



Modélisation des INformations INteropérables  
pour les INfrastructures Durables

## GT3.2-3.3 : Vision partagée du Jumeau Numérique

### Auteurs/Organismes

Angela VALENTIN (Arcadis)  
Angelo CIRIBINI (Université Brescia)  
Christian DONZEL (Inetum)  
Lionel NAJMAN (CS Group)  
Nicolas FERRARA (Egis)

Nolwenn LANCIEN (Arkance)  
Pierre-Etienne GAUTIER (SNCF Réseau)  
Vincent COUSIN (Processus et Innovation)  
Xavier GODART (Inetum)  
Yannick LUZIK (Ingérop)

### Relecteur/Organisme

Sylvain GUILLOTEAU (VINCI Autoroutes)

Thème de rattachement : Création des données

MINnDs2\_GT3.2\_vision\_partagee\_jumeau\_numerique\_027\_2022

LC/21/MINNDS2/114-127-128-129-130-132-133-134

Décembre 2022

Site internet : [www.minnd.fr](http://www.minnd.fr)

Président : François ROBIDA Chefs de Projet : Pierre BENNING / Vincent KELLER

Gestion administrative et financière : IREX ([www.irex.asso.fr](http://www.irex.asso.fr)), 9 rue de Berri 75008 PARIS, [contact@irex.asso.fr](mailto:contact@irex.asso.fr)

<b>1. SYNTHÈSE.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Contexte.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Apports et Position de MINnD .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Propositions.....</b>	<b>3</b>
<b>2. RÉSUMÉ DU LIVRABLE / ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>3. INTRODUCTION AU JUMEAU NUMÉRIQUE .....</b>	<b>6</b>
<b>4. ÉTAT DE L'ART DES JUMEAUX NUMÉRIQUES .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1 Vision générale.....</b>	<b>8</b>
<b>4.2 Les jumeaux numériques par secteurs.....</b>	<b>9</b>
<b>4.3 Ceux du BTP et des infrastructures ?.....</b>	<b>12</b>
<b>5. CONSTITUTION D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE.....</b>	<b>15</b>
<b>5.1 Principe.....</b>	<b>15</b>
<b>5.2 Le cas particulier des infras : quels défis ? .....</b>	<b>15</b>
<b>5.3 Contraintes du secteur des infrastructures et ressources à mobiliser .....</b>	<b>17</b>
<b>5.4 Référentiels de données stockées .....</b>	<b>21</b>
<b>5.5 Données captées .....</b>	<b>22</b>
<b>5.6 Protocole d'échanges de données .....</b>	<b>24</b>
<b>5.7 Structures de données en fichiers .....</b>	<b>25</b>
<b>5.8 Outils et méthodes .....</b>	<b>27</b>
<b>5.9 Architecture de systèmes d'information .....</b>	<b>29</b>
<b>6. CONDITIONS DE SUCCÈS.....</b>	<b>30</b>
<b>7. TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>33</b>
<b>8. SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS .....</b>	<b>37</b>

**Mots clés principaux  
(Fra)**

MINnD ; Recherche ; Construction ; Infrastructures ; BIM ; Maquette numérique ;

**Mots clés spécifiques  
au livrable (Fra)**

Jumeau Numérique ; Données ; Patrimoine ; Performance ; Prédiction ; Maintenance ; Résilience ; Usage ; CDE ; Environnement de données commun ;

**Main key words (Eng)**

MINnD; Research; Construction; Infrastructure; BIM; Digital model;

**Deliverable key words  
(Eng)**

Digital twin; Data; Asset; Performance; Prediction; Maintenance; Durability; Usage; CDE; Common Data Environment;

# I. SYNTHÈSE

## I.1 Contexte

<b>Évolution du BIM</b>	<p>Le Jumeau Numérique est l'évolution logique de la maquette numérique et des bases de données structurées objets, réalisées à l'aide d'une démarche BIM ou d'une démarche cartographique, pour assurer la continuité du patrimoine digital relatif à la vie d'une infrastructure. Il est donc nécessaire d'explicitier l'expression Jumeau Numérique afin d'aider l'ensemble de l'écosystème de la construction à structurer la démarche nécessaire à sa mise en œuvre.</p>
<b>Le double virtuel «vivant»</b>	<p>Le Jumeau Numérique est un double virtuel fonctionnel, suffisamment réaliste et dynamique, d'un ouvrage ou d'une infrastructure, depuis sa planification jusqu'à sa démolition. Il intègre des informations captées d'usage et de vieillissement, avec des capacités d'analyse, de prédiction et d'aide à la décision. Il est conçu pour satisfaire divers besoins d'optimisation telles que la simulation anticipée de la performance technique et environnementale, la simulation des fonctionnements ou de la construction, la maintenance, l'exploitation et sa résilience aux aléas climatiques...</p>
<b>Flux et base de données dynamiques</b>	<p>Le bon fonctionnement d'un Jumeau Numérique implique la coordination et la consolidation de flux d'informations générées par diverses sources avec leurs cycles de vie propres : les informations des objets constituant la maquette numérique sont mises à jour au fil d'événements périodiques de maintenance ou de transformation, tandis que les informations issues de capteurs sont remontées en temps réel. La combinaison de ces informations hétérogènes nécessite la maîtrise des architectures de systèmes d'informations aussi bien sur le plan opérationnel que le plan sémantique. Il est également indispensable que les interventions humaines - constituant des événements impactant le jumeau - soient gérées par des processus digitalisés.</p>
<b>Common Data Environment</b>	<p>La collaboration entre différents projets ou services se réalise par l'intermédiaire des données et plus particulièrement par une gestion avancée des « Environnements de Données Communs » (CDE en anglais) des différents projets ou services concernés. Si le point commun des définitions du terme «plateforme collaborative» dans la littérature est à la fois la notion d'espace de travail et la notion de travail collaboratif, ces notions sont pourtant interprétées de façons très différentes selon les acteurs-métiers. Certaines dynamiques ne se sont d'ailleurs pas mises en place entre acteurs et ne répondent pas toujours aux exigences normatives actuelles ni aux objectifs d'interopérabilité portés par MINnD et buildingSMART France.</p>

## I.2 Apports et Position de MINnD

<b>Jumeau Numérique</b>	<p>La promesse du Jumeau Numérique semble simple à écrire. Cependant, dans la réalité actuelle des organisations et des technologies disponibles, il est compliqué d'en rédiger les spécifications. En effet, la transformation profonde des outils et des processus que le Jumeau Numérique utilise, ainsi que la maturité plus ou moins grande des diverses technologies à mobiliser, imposent d'inscrire cette transformation dans une feuille de route au long terme, détaillant quelques étapes clefs appropriées aux organisations souhaitant cette transformation.</p>
<b>Donner une description du JN et de ses interactions...</b>	<p>Il est impératif de pouvoir décrire concrètement un jumeau numérique par :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• ses attendus.</li><li>• ses usages.</li><li>• son architecture numérique / structuration.</li></ul>
<b>...et une architecture associée</b>	<p>L'ambition très vaste que suppose le Jumeau Numérique, nécessite de multiples objets structurés pour supporter le modèle réaliste et fiable de tous les états dynamiques d'un ouvrage en construction ou en fonctionnement. Il en est de même pour l'architecture des services le mettant à disposition des utilisateurs.</p>

...nécessitant des avancées en normalisation

Dans les deux cas, cela suppose un effort très important de la communauté industrielle de la construction pour préparer la pré-normalisation puis la normalisation des divers domaines à intégrer dans la continuité de la nouvelle série des normes ISO 19650. Ainsi, au seul niveau de la normalisation du Jumeau Numérique proprement dit, il est possible d'identifier les lignes de progrès suivantes :

- La perspective fonctionnelle est encore insuffisamment couverte par les IFC, concentrés sur la perspective organique ;
- Certains domaines liés à la perspective organique des ouvrages sont toujours à compléter (géotechnique, ferroviaire, terrassement...);
- Des domaines liés à l'environnement ou aux activités exercées dans les ouvrages font l'objet de développements normatifs éventuellement autonomes du champ de la construction, mais il sera nécessaire de les rendre interopérables avec les objets propres aux ouvrages ;
- Ce qu'il est convenu de rattacher aux système-projet et aux système-service (les tâches, les processus, la planification, l'ordonnancement, les artefacts humains) ont également leurs dynamiques propres de normalisation avec lesquelles il faudra que le Jumeau Numérique soit interopérable ;

Il en est de même du domaine des captations de données sur toutes sortes de supports.

Une architecture numérique distribuée et ouverte

Le concept de « plateforme collaborative » s'appuie sur une vision générique d'un environnement informatique ouvert répondant à toutes les exigences normatives et composée de 3 parties :

- les plateformes collaboratives,
- les services de données,
- les outils métiers.

Ces concepts sont indépendants des technologies numériques les supportant pour autant que les composants dialoguent et interagissent suivant des standards ouverts.

Définition

Les plateformes collaboratives ne sont pas des outils mais des lieux de prise de décision :

- Elles affichent les données d'une manière compréhensible pour tous les acteurs ;
- Elles permettent de tracer les décisions prises (la plupart du temps via un BCF sur la maquette hébergée par le ou les services de données) ;
- Elles fournissent un tableau de bord personnalisé pour chaque profil d'acteurs du projet.

## I.3 Propositions

Nécessité de collaborer

Il est nécessaire de définir une architecture numérique permettant d'identifier clairement ses grandes composantes afin de répondre aux exigences de la collaboration sur les projets, pendant toute la durée de vie de l'infrastructure ou de l'ouvrage.

Stocker les données

Des espaces de stockage « intelligents » sont mis en œuvre, garantissant la maintenance et la sécurisation des données « de référence » et l'accès à celles-ci à travers des services standardisés, sous la responsabilité de leur propriétaire et tout au long de la vie de l'infrastructure (voire au-delà, dans le cas d'un processus d'archivage).

Collaborer

La coopération d'acteurs autour d'un projet est facilitée par l'utilisation des plateformes collaboratives. Ces plateformes donnent accès, de façon compréhensible pour l'ensemble des acteurs du projet, aux données métiers qui leur permettront de prendre les décisions optimales pour le projet, puis de tracer et d'historiser ces décisions. Chaque plateforme collaborative est sous la responsabilité de l'entité responsable du projet, sa durée de vie est en général limitée à celle de l'ouvrage.

## Innovover

Des outils « métiers » sont développés, propres à chacun des acteurs et exploitant les données au travers de services standardisés, en préservant la propriété intellectuelle de chacun des acteurs.

## Ce qu'il reste à faire

Le développement du Jumeau Numérique nécessite encore des efforts de recherche pour mettre en œuvre certains services tels que le vieillissement des ouvrages, les enjeux environnementaux liés aux changements climatiques et la replanification des circulations selon les aléas ou les nouvelles exigences.

Pour garantir également une exploitation à long terme et une indépendance vis-à-vis des fournisseurs de solutions logicielles, la représentation des systèmes et des données doit être établie suivant des standards et des architectures partagés à normaliser. L'adaptation des référentiels publics et privés de gestion reste à faire, en respectant les droits des parties prenantes. Le tout doit prendre en compte les enjeux de cybersécurité.

## Et l'humain dans tout cela ?

Le Jumeau Numérique, tout comme le BIM, va nécessiter l'acculturation et la formation de nouveaux experts, des personnels mobilisés et des utilisateurs. Il nécessitera également, pour donner la pleine mesure de leur potentiel, une réingénierie des processus de construction et d'exploitation-maintenance. Cette réingénierie permettra un véritable changement de paradigme dans la construction et la gestion de tout le cycle de vie de l'infrastructure, en considérant la performance du système global et non la somme des performances de systèmes individuels.

## Le CDE de demain

Le point central de contrôle n'est pas la plateforme, mais les services du CDE. Que ce soit la plateforme ou les outils, ils ont besoin de se connecter aux services du CDE pour pouvoir disposer d'une connexion sécurisée aux services de données. En revanche, le CDE, lui, contrôle l'accès aux données et garantit la protection de la propriété intellectuelle des données. Il fournit tous les moyens nécessaires pour que l'entité responsable du projet puisse garantir à tout instant la cohérence entre les modifications qu'elle induit sur les différents jeux de données. Le CDE constitue la référence pour tous les acteurs.

