géographiques, il devient nécessaire de standardiser et de normaliser la notion de géoréférencement et la classe de précision devant lui être associée afin que les interactions entre ces données soient optimales.
Classes de précision	Dans une pensée mettant en avant l'efficacité, il est nécessaire de se baser sur des réglementations existantes et provenant du domaine d'expertise devant être à l'origine de toutes coordonnées géographiques, la topométrie. Concernant les réglementations en vigueur en France et dans la mesure où la réflexion sur le jumeau numérique a pour objectif d'être utilisée par des acteurs publics, l'arrêté du 16 septembre 2003 semble particulièrement indiqué. Cet arrêté porte sur la classe de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'Etat, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte.

4.2 Structuration et sémantique

Lien sémantique	Les liens sémantiques jouent un rôle crucial dans la création d'un jumeau numérique de territoire. Ils permettent de connecter différentes données et informations de manière significative, facilitant ainsi une compréhension plus profonde et plus contextuelle des relations entre les divers éléments du territoire.
Élargissement du potentiel d'analyse	En établissant des liens sémantiques, on peut non seulement améliorer l'interopérabilité des données, mais aussi permettre une analyse plus riche et plus nuancée des interactions complexes au sein du territoire. Cela est particulièrement important pour les applications qui nécessitent une intégration de données provenant de multiples sources et formats comme le SIG, le BIM ou les capteurs IoT.

Exemple de Porto

Dans le cadre du jumeau numérique de la ville de Porto, des liens sémantiques ont été établis entre les données de trafic, les données météorologiques et les données de consommation d'énergie. En s'appuyant sur les principes du Linked Data développés dans le cadre du projet FIWARE (<http://fiware.org/>), la ville a pu ainsi tirer parti des possibilités offertes par ces technologies pour liées les informations à leurs contextes (plus de détails [Lien 1](#))

FIWARE Smart Cities Reference Architecture

■ Core Context Management Context Broker ■ Context Process / Analyze / Monitor ■ Interface to IoT, Robotics and Third Party Systems ■ Data/API Management Publication Monetization

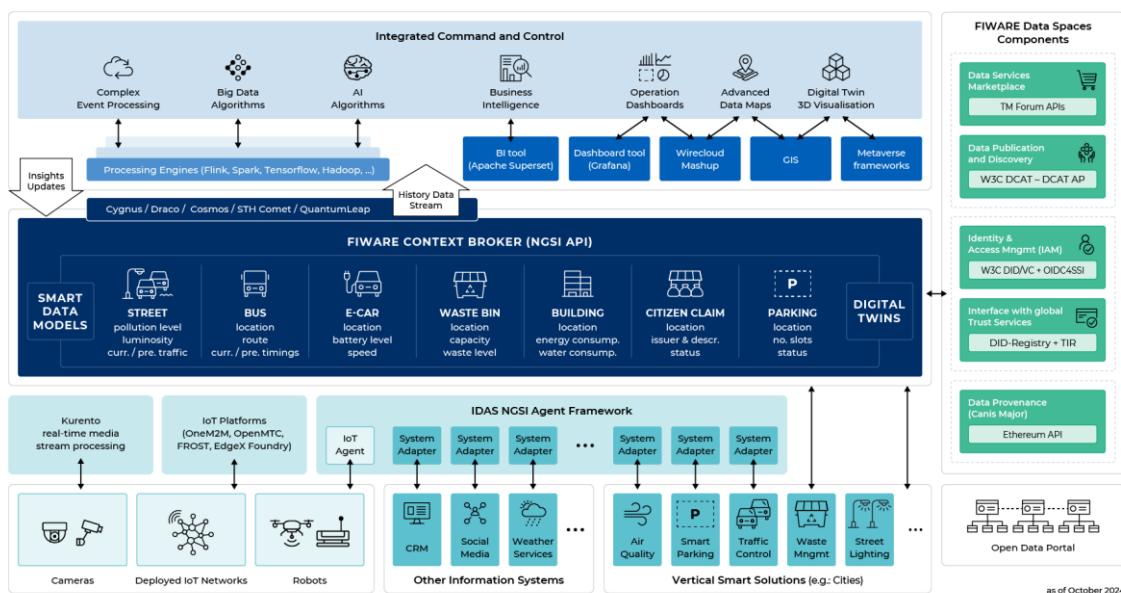


Fig 13. Architecture de référence Fiware

Données structurées et compréhensibles

Accessibilité

Exemple de Barcelone

La structuration des données est essentielle pour garantir leur compréhensibilité et leur utilité. Des données bien structurées permettent une manipulation et une analyse efficaces, facilitant ainsi la prise de décision éclairée.