L'architecture numérique proposée est un socle ouvert qui devrait permettre la construction de Jumeaux Numériques interconnectés.

## 2. RÉSUMÉ DU LIVRABLE / ABSTRACT

### Résumé

Dans le prolongement du BIM, le jumeau numérique est le nouveau paradigme indispensable pour la continuité du patrimoine digital relatif à la vie d'une infrastructure. Le jumeau numérique apporte de nombreuses promesses et tend à effacer progressivement le BIM. Cependant il est nécessaire de l'explicitier afin d'aider l'ensemble de l'écosystème à structurer la démarche nécessaire à sa mise œuvre.

Le chapitre 2 explicite les transformations profondes des outils et des processus associés à la maturité des technologies nécessaires. Ces transformations demandent des efforts de normalisation dans les domaines fonctionnels, organiques, environnementaux et pour la captation des données.

Le chapitre 3 expose l'état de l'art avec une vision générale du jumeau numérique. Il explicite le service à mettre en place pour une exploitation adaptée. Il fait également le parallèle avec les usages par secteurs industriels et dans le cadre du BTP et des infrastructures.

Le chapitre 4 présente la constitution du jumeau numérique en faisant état des défis qu'il représente pour les infrastructures. Les contraintes du secteur ont été identifiées au travers de ses singularités. Il est ensuite présenté un référentiel de données, une description des données captées et les protocoles d'échange de données.

Enfin au chapitre 5 sont exposées les conditions de succès en décrivant les acteurs à impliquer dès l'expression du besoin en amont.

### Abstract

When going forward beyond BIM, the digital twin is the new paradigm indispensable for the digital continuity of the numerical asset connected to civil infrastructures all along their lifecycle. The digital twin comes along with several interesting promises and will progressively put BIM aside. It is necessary to explicit these promises in order to assist all stakeholders to structure their joint approach enabling the said promises to become reality.

Chapter 2 explains the deep transformations of tools and related processes according to the maturities of the necessary technologies. These transformations require efforts in normalisation in functional, organic, environmental domains and for data capture.

Chapter 3 is a review of the state of the art with a holistic vision of the digital twin. It details the digital services that must be put in place to support exploiting to its full promises the digital twin. It also establishes comparisons between digital twin uses in other industrial domains and those in civil engineering and infrastructures.

Chapter 4 develops the content of the digital twin through the expression of the challenges that are supposed to be met for infrastructures. The constraints of the sector are identified through its specificities. A data reference framework is then proposed as well as a description of the to-be-captured data and the related exchange protocols.

As a matter of conclusion, chapter 5 exposes the success factors when implementing a digital twin through identifying the actors to be mobilised as soon as the elicitation of the users' needs.

### 3. INTRODUCTION AU JUMENT NUMÉRIQUE

#### Introduction

##### Le BIM

Le BIM est un processus collaboratif basé principalement sur l'utilisation de maquettes numériques interoperables.

Il est généralement mis en œuvre à l'occasion de la conception et de la réalisation d'ouvrages neufs ou à réhabiliter.

Le BIM favorise la création et la collecte des informations dans un modèle de données du projet

L'un des arguments en sa faveur est de pouvoir améliorer l'exploitation et la maintenance des ouvrages en favorisant la création d'un modèle de données.

##### DOE numérique, un état de l'ouvrage

Dans une première approche, la promesse d'amélioration de l'exploitation ne peut être tenue qu'à la condition de disposer d'un DOE numérique adapté aux besoins futurs. Cependant, dans l'acceptation actuelle d'un DOE, celui-ci ne peut être qu'un état de l'ouvrage à la seule date de livraison, aussi adapté soit-il aux besoins de l'exploitation et de la maintenance.

##### Vie de l'ouvrage, un BIM perpétuel ?

Cet arrêté de l'ouvrage pourrait tout à fait être aménagé pour servir aussi de réceptacle aux flux d'informations nouvelles, générés durant cette nouvelle phase de la vie de l'ouvrage. L'exploitant mainteneur générerait ces flux d'informations et cette mise à jour de l'ouvrage modélisé, nécessiterait donc l'activation de processus spécifiques à cette phase.

#### Le jumeau numérique

Cependant, tous ces développements, bien sûr souhaitables ne produiront pas un modèle réaliste et fiable d'un ouvrage en fonctionnement (et donc capable de simulations) indispensable à une gestion opérationnelle et de maintien en condition à toutes les échelles de temps, temps réel ou temps différé.

C'est en cette vision dynamique modélisant tous les états d'un ouvrage que réside la singularité, l'originalité et la puissance du concept de jumeau numérique. Cette capacité de modèle virtuel est en effet utile non seulement en exploitation, mais aussi dès les premières phases de conception puis lors de la construction.

Il faut bien sûr mettre en place le jumeau numérique dès le début du cycle d'un ouvrage, lequel, il n'est pas inutile de le rappeler, doit commencer par la prise en compte des besoins des exploitants et mainteneurs. Modèle virtuel complet de l'ouvrage à construire, puis en construction, enfin en exploitation-maintenance-déconstruction, le jumeau numérique a pour vocation d'être le reflet numérique permanent de l'ouvrage construit.

Pour permettre l'usage collaboratif par tous et pour en obtenir toute la production de valeur, il est indispensable d'intégrer le jumeau numérique dans une architecture des services disponible le plus tôt possible dans un projet.

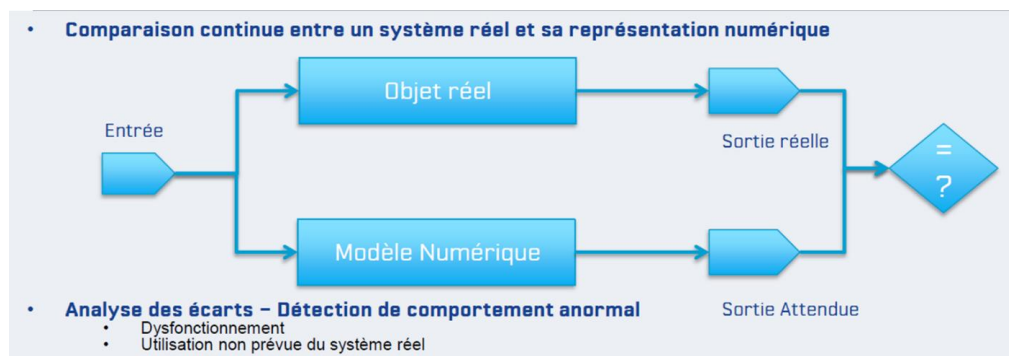


Figure 1 Parallélisme permanent entre l'infrastructure réelle et son jumeau numériques – Naval Group

## Objectifs

### Donner une description du JN et de ses interactions...

### ...et une architecture associée

### ...nécessitant des avancées en normalisation

La promesse du jumeau numérique est simple à écrire. Toutefois dans la réalité actuelle des organisations et de la technologie, il est compliqué d'en rédiger les spécifications. En effet, la transformation profonde des outils et des processus que le jumeau numérique utilise et la maturité plus ou moins grande des diverses technologies à mobiliser, imposent d'inscrire cette transformation dans une feuille de route de long terme détaillant quelques étapes clefs appropriées aux organisations souhaitant cette transformation.

Il est impératif de pouvoir décrire concrètement un jumeau numérique :

- Décrire ses attendus.
- Décrire ses usages.
- Décrire son architecture/ structuration.

Enfin, l'ambition très vaste que suppose le jumeau numérique, nécessite de multiples objets structurés pour supporter le modèle réaliste et fiable de tous les états dynamiques d'un ouvrage en fonctionnement ou en construction. Il en est de même pour l'architecture des services le mettant à disposition des utilisateurs.

Dans les deux cas, cela suppose un effort très important de la communauté industrielle de la construction pour préparer la pré-normalisation puis la normalisation des divers domaines à intégrer dans la continuité de la nouvelle norme ISO 19650. Ainsi, au seul niveau de la normalisation du jumeau numérique proprement dit, il est possible d'identifier les lignes de progrès suivantes :

- La perspective fonctionnelle est encore insuffisamment couverte par les IFC concentrés sur la perspective organique ;
- Certains domaines liés à la perspective organique des ouvrages sont toujours à compléter (géotechnique, ferroviaire...) ;
- Des domaines liés à l'environnement ou aux activités exercées dans les ouvrages font l'objet de développements normatifs éventuellement autonomes du champ de la construction mais il sera nécessaire de les rendre interopérables avec les objets propres aux ouvrages ;
- Ce qu'il est convenu de rattacher aux système-projet et système service (les tâches, les processus, la planification, l'ordonnancement, les artefacts humains) ont également leurs dynamiques propres de normalisation avec lesquelles il faudra que le jumeau numérique soit interopérable ;
- Développer le domaine des captations et de l'exploitation de données sur toutes sortes de supports



## 4. ÉTAT DE L'ART DES JUMEAUX NUMÉRIQUES

### 4.1 Vision générale

#### Vision et définition

Un jumeau numérique est la représentation virtuelle réaliste, fidèle et organisée d'un système physique ou d'un processus, à construire ou à exploiter, et qui rend possible la réalisation des services à haute valeur ajoutée. Le système physique dont il est question peut être un produit, une machine, une ligne de production ou une infrastructure. Les processus quant à eux peuvent concerner des chaînes de fabrication, de construction, d'exploitation, de logistique ou des modèles économiques (voir des exemples plus fournis au point 4.2).

Le jumeau numérique nécessite aussi la mise en place d'une architecture de services dynamiques reflétant d'une exploitation réelle pour répondre aux exigences pour lesquelles il a été conçu.

#### Origine

Le terme jumeau numérique vient de *Digital Twin* en anglais et aurait été introduit par Michael Grieves, du Florida Institute of Technology, et John Vickers de la NASA, au début des années 2000

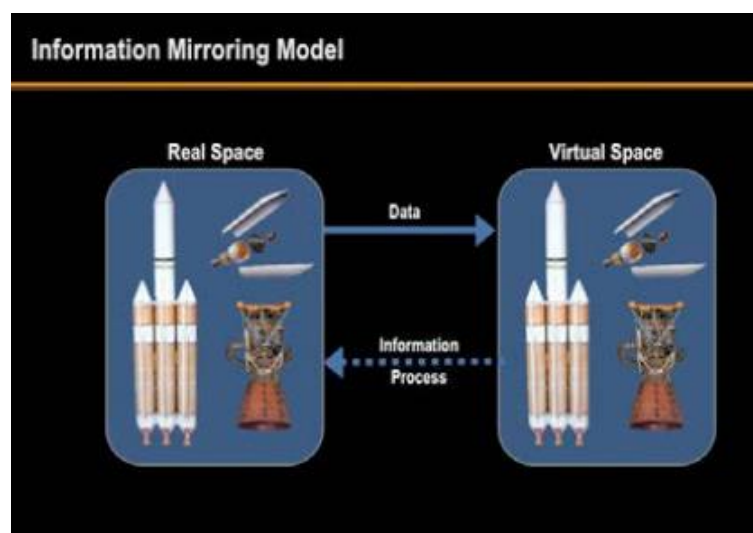


Figure 2 Les espaces réel et virtuel mis en parallèle par la NASA dans les années 2000.

#### Représentation et couplage virtuel - réel

Il n'existe pas de représentation universelle d'un jumeau numérique. Suivant le système concerné et les cas d'usages souhaités, il peut par exemple consister en un modèle géométrique, multiphysique, fonctionnel ou encore comportemental.

Les éléments indispensables à la constitution du jumeau numérique sont alors l'existence d'un objet réel et son couplage ou synchronisation – en quasi-temps réel – avec son modèle virtuel.

C'est cette interconnexion qui fait l'essence du jumeau numérique. Elle peut s'effectuer au travers de capteurs ou de moyens IoT qui transmettent divers aspects de l'état de fonctionnement de l'objet réel.

Ces données doivent être analysées et leurs impacts propagés dans le jumeau. L'analyse des données étant son champ d'application à l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique.