En utilisant des formats standardisés et des schémas de données bien définis, on peut s'assurer que les informations sont accessibles et interprétables par divers systèmes et utilisateurs. Cela est encore une fois important pour les applications qui nécessitent une intégration de données provenant de multiples sources et formats afin de garantir une cohérence et une fiabilité accrues.

La ville de Barcelone a mis en place un système de données structurées pour son jumeau numérique, utilisant des formats standardisés comme JSON et XML. Les données des capteurs de qualité de l'air sont structurées de manière à ce qu'elles

puissent être facilement intégrées et analysées avec d'autres ensembles de données, tels que les données de trafic et les données de santé publique (voir [Lien 1](#))

Dictionnaire de données et modèles de connaissance

Les dictionnaires de données jouent un rôle clé en définissant et en hébergeant les informations de référence nécessaires à la constitution d'un modèle de données.

Un dictionnaire de données fournit une définition claire et précise des termes et des concepts utilisés, assurant ainsi une compréhension commune et cohérente des données. Les modèles de connaissance, quant à eux, permettent de représenter les relations et les interactions entre les différents éléments du territoire, facilitant ainsi une analyse plus approfondie et plus contextuelle. Ensemble, ces outils permettent de structurer et d'organiser les données de manière à ce qu'elles soient facilement accessibles et utilisables.

À Amsterdam, un dictionnaire de données a été créé pour standardiser les termes utilisés dans le jumeau numérique de la ville. Par exemple, le terme "zone de trafic" est clairement défini et lié à des concepts tels que "densité de trafic", "vitesse moyenne" et "types de véhicules". Cela permet une compréhension commune et cohérente des données de trafic, facilitant ainsi leur analyse et leur utilisation pour la planification urbaine et la gestion du trafic (voir [lien 2](#))

Exemple d'Amsterdam

Le cycle de vie de la donnée est un aspect crucial à considérer dans le cadre d'un jumeau numérique de territoire.

Il englobe toutes les étapes, de la collecte et du stockage à la transformation, l'analyse et la visualisation des données. Une gestion efficace du cycle de vie de la donnée permet de garantir la qualité, la pertinence et l'actualité des informations utilisées.

Cela inclut également des processus de mise à jour et de maintenance réguliers pour s'assurer que les données restent précises et utiles au fil du temps. En comprenant et en gérant efficacement le cycle de vie de la donnée, on peut maximiser la valeur et l'utilité des informations dans le contexte d'un jumeau numérique de territoire.

Illustration

La ville de MaVille a mis en place un système de gestion du cycle de vie des données pour son jumeau numérique. Par exemple, les données des capteurs de température et d'humidité sont collectées en temps réel, stockées dans une base de données centrale, transformées et analysées pour générer des rapports sur les conditions climatiques. Ces rapports sont ensuite utilisés pour ajuster les systèmes de chauffage et de refroidissement des bâtiments publics, optimisant ainsi la consommation d'énergie. Les données sont régulièrement mises à jour et maintenues pour garantir leur précision et leur pertinence.

Rôle des ontologies

Les ontologies jouent un rôle clé dans la structuration et l'organisation des connaissances dans un jumeau numérique de territoire.

Elles permettent de définir des concepts et des relations de manière formelle et standardisée, facilitant ainsi l'intégration et l'analyse des données provenant de diverses sources. En utilisant des ontologies, on peut améliorer l'interopérabilité des données et permettre une compréhension plus profonde et plus contextuelle des informations. Cela est particulièrement important pour les applications qui nécessitent une intégration de données complexes et hétérogènes, garantissant ainsi une cohérence et une fiabilité accrues.