La synchronisation entre réel et virtuel permet ainsi d'améliorer la qualité (détection de déviations, réduction de la variabilité, analyse approfondie des données historiques après un évènement) tandis que l'intelligence du jumeau numérique lui permet de proposer des services relatifs au suivi et à l'optimisation de la performance ainsi qu'aux tâches de maintenance prédictive.

### Des efforts internationaux

L'intérêt des grands acteurs économiques et des pouvoirs publics pour les jumeaux numériques est croissant.

Au Royaume Uni, l'année 2018 a ainsi vu la publication d'un document (réf [1]) récapitulant les principes d'un jumeau numérique national publié par le Centre of Digital Built Britain.

Une enquête de l'institut Gartner en 2018 (réf [2]) révèle que les *Digital Twins* constituent un intérêt majeur pour les organisations ayant déployé une infrastructure IoT. À cette période 63% de ces entreprises étaient en train d'envisager de développer un *digital twin*.

En 2019, ce même institut place le Jumeau numérique dans le top 10 des tendances technologiques stratégiques et révèle que d'ici 2021, la moitié des grandes entreprises industrielles utilisera des jumeaux numériques, ce qui entraînera une amélioration de l'efficacité de 10% pour ces organisations.

[1] <https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-do/national-digital-twin-programme>

[2] <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mai>

## 4.2 Les jumeaux numériques par secteurs

### La genèse : l'industrie aérospatiale

Pour les entreprises, et en particulier le secteur industriel [1], les applications sont multiples et offrent de nombreux bénéfices, dans un environnement où les acteurs économiques sont contraints de s'adapter toujours plus vite, de réduire leurs coûts, de faire preuve d'une grande réactivité et capacité à anticiper l'évolution de leur marché. Les secteurs les plus développés en la matière sont l'aéronautique et la défense.

#### Application

Pour l'aérospatiale, le concept de jumeau numérique est en fait bien plus vieux, et remonte aux années 70. [2]

Dans ce secteur, et comme pour d'autres, c'est le caractère extrêmement difficile des conditions d'accès aux installations physiques qui a justifié l'exploitation d'un « miroir » numérique, pour comprendre et simuler des comportements, à distance.



Figure 3 Un jumeau physique au sol d'un satellite dans l'espace piloté par les données transmises depuis le satellite. NASA

Grâce aux simulateurs, et à la capacité de tester des pannes, la Nasa a ainsi pu venir en aide des spationautes de la mission Apollo 13, rendus célèbres par le fameux « Houston, we had a problem », à plus de 300 000 km de leur base.

[1] [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication)

[2] <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>

En aéronautique, le jumeau numérique concerne principalement soit une partie de l'avion (moteurs, ailes, ...) soit l'avion proprement dit. Les avionneurs veulent aller au-delà de la maquette numérique, qui est un outil qui permet de faire travailler ensemble dans le virtuel, bureau d'études, et sous-traitants. Ils créent des jumeaux numériques propres à chaque appareil ou objet, et l'actualisent par l'intégration des données d'exploitation. Ils construisent également des jumeaux numériques des processus de production, et englobent ainsi le cycle de vie de leurs appareils. En ce faisant, ils répondent aux enjeux liés à la hausse de cadences de production, à l'amélioration de la qualité et donc de la sécurité des aéronefs, à la personnalisation croissante des appareils et à l'optimisation de la gestion des flottes par les compagnies aériennes.

En 2018, le patron de Boeing, Dennis Muilenburg l'assurait : grâce à l'utilisation du jumeau numérique, Boeing a pu améliorer de 40 % la qualité des pièces et des systèmes nécessaires pour l'assemblage des avions.

## Le cas de l'automobile

Le jumeau numérique est une des implémentations technologiques récentes dans le domaine automobile. De la conception, au développement de véhicules futuristes, la définition de la méthode la plus efficace et la plus rentable est désormais possible.

La technologie du jumeau numérique peut reproduire et également valider chaque étape du développement afin d'identifier les problèmes et les pannes possibles avant que le processus de production proprement dit du véhicule ne commence.

Dans ce domaine le jumeau numérique peut concerner le véhicule proprement dit, l'usine de production, le processus de vente ou alors les services liés au véhicule.

### Améliorer les processus de production

Les ingénieurs peuvent créer une image virtuelle du véhicule qui comprend divers éléments tels que l'extérieur de la voiture, son logiciel, la mécanique, l'électricité et le comportement physique. Cela leur permet de répliquer et également de valider chaque étape du développement afin d'identifier les problèmes et les pannes possibles avant le début du processus de production proprement dit. Le processus permet également d'économiser du temps et de l'argent précieux consacrés au processus de production.

### Améliorer l'usage et la maintenance de l'automobile

Le jumeau numérique est également utilisé dans les véhicules électriques. Les voitures électriques peuvent être associées à leurs jumeaux numériques. Des capteurs IoT sont installés sur le véhicule pour envoyer ou recevoir des informations de son jumeau numérique. Les données recueillies à partir de ces capteurs permettent de garder une trace de l'état de fonctionnement de la voiture et détectent également les problèmes à un stade précoce afin d'éviter des réparations coûteuses. Par exemple, le constructeur automobile américain Tesla utilise l'application de jumeau numérique dans chacun de ses véhicules.

### Améliorer la conception d'un modèle à l'autre

Le jumeau numérique peut potentiellement intégrer toutes les données entre les véhicules de la génération précédente et le concept de véhicule actuel dans sa maquette numérique. Le jumeau numérique peut ainsi contenir les données complètes du cycle de vie du produit.

La communication entre les concepteurs, les parties prenantes et les clients finaux (cliniques de produits) peut être plus interactive et plus rapide. La prise de décision basée sur les données pour finaliser le concept de véhicule peut être activée dans l'organisation.

La disponibilité de modèles et de simulations fiables permet une évaluation rapide des impacts du changement et la découverte précoce des problèmes. Tirer parti du jumeau numérique peut simplifier la phase des tests grandeur réelle du fait des simulations réalistes.

## Le secteur manufacturier

Outre les secteurs aéronautique et automobile, le jumeau numérique s'adresse plus généralement au domaine manufacturier. Ce secteur doit développer des produits de plus en plus innovants. Ce qui nécessite entre autres le maintien d'une certaine continuité digitale.

La conception et la fabrication assistées par ordinateur permettent aux concepteurs de développer des objets numériques, de créer des usines virtuelles pour les produire et d'exécuter des simulations pour voir comment l'usine fonctionnerait dans le monde réel. Une fois l'usine mise en service, l'outil de simulation est rangé. Les données de l'usine réelle peuvent être injectées dans la simulation pour comparer la production réelle à l'idéale simulée.

### Améliorer la rétroaction utilisation vers conception et production

Les fabricants doivent évaluer en permanence comment améliorer les processus pour accroître l'efficacité, la qualité et les performances. Le recours croissant aux processus de conception et de production numériques offre une opportunité d'accélérer l'innovation et l'introduction de nouveaux produits. Cependant, pour que ce processus soit pleinement utilisé, une meilleure boucle de rétroaction est nécessaire entre la production et la conception. Un jumeau numérique - peut être utilisé pour améliorer la boucle de rétroaction de la production à la conception. Les fabricants adoptant une stratégie de jumeau numérique peuvent accélérer les cycles d'innovation - et mieux s'adapter à l'amélioration continue des processus - avec plus de facilité et d'efficacité.

### Exemple des équipements ferroviaires

Le jumelage numérique peut permettre de représenter l'ensemble des trains d'une compagnie. Il permet ainsi d'anticiper les activités de maintenance et d'économiser les frais d'entretien. Chez Alstom par exemple, Le jumelage numérique de réseau ferroviaire est un outil précieux de simulation et d'aide à la décision pour les autres étapes de la maintenance de la flotte de trains :

- En prenant part aux appels d'offres, la société peut effectuer des estimations fiables à l'aide de données et de simulations à l'appui des propositions – le modelé est un puissant outil visuel de communication.
- Au cours de la phase de conception et d'ingénierie, l'entreprise de maintenance peut faire preuve de souplesse en ce qui concerne les modifications de projet et prendre en compte les contraintes.
- L'entreprise peut établir des prévisions de projet en fonction des résultats du modèle.

L'investissement dans le développement d'un jumeau numérique du réseau ferroviaire s'est avéré très utile pour la prise de décision, à la fois dans le présent et à long terme.

## Autres secteurs/applications

### Le cas du jumeau du corps humain

Plus récemment (2020), les industriels comme Siemens et Dassault s'intéressent au potentiel du jumeau numérique du corps humain. Grâce à ce dernier, il est possible d'anticiper les réactions du corps humain par suite d'un traitement ou la pose d'une prothèse. La recherche et le développement s'en trouve accéléré et limite les essais « in vivo » au profit des essais « in silico » (réf [1]).

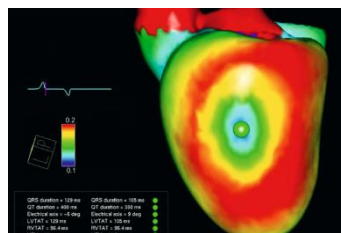


Figure 4 Le jumeau numérique dans la santé Crédit image © usine nouvelle

1] <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/le-jumeau-numerique-une-revolution-viable-du-monde-de-la-sante-824052.html>

### 4.3 Ceux du BTP et des infrastructures ?

<p><b>Un secteur en évolution</b></p> <p><b>Maintenant</b></p>	<p>L'usage d'architectures de services pour l'exploitation et la maintenance n'est pas une nouveauté.</p> <p>À l'aire analogique, des automates câblés permettaient la supervision et le pilotage des grosses infrastructures.</p> <p>À l'aire informatique ses automates ont été remplacés par des logiciels de plus en plus sophistiqués mais travaillant généralement en silos</p> <p>À l'aire digitale, c'est la capacité de communication et d'interconnexion des systèmes qui ouvre la faisabilité des jumeaux numériques d'infrastructure</p>
<p><b>Processus émergent</b></p> <p><b>Restons confiant</b></p>	<p>La plupart des jumeaux numériques de bâtiments ou d'infrastructures sont des prototypes, des POC ou des évolutions BIM de logiciels de supervision.</p> <p>Cela est simplement dû au fait que dans le BTP, contrairement aux industries manufacturières, la fourniture du contexte nécessaire est éclatée entre différents intervenants (concepteurs, constructeurs, exploitant) et par conséquent la gouvernance s'en trouve complexifiée.</p> <p>Le modèle industriel d'amélioration continu d'outil de production d'un objet sérialisé est également plus difficile à appliquer sur des macro-objet qui se sont généralement spécifiques et donc les taux de dépenses d'ingénierie sont plus faibles.</p> <p>L'amélioration continue de la connaissance des outils digitaux et l'inspiration des modèles industriels transposés et adaptés aux contraintes du BTP, permettra, tout comme pour le BIM, la mise en place progressives de jumeaux numériques.</p> <p>« Progressive » signifiant surtout l'évolution en complexité des cas d'usages recherchés et atteints.</p> <p>Il est donc indispensable d'industrialiser leur mise en œuvre pour pérenniser leurs nombreuses promesses d'applications.</p>
<p><b>Applications</b></p> <p><b>Planification de conception</b></p> <p><b>Opérations standard</b></p> <p><b>Opérations en modes dégradés</b></p> <p><b>Maintenance préventive</b></p> <p><b>Opérations de secours</b></p> <p><b>Performance des services rendus</b></p> <p><b>Résistance mécanique</b></p> <p><b>Consommation énergétique</b></p> <p><b>Bilan carbone</b></p>	<p>Les cas d'usages de jumeaux numériques devront nourrir les besoins d'optimisation ou de pérennisation des applications suivantes :</p> <p>Modélisation d'infrastructures nouvelles dans un contexte existant et estimation des coûts.</p> <p>Opérations quotidiennes liées à l'exploitation des ouvrages (péages, signalisations, informations aux usagers, aléas climatiques...)</p> <p>Opérations en présence d'un accident ou de travaux de réparations ou d'un aléas climatique ou anthropique majeur (incendie, explosions de matières dangereuses, ...)</p> <p>Opérations de maintenance préventive et de réparations en cas de panne des équipements ou d'endommagement des infrastructures.</p> <p>Prise en compte des accidents, arrivées des secours, de la sécurité civile, évacuation des blessés et des matériels endommagés...</p> <p>Performance et niveau atteint pour les services rendus par l'infrastructure (trafic, impact réseaux routiers, impact économique).</p> <p>Tenue mécanique des ouvrages aux sollicitations attendues, normales ou exceptionnelles (ultimes ou de service).</p> <p>Consommation énergétique de l'ouvrage au quotidien comme sur l'ensemble du cycle de vie.</p> <p>Bilan carbone de l'ouvrage sur l'ensemble du cycle de vie.</p>

<b>Impacts environnementaux</b>	Impacts de l'ouvrage au quotidien comme sur l'ensemble du cycle de vie, en cas d'aléas climatiques majeurs, sur les écosystèmes impactés (déchets, pollutions, inondations, faune...).
<b>Avancement des travaux</b>	Capturer et mesurer l'avancement des travaux.
<b>Planification</b>	Planifier les activités, les optimiser et les réorganiser en fonction de l'avancement et des aléas rencontrés.
<b>Allocation des ressources</b>	Prévoir l'allocation des ressources tant humaines que matérielles, l'optimiser.
<b>Assistance au personnel de chantier</b>	Fournir informations et assistance au personnel de chantier pour l'aider dans ses propres prises de décisions et évaluation des situations.
<b>Analyses de sécurité</b>	Analyser les conditions de chantier et fournir une assistance à la prévention des accidents.
<b>Qualité et conformité des travaux</b>	Apprécier et évaluer la conformité des travaux exécutés.
<b>Résistance mécanique</b>	Évaluer et vérifier la bonne tenue mécanique des ouvrages tant définitifs que temporaires.
<b>Formations des opérateurs</b>	Le Jumeau Numérique représente une magnifique opportunité de formation et de prise en mains d'une installation ou d'un équipement quelle que soit le niveau des opérateurs ou des intervenants à former.

## Optimisations et pérennités

	Le jumeau numérique est donc à concevoir pour des applications :
<b>En conception</b>	Grâce à : <ul style="list-style-type: none"> <li>• La simulation anticipée de la performance technique et environnementale des fonctionnements et de la réalisation.</li> <li>• La meilleure prise en compte des besoins des utilisateurs</li> <li>• La participation des utilisateurs</li> <li>• ...</li> </ul>
<b>En construction</b>	Grâce à : <ul style="list-style-type: none"> <li>• À la meilleure gestion des enjeux environnementaux (maîtrise de l'énergie, des émissions de gaz à effet de serre, de l'économie des ressources et la gestion des déchets, de la minimisation des impacts et des nuisances, de la protection de la biodiversité et de la biosphère)</li> <li>• À la représentation de l'avancement du chantier</li> <li>• À l'étude du positionnement des équipements de chantier (grues, camions, ...)</li> <li>• À La simulation des méthodes de construction</li> <li>• Au suivi des approvisionnements et des opérations de stockage sur chantier</li> <li>• À l'analyse et à la prédiction de situations de danger et de mise en sécurité des personnes (voire jouer les situations de presque-accident)</li> <li>• A la maîtrise des tolérances et incertitudes</li> <li>• ...</li> </ul>
<b>Lors de la prise en main</b>	Par : <ul style="list-style-type: none"> <li>• La contextualisation des informations dans l'ouvrage</li> <li>• La transmission d'un DOE numérique global et validé</li> </ul>
<b>En l'exploitation</b>	Pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les opérations d'exploitation dans les conditions nominales</li> <li>• Les opérations en mode dégradé</li> </ul>

**En déconstruction de  
démantèlement**

- La prédiction des défauts et du vieillissement
- L'amélioration continue de l'empreinte environnementale
- L'optimisation continue en temps réel des paramètres d'exploitation
- Formation et entraînement des personnels
- Simulation de maintenance des ouvrages
- ...

Pour :

- La simulation des opérations et du recyclage (économie circulaire)
- ...

## LE JUMEAU, UNE PLATEFORME POUR LE DÉVELOPPEMENT DE SERVICES - TOUT AU LONG DE LA VIE D'UNE INFRASTRUCTURE

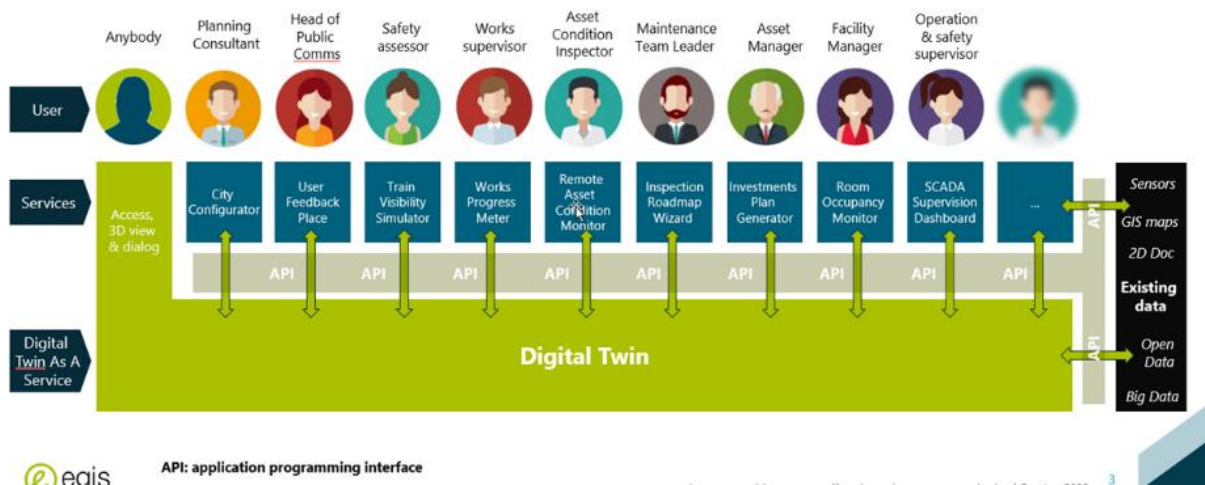


Figure 5 Le jumeau numérique et sa plateforme de services associés - Egis

## 5. CONSTITUTION D'UN JUMENTU NUMÉRIQUE

### 5.1 Principe

#### Introduction

Le jumeau numérique est basé sur la cristallisation de multiples informations agrégées et mise en relation à un instant T.

La réalité (couche physique) est digitalisée d'une part par la maquette numérique et d'autre part par des capteurs (physique ou de processus).

Des informations de formats différents, de natures différentes et soumises à des contraintes qui leur sont propres coexistent dans la couche digitale et vont permettre de nourrir les applications.

Les applications vont servir les usages attendus. Ces usages nécessitent des niveaux de maturité (de complexité) adaptés du jumeau.

La couche digitale est constituée de plateformes qui présentent leurs propres contraintes et caractéristiques rendant la diffusion, l'accès et la persistance des informations complexes.

Toutefois il est possible de classer ces données en 2 groupes :

- Les données des études d'une part (maquette numérique)
- Les données d'opérations provenant des capteurs d'autre part (ombre numérique)

Les unes et les autres étant structurées par les mêmes référentiels du projet.

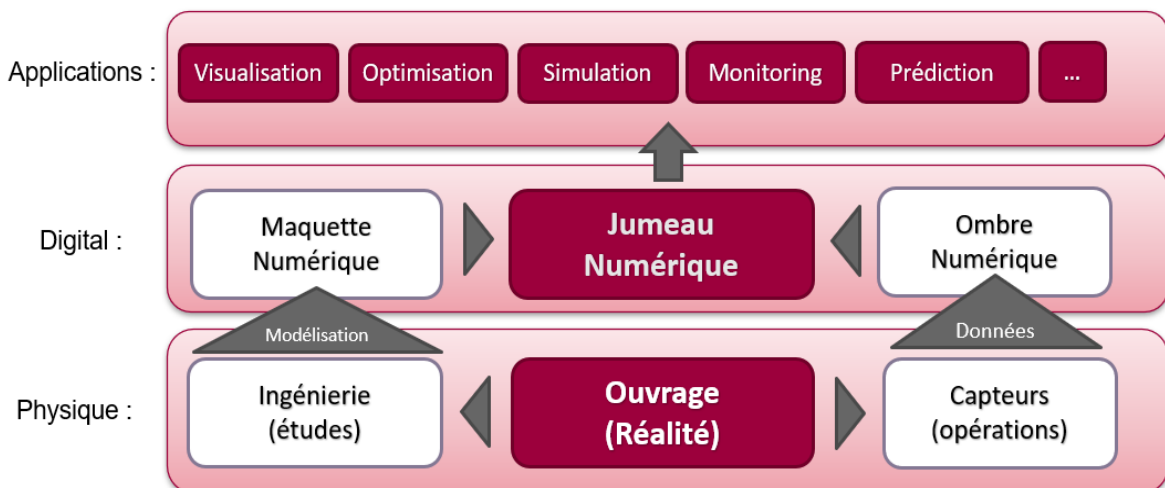


Figure 6 JN : de la conception à l'exploitation, de la réalité au jumeau et aux applications - Ingérop

### 5.2 Le cas particulier des infras : quels défis ?

#### Du référentiel produit au référentiel projet

Contrairement à l'industrie manufacturière où les acteurs ont pour référentiel le produit, les acteurs des bâtiments et ouvrages ont pour référentiel le projet. Concernant les produits manufacturiers, une seule conception permet la réalisation et la fabrication de plusieurs exemplaires d'un même produit. Cependant, chaque projet de construction a une unique résultante. Ceci est particulièrement vrai pour les infrastructures.

L'origine de cette singularité peut s'expliquer de plusieurs façons. Le facteur le plus caractéristique de cette singularité est l'environnement d'utilisation ou d'insertion des produits livrés. En effet, si pour construire des avions, voitures ou bateaux, l'environnement sol ou air n'intervient que de façon générique, ce n'est pas le cas



<p><b>La conception ne s'amortit que sur un seul produit</b></p>	<p>pour une construction. Les conditions climatiques, géotechniques et topographiques locales conditionnent énormément les projets de construction. Il devient indispensable de restituer l'ouvrage à venir dans son contexte, en ville, en campagne, orientation nord, sud, ouest, est. Les parties prenantes différentes et les besoins étant particuliers d'un client à un autre, les constructions n'ont d'autre choix que d'être singulières.</p> <p>Cette singularité de produit confère une difficulté aux entreprises. Les entreprises sont dans l'obligation d'intégrer l'étude de terrain de la construction ainsi que son environnement. La réutilisation de l'existant tel que pratiquée dans l'industrie est assez limitée. Elle se limite au savoir et compétences acquises lors de l'étude des projets qui se rapprocheraient de celle du projet à construire. Ainsi les entreprises se trouvent à mener en parallèle plusieurs projets, dans plusieurs contextes, et différentes localisations.</p> <p>Cependant, la tendance récente est bien d'aller vers la répétabilité des opérations et la préfabrication, accélérée par la numérisation des informations et l'apparition de modèles numériques.</p>
<p><b>Une organisation fragmentée sans leadeur fort</b></p> <p><b>Pas d'écosystèmes</b></p> <p><b>Division des prestations</b></p> <p><b>Harmonisation</b></p> <p><b>Maître d'ouvrage – Exploitant ?</b></p>	<p>Un autre facteur important est la diversité et la variété des entreprises de construction. Les « majors » ne présentent jamais des parts de marchés aussi importantes que celles des manufacturiers automobiles ou aéronautiques de premier rang.</p> <p>Ils ne structurent pas eux-mêmes d'écosystèmes de conception-construction de bâtiments ou d'infrastructures. Comme la construction est largement cadrée par certaines réglementations comme la loi MOP, la répartition des acteurs autour de sa chaîne de valeur est très fragmentée en phase conception-construction particulièrement.</p> <p>Ceci est encore aggravé du fait de la division des prestations d'études ou de conception de celles de la réalisation au niveau des Maîtres d'ouvrages passant des contrats séparés avec le Maître d'œuvre et avec l'Entreprise alors que lui-même, Maître d'ouvrage, n'est pas considéré comme un sachant de l'acte de construire.</p> <p>Il est donc délicat de trouver les meilleurs optima entre les contraintes de conception et celles de réalisation.</p> <p>La capitalisation des connaissances est naturellement plus difficile que dans le cas de l'industrie ou tout industriel connaît les arbitrages à réaliser lui-même entre deux prestataires quel qu'en soit les prestations demandées et leurs imbrications.</p> <p>L'harmonisation des moyens et de la connaissance devient donc une limite à surmonter, encore plus difficile car les outils utilisés au sein d'un même projet sont ceux des entreprises et concepteurs associées sur ce projet, toutes indépendantes entre elles sans intégrateur clairement désigné.</p> <p>Pour les mêmes raisons du code des marchés publics, le Maître d'ouvrage est peu en lien avec les futures exploitants et leurs besoins induisant une lacune dans la prise en compte des objectifs d'usages et de maintien en condition opérationnel. Il devient difficile de gérer les données en phase post-construction puisque les besoins n'en ont pas été suffisamment identifiés à l'amont, ce qui peut s'avérer dangereux en cas d'incidents majeurs (ex : fracture du pont de Gènes).</p>
<p><b>Un temps très long pour le cycle de vie</b></p>	<p>Un autre élément à considérer, en plus de cette singularité, est le temps long entre la première étude et la réalisation, décrite en introduction. Cela implique de multiples phases, longues, avec des niveaux de précisions différents mais qui se nourrissent chacune de la phase précédente. Avec de multiples acteurs pour chacune des phases, voire de propriétaires et d'usages.</p>
<p><b>Des complexités différentes de</b></p>	<p>Les données sur les bâtiments et les structures deviennent de plus en plus complexes et abondantes par la multiplication des outils et des formats de données.</p>