Exemple de la Ville d'Helsinki

Dans le jumeau numérique de la ville de Helsinki, des ontologies sont utilisées pour définir les concepts et les relations entre les différentes données urbaines. Une ontologie a été créée pour représenter les relations entre les bâtiments, les routes, les transports publics et les espaces verts. Cela permet une intégration et une analyse plus efficaces des données, facilitant ainsi la planification urbaine et la gestion des infrastructures (voir [Lien 1](#))

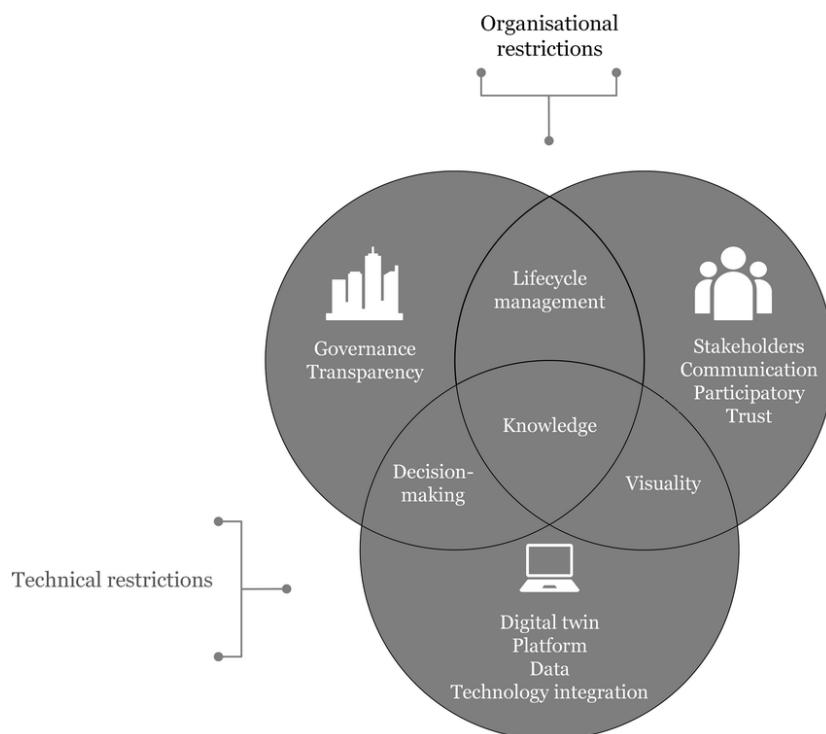


Fig 14. Implications de la gestion des connaissances pour les Jumeaux Numériques - IET Smart Cities

Gouvernance des modèles de connaissance

La gouvernance des modèles de connaissance est essentielle pour garantir la qualité, la cohérence et la pertinence des informations utilisées dans un jumeau numérique de territoire.

Elle englobe des processus et des politiques pour la création, la maintenance et l'évolution des modèles de connaissance, assurant ainsi qu'ils restent à jour et alignés sur les besoins et les objectifs du territoire. Une gouvernance efficace permet également de gérer les changements et les mises à jour de manière structurée et contrôlée, minimisant ainsi les risques d'incohérences et d'erreurs. En mettant en place une gouvernance robuste des modèles de connaissance, on peut maximiser la valeur et l'utilité des informations dans le contexte d'un jumeau numérique de territoire.

Illustration (cas fictif)

La ville de MaVille a mis en place une gouvernance robuste des modèles de connaissance pour son jumeau numérique. Un comité de gouvernance a été créé pour superviser la création, la maintenance et l'évolution des modèles de connaissance utilisés pour la gestion des infrastructures urbaines. Ce comité s'assure que les modèles sont régulièrement mis à jour et alignés sur les besoins et les objectifs de la ville. Cela permet de garantir la qualité, la cohérence et la pertinence des informations utilisées pour la prise de décision et la planification urbaine.