<b>construction et d'exploitation</b>	<p>Il est donc difficile de générer des informations exploitables dans tous les outils et dans toutes les phases.</p> <p>Il est donc nécessaire d'adopter des démarches de traitement et qualification de la donnée afin de n'exploiter que ce qui est nécessaire et validé.</p>
<b>Domaines sollicités</b>	Toute infrastructure est un objet physique intégré dans un environnement physique et vivant avec lequel elle entretient de multiples interactions que cela soit par des services rendus ou par des impacts négatifs ou positifs ou encore des contraintes posées aux autres activités et à la biosphère.
<b>Types d'ouvrages</b>	Son objet même peut être infiniment varié : aéroports, gares, ports, autoroutes et routes, voies ferrées, production d'énergie, lignes de transports d'énergie, gazoducs.
<b>Autres systèmes impactés</b>	Mais, de surcroît, comme explicité ci-avant, l'infrastructure est en interaction permanente avec le public et les usagers certes, mais aussi avec d'autres systèmes plus vastes répondant à des gouvernances et des horizons de décision spatial et temporel tout à fait différents : le réseau routier, ferré ou navigable selon le type de l'infrastructure de transport, l'activité industrielle hébergée par l'infrastructure, le cycle de l'eau (hydrologie et hydrographie, agences de bassin en France, pollution des eaux), le cycle de l'air (pollution atmosphérique), la biosphère (la faune et la flore, l'agriculture, la pollution des sols).
<b>Activités de mise en œuvre</b>	Durant son cycle de vie, spécialement durant les phases de construction et d'exploitation maintenance, une infrastructure repose pour son fonctionnement ou son développement sur de multiples activités, tâches et ressources tant humaines que matérielles très développées relevant des sphères scientifique et technologique de l'ingénierie et du management de projet.
<b>Une nécessaire synthèse</b>	<p>Les données collectées et traitées par un jumeau numérique d'une infrastructure relèvent donc de champs disciplinaires dont certains sont propres au domaine de l'infrastructure ou majoritairement actionnés par lui (le génie civil et la géotechnique) mais dont d'autres (les engins de chantiers, les activités humaines, l'environnement, l'hydrologie, les activités de secours) sont majoritairement développées par d'autres communautés humaines ou industrielles que la sienne.</p> <p>Les paragraphes suivants proposent tentent un premier inventaire non exhaustif des interactions nécessaires à la mise en œuvre d'un jumeau numérique.</p>

### 5.3 Contraintes du secteur des infrastructures et ressources à mobiliser

<b>Spécificité</b>	Les infrastructures sont publiques, partagées, étendues et mobilisent de nombreux acteurs. Par conséquent il est nécessaire d'ajouter ces contraintes aux modèles de jumeaux numériques inspirés de l'industrie qui n'ont pas ces spécificités
<b>Temporalité</b>	Le jumeau numérique est initié dès les premières ébauches de conception aussi frustes que soit le modèle qu'il est possible de réaliser à cette étape. Ce jumeau va beaucoup plus loin (capacité de simulations des fonctions attendues) que ce qu'il est convenu d'appeler la maquette numérique car il doit représenter également la perspective fonctionnelle du système-produit et du système-service (tous deux constitutifs du système à faire) et non pas seulement la perspective organique privilégiée par la maquette numérique. Durant la construction proprement dite, il est alimenté par les données d'avancement et d'interventions provenant des lieux de réalisation. Durant l'exploitation et la maintenance, il est alimenté par les données qualifiant les divers états opérationnels (exploitation normale, situations d'urgences ou dégradées, maintenance, rénovation etc.) et met à disposition des utilisateurs les données correctement calibrées aux usages. Il exploite les données en temps réel et doit permettre la prédiction.

<b>Archive</b>	Il est souhaitable d'archiver le jumeau numérique comme tout patrimoine a minima lors des jalons principaux du cycle de vie comme il en aura été décidé préalablement par le maître d'ouvrage.
<b>Captation</b>	Durant les phases de parallélisme du jumeau numérique avec une réalité tangible, Le système-service du projet doit permettre la captation des données nécessaires pour suivre autant que de besoin la bonne performance des ouvrages. Ceci s'applique que ce soit en phase de construction qu'en phase d'exploitation-maintenance.
<b>Prédiction</b>	Le jumeau numérique, disposant de la description complète de la perspective fonctionnelle, intègre de façon native les simulations du fonctionnement à toutes échelles de temps et d'espace. Il a donc la capacité de répondre aux enjeux de prédiction.

**Pérennité des données**

À la différence des secteurs industriels, la durée de vie d'une infrastructure peut être très longue, l'unité de temps est plus souvent la décennie voire le siècle.

Au cours d'une telle durée de vie, les changements profonds et les rénovations sont multiples donnant lieu à autant de projets nouveaux et de partenariats renouvelés y compris au niveau de leurs propriétaires et gestionnaires.

Il est donc indispensable que les données soient pérennes, accessibles et interprétables sur des périodes qui verront de nombreux bouleversements techniques et de connaissance.

La pérennité des données n'est pas a priori garantie par les formats propriétaires. Les éditeurs doivent exister encore 30 ans après la mise en service d'une infrastructure, et que la permanence dans la structuration de l'information soit assurée

C'est pourquoi le recours à des formats ouverts, normalisés et partagés par les acteurs du secteur des infrastructures est indispensable.

Ces formats doivent maintenir une communauté de représentants de ce secteur en coordination avec les partenaires impactés, et inspirés par les pratiques et retours d'expériences acquis également sur d'autres secteurs d'activité.

**Accès aux données**

Le Jumeau doit permettre l'accès, de façon aisée, aux données décrivant l'infrastructure réelle, par le biais d'une interface ergonomique et ne nécessitant pas l'installation de logiciel.

Il doit pouvoir être interrogé et le cas échéant, enrichi, d'applications tierces validées.

L'interface doit permettre de naviguer dans sa représentation virtuelle & de consulter les données, mais également de les requêter, filtrer, etc. »

**Indépendance**

Bien que le progrès technologique soit inéluctable, il est impossible de se reposer uniquement sur un seul acteur économique. Le modèle du monopole de la connaissance est dangereux.

Il est également nécessaire de respecter les règles de la commande publique (ouverture à une plus large concurrence)

C'est pourquoi l'usage de standard ouvert (et normalisés si possible) doit être une priorité.

**Interopérabilité**

Les formats de données interopérables garantissent la pérennité des informations.

Ils induisent une indépendance des donneurs d'ordres vis-à-vis des solutions et partenaires technologiques.

Ils permettent de couvrir toute l'étendue des domaines d'application du jumeau numérique (réseaux souterrain, infrastructures de transports, etc.) et ses utilisations (planification des chantiers, sécurité, environnement, surveillance...).

Les formats de données s'appuient sur des normes, maintenues par une communauté internationale.

## Directive Inspire

La directive européenne du 14 mars 2007, dite directive Inspire, vise à établir une infrastructure d'information géographique pour favoriser la protection de l'environnement. Ce que la directive appelle infrastructure d'information géographique est un ensemble de services d'information disponibles sur Internet, répartis sur les sites des différents acteurs concernés, et permettant la diffusion et le partage de données géographiques.

### Ses prescriptions

La directive Inspire à deux objectifs principaux :

- Favoriser la prise en compte des préoccupations environnementales par le développement de la production, de l'accès et du partage des données géographiques et environnementales au profit du grand public,
- Rendre accessibles au public les informations géographiques environnementales détenues par les autorités publiques en instituant une obligation, pour ces dernières, de mettre en ligne les données sous format électronique.

### Informations détaillées dans les annexes

Les informations concernées sont déclinées dans les trois annexes de la directive et renvoient à 34 thèmes, ce qui montre une approche extensive de l'environnement qui est retenue par la directive. Plus précisément :

- L'annexe 1 vise les référentiels de coordonnées, les systèmes de maillage géographiques, les dénominations géographiques, les unités administratives, les adresses, les parcelles cadastrales, les réseaux de transport, l'hydrographie et les sites protégés.
- L'annexe 2 concerne les informations liées à l'altitude, à l'occupation des terres, à l'ortho-imagerie et à la géologie<sup>21</sup>.
- L'annexe 3 envisage les thèmes des unités statistiques, des bâtiments, des sols, des usages des sols, de la santé et de la sécurité des personnes, des services d'utilité publique et services publics, des installations de suivi environnemental, des lieux de production et sites industriels, des installations agricoles et aquacoles, de la répartition de la population et de la démographie, des zones de gestion, de restriction ou de réglementation et unités de déclaration, des zones à risque naturel, des conditions atmosphériques, des caractéristiques géographiques météorologiques, des caractéristiques géographiques océanographiques, des régions maritimes, des régions biogéographiques, des habitats et biotopes, de la répartition des espèces, des sources d'énergie et des ressources minérales.

### Une opportunité

Toutes les informations géographiques environnementales collectées et modifiées au cours d'un projet sont nécessaires, à côté d'autres données, pour constituer un jumeau numérique réaliste et performant. La démarche du jumeau numérique va nécessairement organiser la collecte et le traitement des données, objet de la directive. Elle présente donc une opportunité pour satisfaire plus aisément aux exigences de la Directive.

À titre d'exemple, l'on peut citer les problématiques des accès aux services de secours et de sécurité civile ainsi que toutes les interactions et impacts environnementaux.