4.3 Formats et interopérabilité

Formats

Les formats de données CAO sont actuellement largement utilisés pour l'élaboration de modèles 3D, mais contiennent peu ou pas d'informations sur les métadonnées (LOI). Les données de type SIG sont limitées au niveau de représentation 3D (LOD) mais permettent de contenir les informations attributives. Les formats propriétaires CAD et SIG sont limités au niveau de l'interopérabilité. Les formats ouverts IFC (4.3) ont une structure cohérente, mais l'intégration des jeux données n'a pas de critères de caractérisation ou de représentation.

Standards

Le JSON est aujourd'hui un standard de représentation des données utilisé dans les APIs modernes. On peut à ce titre citer l'exemple du cityJSON qui reprend les concepts du cityGML (voir : [Lien 1](#)) et plus largement des standards OGC qui utilisent JSON et aussi les approchent Linked Data (voir [Lien 2](#))

Du côté BIM, on peut également mettre en avant les travaux de Building Smart sur l'IFCJson : [Lien 3](#)

D'un point de vu technologique il y a une convergence vers l'utilisation de JSON qui est utilisé par les API REST (maintenant un quasi standard) et Linked Data.

Standards IoT

La *qualité des données* dans les standards IoT repose sur plusieurs piliers. Ces éléments sont essentiels pour assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des systèmes IoT dans le cadre de jumeaux numériques des territoires :

- Les données collectées par les dispositifs IoT doivent être précises et exactes pour garantir des analyses et des décisions fiables. Des capteurs défectueux ou des erreurs de communication peuvent compromettre la qualité des données [réf : [Lien 1](#) ; [Lien 2](#)].
- L'adoption de standards (notamment ceux développés par le W3C - voir [Lien 3](#)) et protocoles unifiés est essentielle pour assurer la compatibilité et l'interopérabilité des dispositifs IoT. Des protocoles comme MQTT, qui prennent en charge les niveaux de qualité de service (QoS), sont souvent utilisés pour garantir la livraison fiable des messages [Réf [Lien 4](#)].
- La mise en œuvre de techniques de validation et de nettoyage des données est importante pour maintenir la qualité et la cohérence des données. Cela permet de corriger les erreurs, de supprimer les redondances et de normaliser les formats de données.
- L'intégrité des données est essentielle pour s'assurer que les informations ne sont pas altérées ou corrompues pendant la transmission ou le stockage. Des méthodes de validation et de hachage cryptographique sont souvent utilisées pour garantir cette intégrité [réf : [Lien 5](#)]

Enjeux des formats

Améliorer l'interopérabilité

Intégrer les données et métadonnées

Standardiser les représentations

Dans une logique de convergence et d'élargissement des usages, le groupe de travail a identifié plusieurs enjeux auquel le jumeau numérique est confronté.

Utiliser des formats ouverts de type IFC, CityGML, cityJSON pour faciliter l'échange de données entre différents logiciels et équipes.

Enrichir les modèles 3D avec des informations supplémentaires (LOIN – Level of Information Need) pour une meilleure gestion et utilisation des données.

Concernant les métadonnées, la saisie des éléments devra s'appuyer sur les principes INSPIRE. On fera notamment référence au guide CNIG en détaillant les modalités :[Lien 6](#)

Adopter des normes communes de représentation (comme pour le LOD – Level of Detail) doit permettre d'assurer une représentation cohérente et précise des modèles à chaque étape du projet.

Documents de références

Pour plus d'informations sur ce sujet, nous vous conseillons la lecture des éléments suivants :

- Standards OGC : [Lien 7](#)
- Standards BuildingSMart : [Lien 8](#)
- Livin-in.EU / MIMs : [Lien 9](#)
- OASC MIMs : [Lien 10](#)
- standards Web Of Things (WoT) : [Lien 11](#)

4.4 Enjeux de la reprise de l'existant

Reprise de base de données

Enjeux de compréhension de l'existant

La reprise de bases de données (BDD) et le formalisme existant sont des aspects cruciaux pour assurer la continuité et l'intégrité des données lors de la transition ou l'intégration de nouveaux systèmes.