## Protection des données personnelles

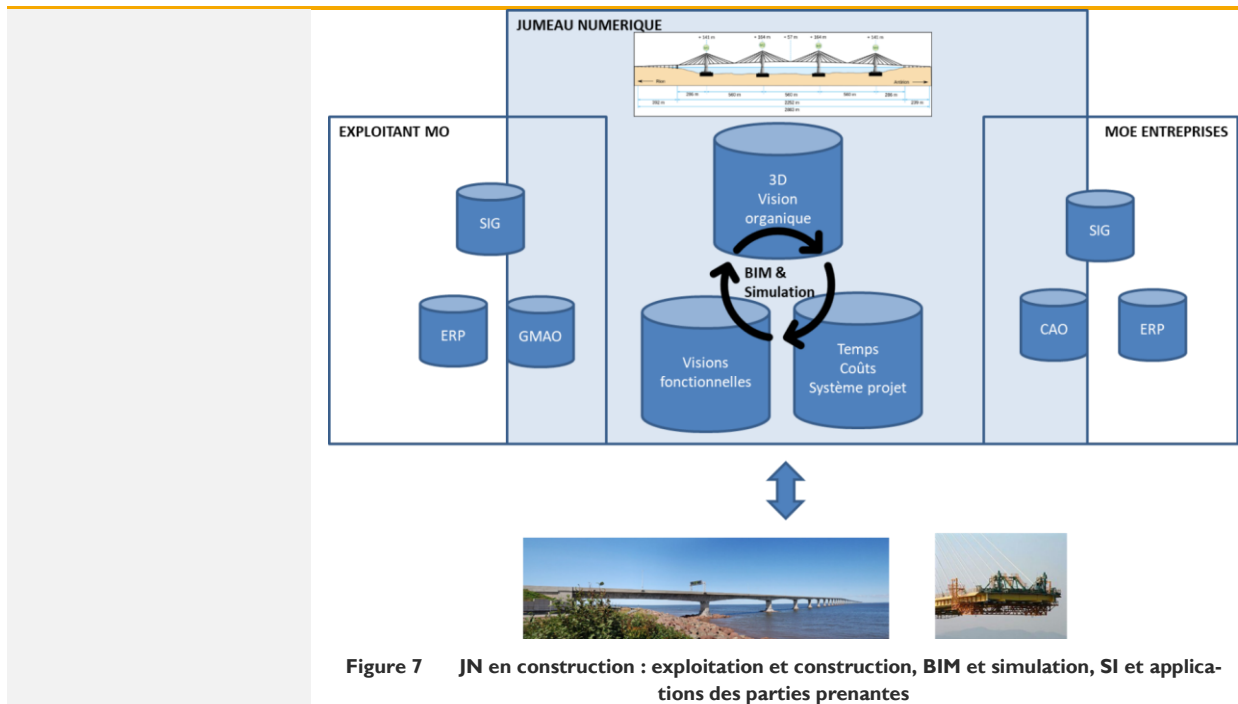
Une attention particulière sera portée à la protection des données personnelles : respect de la Loi informatique et libertés et des obligations CNIL par chaque acteur. La Loi Informatique et libertés régit les aspects en droit français tout autant que le Règlement européen sur la protection des données personnelles (RGPD) qui s'applique à partir du 25 mai 2018 dans les 28 pays de l'Union européenne : il confère davantage de protection pour les citoyens et impose plus de responsabilités à ceux qui collectent, stockent, échangent des données personnelles.

Le Jumeau Numérique devra veiller à protéger de façon spécifique toute donnée qui relèverait de la qualification de données personnelles. Par exemple, c'est le cas des données de consommations individuelles qu'il s'agisse de l'eau ou de l'énergie. Il s'agit également de toutes les activités exercées de façon nominative durant l'exécution d'un projet.

<b>Propriété intellectuelle</b>	En sa qualité essentielle de représentation fidèle et réaliste d'une infrastructure réelle, le Jumeau numérique est soumis aux stipulations des lois et règles régissant la propriété intellectuelle. Le sujet est trop vaste pour être traité ici mais le lecteur est renvoyé pour une première compréhension au livrable de MINnD Saison 1 <i>BIM : aspects juridiques et contractuels</i> .
<b>Multiplicité :</b>  <b>Échelles</b>  <b>Intégration dans de multiples systèmes indépendants</b>  <b>Maîtrise des droits d'accès</b>  <b>Cybersécurité</b>	<p>Dès lors que l'on parle d'une infrastructure les coefficients sont démultipliés, qu'il s'agisse des notions de tailles (mètres), d'impact sur les territoires, de temps ou de finances associées.</p> <p>Pour autant la gymnastique qui consiste à passer d'un élément très précis à une vision d'ensemble « macro » est cruciale pour la bonne gestion de cette infrastructure.</p> <p>Encore bien plus que pour les ouvrages de bâtiment, les infrastructures sont aux prises et en interfaces avec de multiples « systèmes impactés » du fait de leur étendue (par exemple les infrastructures linéaires) et de leur caractère très ouvert. Le bâtiment à l'opposé possède un nombre limité d'interfaces avec son environnement à l'abri duquel son enveloppe le met. Ce n'est pas le cas des infrastructures soumises aux intempéries et qui impactent le milieu naturel, la biosphère, et y développent des impacts parfois très négatifs et des pollutions chroniques (agences de bassin, autorités de l'environnement, riverains et nuisances).</p> <p>Elles sont par ailleurs elles aussi en interface avec les autorités de trafic, de sécurité, de secours. Ce sont là toujours des systèmes possédant leurs gouvernances propres sur lesquelles il est très difficile d'obtenir leur convergence alors que dans le milieu urbain les préoccupations de la gouvernance urbaine arrivent plus facilement à coordonner les acteurs indépendants. Le système de l'infrastructure est donc en interactions avec de multiples autres systèmes indépendants ne faisant pas nécessairement un système eux-mêmes.</p> <p>La multiplicité des acteurs et des fonctions nécessite la mise en place de scénario de droits organisé selon leurs périmètres de compétences et de responsabilités. Ce scénario est indispensable à la mise en place des règles de sécurité nécessaires à tout système numérique.</p> <p>Par sa nature dynamique et actif, la sécurité de l'information du jumeau numérique doit être une action prioritaire. En effet il faut considérer les actions malveillantes comme un risque majeur et particulièrement dans les infrastructures stratégiques ou liées à la protection des usagers.</p>
<b>Environnement</b>	Pour ne reprendre que ces exemples d'interactions avec l'environnement que sont l'impact des infrastructures sur l'écoulement des eaux, sur les pollutions des eaux et des sols, ou encore sur la circulation de la faune, ces autres systèmes doivent être représentés selon les modèles qui leurs sont propres et les informations rendues accessibles et traitées en ce que les infrastructures les impactent. Les modèles de données sont développés par d'autres communautés et il est nécessaire d'entretenir des discussions avec ces communautés pour pouvoir les intégrer.
<b>Planification et ressources</b>	L'activité de construction d'une infrastructure, au rebours de l'activité industrielle, se passe, non pas en atelier contrôlé, mais dans le lieu même de son support physique soumis à tous les aléas climatologiques que l'on sait et aux désorganisations des activités de constructions qui en découlent. La question de la planification et de sa révision récurrente est donc centrale dans tout management de projet. Les objets manipulés par les activités sont de nature différente et concernent les tâches, les ressources, les équipements et relèvent de la discipline technologique de l'ordonnancement ou de chacun des domaines industriels concernés. Là encore, les modèles de données sont développés par d'autres communautés et il est nécessaire d'entretenir des discussions avec ces communautés pour pouvoir les intégrer.

## 5.4 Référentiels de données stockées

<b>Référentiels multiples</b>	La transversalité technique et temporelle du jumeau numérique impose l'accès et l'usage de différents référentiels hétérogènes.
<b>Environnement commun de données (iso 19650)</b>	Environnement collaboratif virtuel, appelé également Référentiel de Données, qui contient toutes les informations numérisées relatives à un projet. Source unique des informations numérisées pour un projet ou un ouvrage donné, utilisée pour collecter, agréger, gérer et diffuser chaque élément d'information dont la documentation technique, la maquette graphique (2D ou 3D) ainsi que les données non graphiques, via un processus géré et des outils adaptés.
<b>Maquette numérique</b>	<p>Il s'agit d'une représentation numérique tridimensionnelle des caractéristiques physiques et/ou fonctionnelles de l'ouvrage pendant tout ou partie de son cycle de vie. Elle est constituée d'objets et d'espaces représentant l'ouvrage, identifiés et renseignés (nature, composition, propriétés physiques, mécaniques, comportement, performances...). Elle peut être unique ou constituée de l'agrégation de maquettes et/ou modèles numériques métiers complémentaires.</p> <p>Cette maquette, tant sur le format des données, sur le niveau de précision affiché que sur les fonctions de l'information manipulée, est fortement dépendante de l'usage attendu du jumeau numérique.</p>
<b>Big Data</b>	<p>Il s'agit d'informations dont les caractéristiques sont caractérisées par les « 3 V » principaux : volume, vitesse et variété et les « 3 V » complémentaires : valeur, vérité et visualisation. Ces caractéristiques imposent des traitements et algorithmes particuliers.</p> <p><b>Volume</b> Pour catégoriser des informations comme du domaine Big Data il faut que le volume de celles-ci soit suffisamment grand. Il s'agit bien d'une estimation relative : une définition classique du « Big Data » est « les ensembles de données suffisamment grands pour nécessiter des super-ordinateurs ».</p> <p><b>Vélocité</b> On appelle « vélocité » la fréquence de génération, acquisition, mise à disposition et mise à jour des données.</p> <p><b>Variété</b> Les données constitutives du « Big Data » proviennent de sources diverses, avec des niveaux de structuration différents (relationnels ou non).</p> <p><b>Valeur</b> Quelle valorisation est apportée par la consolidation des données ?</p> <p><b>Vérité</b> Quelle est la fiabilité des données ?</p> <p><b>Visualisation</b> Étant donné la volumétrie des données à traiter, la mise en forme des données prend une importance capitale pour apporter de la valeur.</p>
<b>Exemple référentiels multiples</b>	



## 5.5 Données captées

### Données temps « réel »

L'interaction nécessaire du jumeau numérique avec la réalité impose l'usage de données captées en complément des données stockées.

Des capteurs sont interrogés en boucles qui déclenchent des événements selon des écart sur valeur de retour.

La digitalisation a remplacé les capteurs câblés par des capteurs en réseau.

#### IoT

L'IoT (Internet Of Things – Internet des Objets en français) est défini selon l'Union Internationale des Télécommunications comme « une infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physique ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution ».

Plus globalement on englobe derrière ce terme plusieurs notions qui sont développés ci-dessous

#### Les capteurs ou objets

Ce sont des équipements qui peuvent fournir un état de donnée. On distingue les équipements passifs et les équipements actifs qui enrichissent les données avant transmission. On peut citer par exemple un thermomètre, un débitmètre, un anémomètre, un fissuromètre...

#### Le réseau

Le réseau permet de transmettre les données aux logiciels exploitants. Il doit être choisi en fonction de la zone de couverture d'usage, de la disponibilité d'une source d'alimentation électrique permanente...

On peut citer Sigfox ou LoRaWAN comme exemples de réseau à faible consommation d'énergie.

Les réseaux Telecom classiques (2G à 5G), le Wifi ou le Bluetooth peuvent également être utilisés comme réseau pour l'IoT. Le choix sera effectué selon le volume de données à échanger, la portée nécessaire et la consommation énergétique.

#### Les données

Les données représentent les valeurs brutes transmises par le capteur qui seront stockées et archivées en base de données.

#### Les informations

Les informations sont les données traitées et analysées.

## Les logiciels

Les logiciels consolident les données en informations et en proposent leurs analyses (Graphiques, mesures, alertes, etc..)

### Contraintes technologiques liées aux plateformes

La mise en place de solutions interopérables au niveau des plateformes et systèmes de gestion de données est soumise à plusieurs contraintes de communication et se repose sur un ensemble de protocoles à traiter :

5	Sémantique partagée
4	Sémantique
3	Échange de données
2	Mise en réseau
1	Infrastructure

Le pivot d'interopérabilité, notamment pour constituer le Jumeau Numérique, se centre sur la problématique d'échange des données (couche 3).

Pour la traiter, l'interopérabilité peut se faire un descendant dans les couches basses au niveau des connexions point à point exposant le modèle de donnée propre à chaque système (ETL) ou au contraire en s'orientant vers une normalisation des couches sémantiques exposées entre systèmes (ESB et protocoles API, oDATA, OPC ...)

Plusieurs types de plateformes peuvent être cités concernant les protocoles d'échanges d'information :

### Systèmes ETL (n <> m)

Dans les systèmes **Extract – Transform – Load**, l'interopérabilité est basée sur une connexion point à point entre un système source et un système cible.

L'extraction d'information du premier système et sa transformation dans un format intermédiaire permet de rendre compatible l'organisation sémantique des informations avec le modèle plateforme cible.