Avant de reprendre une BDD, il est essentiel de réaliser une évaluation complète de l'état actuel des données, des structures et des processus. Cela inclut la vérification de l'exactitude, de la cohérence et de la pertinence des données.

Formalismes utilisés

Les modèles de données, tels que le modèle entités-associations ou le modèle relationnel, sont couramment utilisés pour structurer les bases de données. Ces formalismes permettent de représenter les relations entre les différentes entités de manière claire et structurée.

Migration et intégration

Lors de la reprise d'une BDD, il est crucial de planifier la migration des données de manière à minimiser les interruptions et les pertes de données. L'utilisation de scripts de migration et d'outils spécialisés peut faciliter ce processus.

Validation et vérification

Après la migration, il est important de valider et de vérifier les données pour s'assurer qu'elles ont été correctement transférées et qu'elles sont utilisables dans le nouveau système.

Documentation

Maintenir une documentation détaillée des structures de données, des processus de migration et des formalismes utilisés est essentiel pour faciliter la gestion future de la BDD

5. ENJEUX JURIDIQUE, LICENCE ET GOUVERNANCE

5.1 Utilisation des données

Données	Les jumeaux numériques reposent sur une gestion rigoureuse et stratégique des données, qui soulève plusieurs enjeux majeurs.
Open-Data	L'open data peut jouer un rôle crucial en permettant l'accès et le partage des données nécessaires à la création et à l'exploitation des jumeaux numériques. En France et en Europe, les stratégies d'ouvertes de données conduites depuis 2003 favorisent la réutilisation des données publiques (cf directive 2003/98/CE)
Private Data	Au-delà de nombreuses données privées ou associées à des activités industrielles peuvent être échangées pour enrichir la connaissance de la fonctionnement d'un système ou favoriser la communication entre une communauté d'acteurs poursuivant un objectif commun.

5.2 Propriété technique des outils et produits

Briques techniques / logicielles / algorithmes	Les briques techniques, logicielles et algorithmiques sont au cœur des jumeaux numériques, et leur gestion implique des considérations spécifiques en matière de licences et de propriété intellectuelle.
Opensource	L'utilisation de logiciels open source peut offrir une flexibilité et une adaptabilité accrues, mais elle nécessite une attention particulière aux licences pour éviter les conflits juridiques. On pourra citer notamment les nombreux travaux entourant les travaux issus de l'IGN avec iTowns : Lien 3
Licences	Les entreprises doivent adopter des stratégies de licence croisée et développer des programmes de formation pour sensibiliser les développeurs aux enjeux de la

propriété intellectuelle et aux meilleures pratiques pour la protection des logiciels et des algorithmes.

**Produits / livrables
(propriété,
responsabilité)**

Les produits et livrables issus des jumeaux numériques posent des défis importants en termes de propriété, de responsabilité et de conditions générales d'utilisation (CGU). La propriété intellectuelle des modèles et des données générées par les jumeaux numériques doit être clairement définie pour éviter les litiges

**Contrats de licences et
CGU**

Les contrats de licence doivent préciser les droits et obligations des parties, notamment en ce qui concerne l'utilisation, la modification et la distribution des produits. La responsabilité civile est également un enjeu crucial, car les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour simuler des scénarios critiques et prendre des décisions stratégiques. Les CGU doivent donc inclure des clauses de responsabilité et de limitation de garantie pour protéger les parties en cas de défaillance ou d'utilisation abusive des jumeaux numériques

5.3 Perspectives

**Perspectives liées aux
data spaces**

Les data spaces peuvent faciliter l'échange et l'intégration des données entre différentes organisations, permettant ainsi une collaboration plus efficace et une meilleure prise de décision.

Défis

Cependant, cela implique de relever des défis juridiques et techniques, tels que la protection des données, la conformité aux réglementations et la gestion des droits d'accès. Les cadres réglementaires doivent être élaborés pour encadrer l'utilisation des data spaces et assurer la protection des droits et des intérêts des parties prenantes. En outre, les data spaces peuvent offrir de nouvelles opportunités pour l'innovation et le développement de services avancés, mais ils nécessitent une approche collaborative et une gouvernance internationale pour maximiser leur potentiel.

Exemple de Gaia-X

Gaia-X est une initiative européenne dédiée à la création d'une infrastructure de données interopérable, favorisant des modèles commerciaux basés sur les données. Il établit un écosystème numérique basé sur les principes de l'open source, qui permet à tous les participants d'échanger des données tout en garantissant que les propriétaires des données conservent la pleine souveraineté des données. [Lien 1](#)

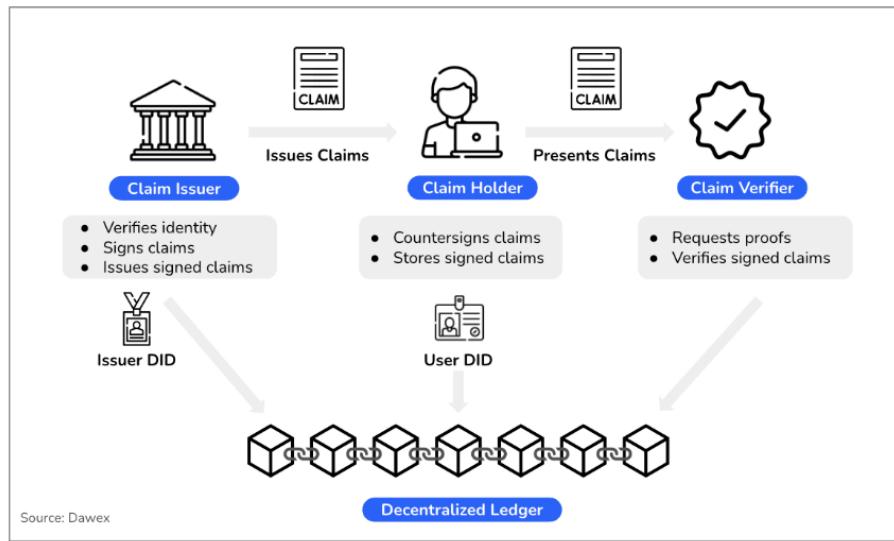


Fig 15.Gaia-X principles of data exchange - Dawex

6. CONCLUSION

6.1 Résultats de l'étude

Émergence d'un cadre de compréhension commun

Axe de travail pour le développement d'un JN

Les travaux menés de Mars 2024 à Septembre 2025 par le groupe de travail conjoint entre MINnD2050 et le CNIG ont permis de fédérer une communauté aux expertises multiples permettant d'établir un cadre de compréhension commun sur les enjeux d'architecture et d'interopérabilité liés aux jumeaux numériques territoriaux.

Ces travaux ont révélé les multiples facettes et défis soulevés par les jumeaux numériques pour le développement de systèmes d'informations, d'analyse et de interfaces à même de répondre aux cas d'usages portés par les territoires. Les principaux points structurants sont repris dans le schéma ci-dessous.