Ce mode d'interopérabilité induit une connaissance et exposition fine du modèle des systèmes interopérés. Il est très dépendant de l'évolution de ces derniers.



Figure 8 Interopérabilité en système ETL

### Bus de données ESB (n > 1 < m)

L'**Enterprise Service Bus** est une technique informatique intergicielle. Son but est avant tout de permettre la communication entre des applications qui n'ont pas été conçues pour fonctionner ensemble. Il permet de bâtir un modèle pivot indépendant des plateformes cibles / sources pour constituer un référentiel agnostique de données.

Le recours à des protocoles de communication type API permet de construire le niveau d'interopérabilité en service (demandeur / fournisseur) sans rentrer dans l'exposition du modèle de données de chaque système.

Ce mode d'interopérabilité permet l'échange d'information en mode Push ou Pull sous forme de services exposés et normalisés.



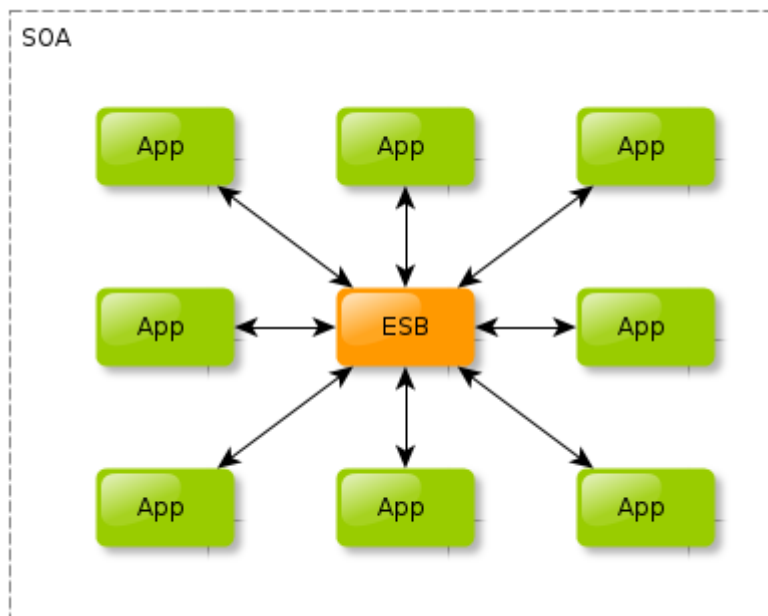


Figure 9 Interopérabilité et architecture ESB

## 5.6 Protocole d'échanges de données

### Standards et normes dans l'industrie

#### REST API :

Ces différents protocoles de communication sont combinables. La grande partie ici est inspirée des Services Web (protocole d'interface informatique de la famille des technologies web permettant la communication et l'échange de données entre applications et systèmes hétérogènes dans des environnements distribués)

On peut citer plusieurs protocoles de communication entre systèmes comme :

API est un acronyme pour Applications Programming Interface. REST (representational state transfer) est un style d'architecture logicielle définissant un ensemble de contraintes à utiliser pour créer des services web. Une API est une interface de programmation qui permet de se "brancher" sur une application pour échanger des données. Cet ensemble d'instructions et de standards informatiques permet à 2 plateformes logicielles de communiquer entre elles de manière automatisée et programmable. Une API est généralement ouverte et proposée par le propriétaire du programme auquel elle se rapporte. La forme complète de l'API REST est l'interface de programmation d'application de transfert d'état REpresentational ou l'API REST. Cela signifie que lorsqu'une API RESTful est appelée, le serveur transfère la représentation des ressources demandées au système client.

#### SOAP

SOAP (ancien acronyme de Simple Object Access Protocol) est un protocole d'échange d'information structurée dans l'implémentation de services web bâti sur XML. Il permet la transmission de messages entre objets distants, ce qui veut dire qu'il autorise un objet à invoquer des méthodes d'objets physiquement situés sur un autre serveur. Le transfert se fait le plus souvent à l'aide du protocole HTTP, mais peut également se faire par un autre protocole, comme SMTP. Le protocole encapsule sous une 'enveloppe' deux parties permettant de décrire le message et l'information à échanger :

- l'enveloppe et son Header contenant les informations sur le message lui-même afin de permettre son acheminement et son traitement,
- un modèle de données qui constitue le format du message et les informations à transmettre (Body).

#### oDATA

L'Open Data Protocol (OData) est un protocole permettant le partage de données. OData est une syntaxe qui permet les mêmes opérations qu'un langage SQL, mais sur des sources de données rendus disponibles par le biais du protocole http.

	<p>Le protocole est développé et maintenu par la Fondation OPC qui regroupe un ensemble hétéroclite de constructeurs. C'est un format d'échange de données indépendant de toute marque et de tout système d'exploitation. Hormis la standardisation du dialogue entre machines et systèmes d'information, le protocole OPC-UA est d'abord élaboré pour la sécurisation des flux de données lors des échanges intra et/ou inter-équipements d'automatisme industriel.</p>
<p><b>OPCUA</b></p>	<p>OPC-UA – pour Open Platform Communications Unified Architecture – est un protocole de communication omni-plateforme d'automatisation industrielle. Peu importent leurs âges respectifs, OPC-UA fait communiquer entre eux robots industriels, machine-outils et automates programmables industriels (API).</p>
<p><b>MQTT</b></p>	<p>MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) est un protocole de messagerie publish-subscribe basé sur le protocole TCP/IP. Il a été initialement développé par Andy Stanford-Clark (IBM) et Arlen Nipper (EuroTech). Il est conçu pour les connexions avec des sites distants où la bande passante du réseau est limitée.</p>

**Besoin d'API standardisées ou normalisées**

Devant l'accélération des flux, qu'ils soient physiques ou d'informations, les échanges temps réel et les interactions entre systèmes en deviennent la norme.

À l'heure des services web et des architectures micro-services, les API se multiplient et permettent à chaque application informatique de publier des services qui seront consommés par d'autres applications. Ces API, aux coûts d'intégration très faibles, sont programmables à partir de composants tiers. Leur construction par assemblage pose la question de l'interopérabilité à grande échelle des API.

Dans le secteur de l'échange de données et des plateformes de collaboration dont font parties les plateformes IoT et Jumeau Numérique, la standardisation des API semble être primordiale à leur industrialisation.

## 5.7 Structures de données en fichiers

**Contraintes liées à la structuration de la donnée en fichiers**

Au-delà même de la structuration et de la normalisation des protocoles d'échanges, la structure même de la donnée influe sur son interopérabilité et sur la chaîne de continuité d'information.

On observe les 2 tendances :

- Une organisation propriétaire et fermée de la structure de la donnée, garantissant un haut niveau de rétention d'information et de performance (mais une capacité plus faible à échanger et exploiter en dehors des outils propriétaires)
- Une organisation ouverte, basée sur des formats ou protocoles standardisés voire normalisés.

Vous trouverez ci-après une description des formats ouverts les plus courants :

**STEP**

Le format **STEP** (Standard for The Exchange of Product model data) ou **ISO 10303** représente le standard pour l'échange de données de produit.

Il a pour objectif d'intégrer leurs processus de conception, de développement, de fabrication et de maintenance.

Le format **STEP** est organisé en **APs** (Application Protocols), construits sur le même jeu d'**IRs** (Integrated Resources), qui fournissent des descriptions pour des notions communes comme les unités de mesure ou la représentation du temps et d'autres sujets éventuellement plus élaborés, dont chacun est dédié à la description d'un schéma de données qui permet de décrire les fichiers d'échanges utilisables par un domaine métier particulier.

On y retrouve, par exemple :

- AP 203: Configuration Controlled Design
- AP 209: Composite and Metallic Structural Analysis and Related Design
- AP 219: Dimensional Inspection Information Exchange

- AP 240: Macro Process Planning
- AP 242: Managed Model Based 3D Engineering.

Ces formats sont particulièrement utilisés dans le secteur industriel (aéronautique, automobile, construction navale, fabrication mécanique, électronique, ...).

Les **IFC** utilisent les mêmes principes que **STEP** et ont réutilisés certaines **IR** de base.

**IFC :** Les **IFC** sont le format d'échanges développé par la communauté internationale de la construction pour couvrir au mieux ses besoins propres.

Développés initialement dans une perspective de description organique (au sens de l'ingénierie des systèmes c'est-à-dire les descriptions des objets physiques) des bâtiments, elle ne couvre encore qu'imparfaitement le domaine.

Les **IFC** nécessitent tout à la fois une extension vers des domaines propres aux infrastructures en comparaison des bâtiments (rail, route, ponts, ports, voies navigables, géotechnique) qui sera largement avancée avec les **IFC 5** mais aussi une meilleure prise en compte des descriptions fonctionnelles.

**BCF :** Le **BCF** (BIM collaboration format) est un format d'échanges qui permet d'enregistrer et véhiculer un fil de commentaires entre acteurs d'une équipe, autour d'un sujet principal (*issue* en anglais) et d'un ou plusieurs objets dans une maquette numérique.

Ce format permet de retenir l'emplacement et le point de vue (*viewpoint*) où a pris naissance la discussion, et d'embarquer éventuellement des images (photos, vues du modèle). Il transporte également une série de métadonnées qui permet d'assurer la gestion et le suivi du sujet (type d'observation, degré de priorité, nom de l'auteur, date de création ou de modification du sujet, ...) et de toutes les observations qui viennent enrichir le sujet au fil de l'eau (nom de l'auteur de l'observation, date, etc.).

Le fichier «**.BCF**» est basé sur XML.

Ce format a été mis au point en 2009 : il est ouvert (sa spécification est disponible dans la plateforme GitHub), maintenu par buildingSMART International et il est interopérable : c'est-à-dire qu'il permet le dialogue entre - par exemple - un outil de collecte de données sur le terrain, un outil de modélisation BIM, et un outil de visualisation de maquettes compatibles avec ce standard.

Le **BCF** fluidifie la collaboration entre parties prenantes de la construction. En phase exploitation d'une infrastructure, il permettrait gérer des signalements et des demandes d'interventions. Il serait également adapté à enregistrer les décisions prises dans la mémoire du jumeau numérique, à des fins d'archivage patrimonial.

**CityGML :** **CityGML** est un schéma de données et un format de fichiers **XML** destiné à permettre le stockage et l'échange de modèles numériques de villes. C'est une application du **Geography Markup Language** Version **3.1.1 (GML3)**, la norme internationale pour l'échange de données géographiques gérée par l'**Open Geospatial Consortium (OGC)** et le comité **TC211** de l'**ISO**.

L'objectif qui a motivé le développement de **CityGML**, consiste à définir les entités, les relations et les attributs de base du modèle numérique 3D d'une ville afin de permettre des actualisations faciles de celui-ci et sa réutilisation par différents domaines d'application.

Contrairement aux **IFC** dont la modélisation architecturale repose sur des volumes (des solides), la représentation **CityGML** des bâtiments repose sur la représentation de surfaces

Les principales caractéristiques de **CityGML** sont :

- Une modélisation de l'information géographique relative aux paysages urbains (ontologie) basée sur les normes **ISO** de la famille **191xx**.
- Une représentation des géométries **3D** basée sur **GML3** (norme **ISO 19107**).