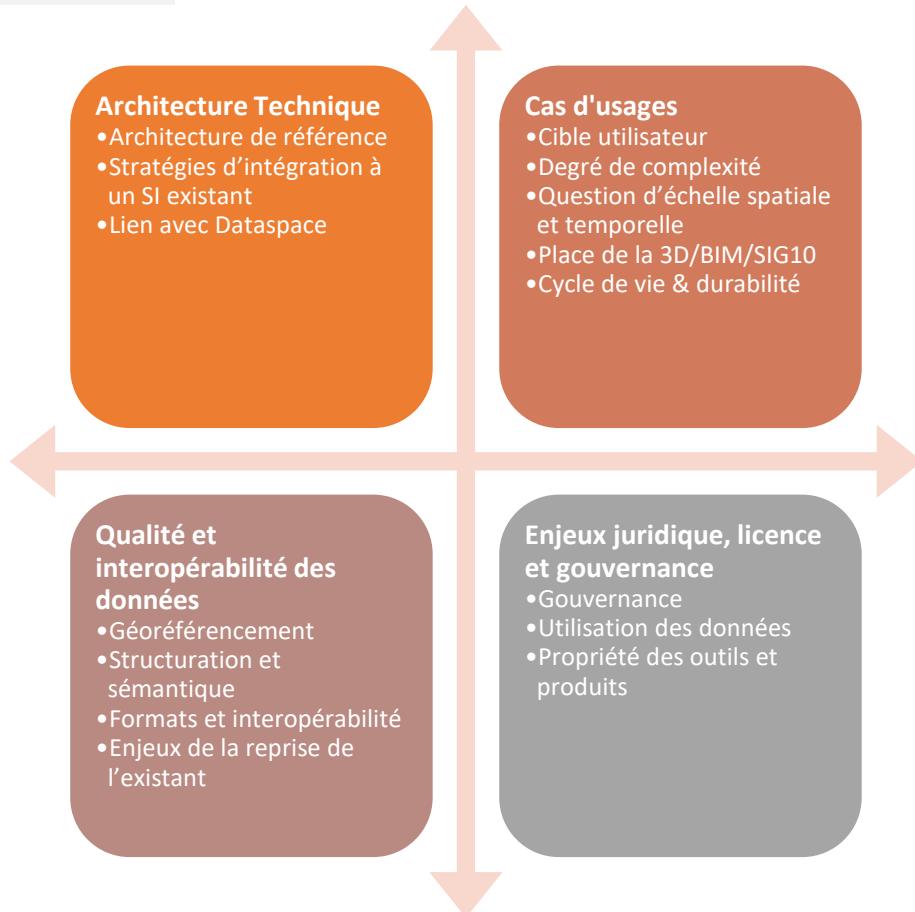


Fig 16.Axe de travail pour le développement d'un JN

Questionnements clefs pour un JNT

Utilisateurs

- Qui est l'utilisateur principal du jumeau ?
- Y a-t-il des cibles secondaires ?
- Quelle autonomie est souhaitée ?

Usage

- L'outil est-il scénarisé ou analytique ?
- Quel est le niveau de complexité de l'usage ?
- Quel est l'objectif principal visé ?

Échelles

- Quelles périodes sont concernées ?
- Le pas de temps est-il critique ?
- Quelle est l'échelle principale d'analyse ?
- Faut-il gérer du multi-échelle ?

Données

- Quels types de données sont mobilisés ?
- Quelle place occupe la 3D ?
- Le géoréférencement est-il critique ?
- Les données sont-elles interopérables ?
- Quels formats sont utilisés ?
- Une gouvernance est-elle en place ?

Technique

- Quel type d'interface est prévu ?
- Quel niveau d'interaction ?
- Quel modèle d'architecture est envisagé ?
- Y a-t-il interconnexion avec d'autres systèmes ?

Standards et gouvernance

- Quels standards sont mobilisés ?
- Respecte-t-on les normes sectorielles ?
- Comment sont gérées les données dans le temps ?
- Y a-t-il une logique de sobriété ou d'amélioration continue ?

Vers le déploiement de l'architecture du JN

L'ensemble de ces éléments d'orientation et réflexions doivent permettre de déployer des spécifications s'appuyant sur l'architecture de principe définie dans le présent document. Des spécifications s'appuyant sur un référentiel documenté, enrichi des retours d'expériences et des capacités des éditeurs de solution reste cependant à écrire.

Des travaux dans ce sens existent notamment via le « Local Digital Twin Toolbox » ([Lien 1](#)) et doivent tendre vers l'émergence de modules (Building Blocks) communs apte à répondre aux enjeux des différents territoires européens.

6.2 Perspectives de travail MINnD2050 / CNIG

Thématiques potentielles

De nombreux thèmes ont émergés durant les travaux de la période 2024-2025 sans que le groupe de travail puisse tous les aborder. Le focus initial de ce document sur une compréhension commune a permis d'établir un état des lieux initial tout en dressant les perspectives de collaborations nombreuses pour permettre l'émergence de travaux collaboratifs pour les jumeaux numériques territoriaux. Les principaux thèmes identifiés par les participants devant faire l'objet de recherche approfondis sont les suivants :

La cybersécurité des jumeaux numériques territoriaux est primordiale pour protéger notamment les flux de données sensibles, garantir l'intégrité des modèles et éviter toute intrusion et cyberattaque pouvant compromettre les systèmes physiques associés.

Il paraît important de mettre en place une démarche visant à conforter cette vision par des études de cas détaillées à même d'évaluer les architectures mises en places, les freins /leviers techniques mobilisés ainsi que la versatilité des solutions mobilisées pour répondre aux multiples cas d'usages.

Ces travaux pourraient prendre la forme de retours d'expérience documentés.

De nombreux défis liés aux formats, standards et normes ont également pu être identifiés. On citera notamment les problématiques liées à la gestion de l'hétérogénéité des niveaux de précision, fiabilité, niveau détail... (Data Quality), la convergence et l'opérationnalité des travaux de normalisation liées aux architecture de Jumeaux Numériques (MiMs, ETSI, LDT Toolbox) ainsi que la normalisation exécution de services et API associées.

A ce stade les travaux suivants ont été identifiés :

- AI-based EU Local Digital Twin reference architecture (EN 304 181)
- LDT MiMs Key specifications (EN 304 182)
- MiMs Companion document (ETSI TR 104 183)

Ces sujets pourraient à minima faire l'objet d'une revue experte des démarches à confronter aux études de cas précédentes.

Étude de cas

Standardisation / Normalisation

Stratégie de mise en œuvre et spécification

La question de la mise en œuvre est souvent revenue comme un élément clef permettant le passage à l'action des acteurs territoriaux. La mise en place d'un référentiel de spécifications techniques permettant d'aboutir à une infrastructure « Digital Twin Ready » apparaît comme cruciale pour la communauté d'acteurs nationaux. Des réflexions sur la modularité de l'architecture, sur la place du socle 3D territorial, sur le lien avec les IoT et les DataSpace apparaissent pertinente au regard de l'objectif.

Ce thème soulève également les problématiques associées à la cybersécurité et au numérique responsable, critères récurrents pour la mise en œuvre durable d'un jumeau.

Enfin, l'émergence de communs et d'une structuration de l'offre technique publique (EDIC LDT Citiverse – Cerema) ou privé (Esri, Bentley, Autodesk...) paraissent également incontournable pour confronter l'offre logicielle aux attentes des utilisateurs et converger vers des cadres d'interopérabilité partagé entre les différents acteurs des SI territoriaux.

Liens avec projets de communs / éditeurs

Ces travaux pourront être organisés à partir de la fin d'année 2025 en lien avec les communautés de MINnD2050 et du CNIG. Ces travaux étant en grande partie ouvert à tous, l'ensemble des contributeurs issus des filières de la géomatique, BIM, SMartCity ou ingénierie territoriale sont invités à participer aux futurs groupes de travail qui se constitueront dans les mois à venir.

Poursuite des travaux

7. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'ensemble des contributeurs aux ateliers et groupes de travail organisés depuis Mars 2024. Leurs contributions aux nombreuses discussions, sessions de travail et travaux de rédactions ont permis l'émergence de ce document qui marque une première étape importante pour la diffusion des jumeaux numériques territoriaux.

Nous tenons particulièrement à remercier :

- Rachedi Abderrezak
- Frederique Bertrand
- Jean Brange
- Mohamed Chachoua
- Salvatore Dalfonso
- Rodolphe Delétage
- Julien Fuseau
- Maud Guizol
- Hervé Halbout
- Julien Hautemanière
- Philippe Larguier
- Armonie Laurent
- Frédéric Lé
- Alexis Leautier
- Franck Legall
- Louis Macquet
- Pierre Marie
- Rémi Montorio
- Simon Pageaud
- Guillaume Picinbono
- Guillaume Poujol
- Dyhia Taleb
- Aurélie TALON
- Hyppolite Verdier
- Simon Vidal
- Fabrice Vienne
- ...

Ainsi que l'ensemble des autres acteurs qui ont interagi avec le groupe de travail au cours de l'année écoulée.

Un immense merci pour ce travail collaboratif accompli dans l'écoute et le partage !