<p><b>Open Geospatial Consortium (OGC)</b></p> <p><b>Geographic Data File (GDF)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une représentation des caractéristiques de la surface des objets (texture, matériaux, etc.).</li> <li>• Des classes ou des agrégations d'objets pour représenter : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Les modèles numériques de terrain.</li> <li>– Les sites (actuellement applicables aux seuls bâtiments, et dans un future proche aux ponts et aux tunnels).</li> <li>– La végétation.</li> <li>– Les ressources hydrauliques.</li> <li>– Les réseaux de transport (en termes de graphes et de surfaces 3D).</li> <li>– Le mobilier urbain.</li> <li>– Les objets urbains génériques et leurs attributs.</li> <li>– Des groupes récursifs d'objets que les utilisateurs peuvent créer en fonction de leurs besoins.</li> </ul> </li> <li>• Des niveaux de détails pour les modèles : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Niveau 1 : paysage, région géographique.</li> <li>– Niveau 2 : ville, aire urbaine.</li> <li>– Niveau 3 : quartier, projet.</li> <li>– Niveau 4 : architecture extérieure, signalisation.</li> <li>– Niveau 5 : architecture intérieure.</li> </ul> </li> <li>• Des constructeurs qui permettent de représenter des relations de généralisation entre des objets qui ont été définis à des niveaux de détails différents.</li> <li>• Des connecteurs topologiques entre des structures (géométries dépendantes).</li> <li>• Des points d'extension qui permettent d'inclure des informations spécifiques à un domaine ou d'incorporer des données conformes à d'autre standards (par exemple, la norme américaine <b>NBIMS</b> - <i>National Building Information Model Standard</i>).</li> </ul> <p><b>Open Geospatial Consortium (OGC)</b> : est une organisation internationale à but non lucratif créée en 1994, qui sans être un organisme officiel, rassemble aujourd'hui des sociétés privées, des administrations, des universités de diverses nationalités. Cette organisation a pour objectif de développer et promouvoir des standards ouverts, libres de redevances d'usage, favorisant l'échange des informations géographiques et des services qui y sont liés. De 1994 à 2004, <b>OGC</b> a utilisé l'enseigne <b>Open GIS Consortium</b> pour se désigner. L'<b>OGC</b> est l'un des principaux animateurs et des principaux contributeurs du comité <b>TC 211</b> (Information Géographique/Géomatique) de l'<b>ISO</b> et collabore activement avec d'autres consortiums comme l'<b>IETF</b>, le <b>W3C</b> ou <b>OASIS</b>.</p> <p><b>Geographic Data File (GDF)</b> : utilisé pour décrire et transférer des données relatives aux réseaux routiers. Ce standard définit les objets, leurs attributs et leurs relations : il équipe de nombreuses applications des domaines de la circulation : transports, navigation embarquée, etc..</p>
---	--

## 5.8 Outils et méthodes

<p><b>Des compétences étendues</b></p>	<p>À cette étape, il est également nécessaire de s'intéresser à des technologies qui pourrons supporter ou interagir avec le jumeau numérique.</p>
<p><b>Base de données</b></p> <p><b>Relationnelle</b></p>	<p>Un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) ou plus simplement une base de données permet de stocker et chercher des données brutes avec un langage d'interrogation qui lui est propre.</p> <p>Lorsqu'une base de données est dite relationnelle les données sont stockées de manière structurée dans des tables avec des liens (relations entre les différentes données. Il s'agit du modèle le plus courant. SQL (Structured Query Language) est une famille de langage d'interrogation courante pour ce type de base de données.</p>

<p><b>NoSQL</b></p>	<p>Une base de données dite NoSQL (pour Not Only SQL) est au contraire peu ou pas structurée. Les données sont ici organisées en grappes. Les bases de données NoSQL se destinent souvent à la gestion de données volumineuses, distribuées sur plusieurs sites.</p>
<p><b>Plateforme collaborative</b></p>	<p>Système informatique qui met à disposition des outils pour faciliter le travail collaboratif concernant la conduite de projet, la gestion de connaissances ou le fonctionnement de l'organisation.</p> <p>Pour plus d'informations, se référer aux livrables MINnD du GT 6.2 – Plateforme collaboratives et collaboration de plateformes.</p>
<p><b>PLM</b></p>	<p>Le PLM (Product LifeCycle Management) est, selon le cabinet d'analyse CIMDATA : « Une approche stratégique d'entreprise, qui applique un ensemble de solutions pour soutenir dans un mode collaboratif la création, la gestion, la publication et l'utilisation de l'information de définition des produits, en entreprise étendue, du concept à la fin de vie, en intégrant les personnes, les processus, les systèmes et l'information ».</p> <p>Dans la plupart des cas d'usages du jumeau numérique, il sera nécessaire d'avoir recours au PLM</p> <p>Pour plus d'informations, se référer au livrable MINnD du GT 3.1 – Intégration progressive du PLM dans l'exploitation.</p>
<p><b>Intelligence Artificielle</b></p> <p><b>Cas d'usage</b></p>	<p>L'intelligence artificielle est un domaine de l'informatique qui met en place un certain nombre d'algorithmes à même de reproduire une intelligence réelle.</p> <p>Les outils d'intelligence artificielle comme le deep learning ou les réseaux de neurones peuvent traiter les données pour obtenir une analyse prédictive des comportements de l'ouvrage ou de l'équipement.</p>
<p><b>Réalité virtuelle et augmentée</b></p> <p><b>Réalité virtuelle</b></p> <p><b>Réalité augmentée</b></p>	<p>Il s'agit de technologies permettant de simuler pour un utilisateur un environnement artificiel partiel ou complet.</p> <p>La réalité virtuelle simule un environnement totalement artificiel dans lequel l'utilisateur est immergé et peut interagir. Selon les niveaux d'immersion il est possible de simuler différents sens : la vue (à l'aide d'un dispositif type casque), le toucher (à l'aide de gants).</p> <p>La réalité augmentée complète un environnement réel de données virtuelles. Typiquement il est possible d'accéder à ce type de réalité avec un casque ou par l'écran d'un smartphone qui va ajouter ces éléments dynamiquement en filmant la scène.</p>
<p><b>Simulation</b></p> <p><b>Cas d'usage</b></p>	<p>La simulation numérique est un domaine de l'informatique qui permet l'exécution de programmes dont l'objectif est de reproduire des comportements physiques.</p> <p>L'efficacité des algorithmes de simulation est un élément critique dans le choix d'un outil de simulation. En effet dans le cas de simulations prédictives de pannes, la rapidité d'obtention des résultats peut être critique pour réellement anticiper les pannes. La simplification de modèles (réduction du nombre de paramètres pour se limiter aux principaux) peut être également un levier de performances.</p> <p>Il est possible dès la conception d'étudier les impacts de variantes en modifiant les simulations paramètre par paramètre. Des plans d'actions (techniques, financiers, juridiques...) peuvent alors être déduits de la comparaison de différents scénarios.</p>

## 5.9 Architecture de systèmes d'information

<b>Urbanisation du Système d'informations</b>	<p>Le système d'informations permettant de mettre en place le Jumeau Numérique intègrera certainement plusieurs applications.</p> <p>Ces applications nécessiteront des architectures physiques et logicielles variées.</p>
<b>Couplage faible</b>	Chaque application composant le jumeau ne doit couvrir qu'un seul domaine et ne pas avoir de lien fort avec les autres applications. L'impact sera donc faible en cas de mise à jour de cette application.
<b>Cohérence forte</b>	Malgré le couplage faible, toute modification apportée à une donnée dans une application doit être appliquée à la même donnée vue d'une autre application si les données sont dupliquées.
<b>Architectures</b>	<p>Le terme Architecture est imprécis, il existe plusieurs types d'architecture. Pour chacun de ces types plusieurs déclinaisons sont possibles, répondant à des besoins et contraintes différentes.</p>
<b>Architecture logicielle</b>	Il s'agit de tous les éléments et interactions permettant de décrire comment est implémenté un besoin fonctionnel.
<b>Architecture physique</b>	Il s'agit de tous les éléments matériels permettant de supporter l'architecture logicielle : serveurs, postes de travail, équipements réseaux (pare-feux, routeurs...).
<b>Architecture logicielle</b>	<p>Il n'y a pas de bonne architecture logicielle en absolu. Différentes pratiques existent et répondent chacune à des problématiques différentes. En voici quelques exemples :</p>
<b>Décomposition fonctionnelle</b>	Il s'agit de décomposer les fonctions en sous-fonctions et ainsi de suite jusqu'à obtenir la granularité la plus fine possible. Cette architecture a rapidement été adaptée en décomposition de modules, sur le même principe.
<b>Architecture distribuée</b>	Il s'agit d'une déclinaison de l'architecture précédente où les composantes de la décomposition (fonctions, modules...) sont réparties sur différents éléments du réseau
<b>Architecture en couches (tier)</b>	Chaque couche contient des fonctions / composants travaillant sur un domaine commun. Chaque couche de niveau supérieur nécessite les couches de niveau inférieur pour fonctionner.
<b>Architecture client/serveur</b>	Dans cette architecture un serveur central (reposant par exemple sur une base de données) gère les opérations d'ajout, modification, suppression de données. Les clients (qui gèrent les IHM et les contrôles de celles-ci) se connectent à ce serveur pour effectuer des demandes d'opérations. Avec cette architecture il est difficile de faire évoluer le serveur sans devoir également mettre à jour tous les clients.
<b>Architecture trois tier(s)</b>	<p>Cette architecture classique spécialise l'architecture en couches en définissant 3 couches (accès aux données, traitement, présentation) dans un paradigme client/serveur.</p> <p>Appliquée aux sites web, la couche de présentation est le HTML affiché dans le navigateur, la couche de traitement réside dans le serveur web et la couche d'accès aux données réside dans la base de données associée.</p>
<b>Architecture orientée services (SOA)</b>	Dans l'architecture orientée services des composants sont exposés sous formes de services réutilisables, pouvant être appelés avec une syntaxe commune et interopérable. L'exemple le plus connu de cette architecture est le principe de web services reposant sur SOAP (langage de communication XML) ou REST (langage de communication JSON).
<b>Architecture micro-services</b>	L'architecture micro-services adapte le principe de l'architecture orientée services au contenu même de l'application. La décomposition fonctionnelle de l'application est alors réalisée sous formes de services/mini applications autonomes.

## 6. CONDITIONS DE SUCCÈS

### Check-list

- Impliquer tous les acteurs nécessaires
- Anticiper l'élaboration
- Valider l'expression de besoin et les applications visées
  - Usages (applications)
  - Fonctions (couche digitale)
- Cadrer le besoin aux usages maîtrisés
- Référentiels de données :
  - Disposer des accès nécessaires
  - Établir Les droits d'accès et la sécurité de l'accès aux données
  - Disposer d'un dictionnaire d'objets et de données (Infrastructures et usages)
  - Disposer de règles et processus de mise à jour des informations
  - Disposer d'une description du système réel en fonctionnement
  - Système produit (voie, train)
  - Système service (Transport)
  - Définir La gestion des données captées et leur durée de vie
  - Recenser les éventuels pilotes numériques ou analogiques existant (Automates, Superviseur)
- Usage recommandé des normes et standards
- Définir le type d'architecture de système d'informations qui doit être mise en œuvre
- Décrire l'architecture du jumeau

### Acteurs à impliquer

La mise en place d'un jumeau numérique dépasse totalement le cadre de l'informatique ou de l'ingénierie de conception et nécessite la collaboration de toutes les disciplines et en particulier des métiers de terrain en phase exploitation / maintenance.

Les maîtres d'ouvrage, en phase de construction, jouent un rôle important dans l'adhésion à la démarche. Leur degré d'utilisation des jumeaux numériques a valeur d'exemples auprès de leurs collègues concernés par la gestion patrimoniale et l'exploitation / maintenance.

### Anticiper

Le succès d'une démarche de mise en place d'un jumeau numérique au sein d'une organisation repose sur la capacité de cette dernière à l'inscrire au plus tôt dans le cycle de vie des ouvrages (phases conception, construction...).

Utiliser un jumeau numérique dès les phases amont a l'avantage de :

- Développer l'adhésion des utilisateurs concernés par le jumeau à terme (en phase exploitation / maintenance) en les amenant à utiliser le jumeau avant l'exploitation / maintenance ;
- Développer progressivement dans l'organisation de nouvelles pratiques de travail, mobilisant plus largement les représentations visuelles (3D ou 2D), une gestion de l'information centrée-objet (plutôt que centrée-fichier), et la collaboration sur plateforme ;
- Calibrer l'expression de besoin (voir ci-après)

... ce qui tend à diminuer les coûts et accélérer la mise en place du jumeau.

<p><b>Expression du besoin</b></p>	<p>L'expression du besoin permettra de déterminer les utilisateurs ciblés, les cas d'applications qui doivent être supportés par le ou les jumeaux numériques, et les Systèmes d'informations à intégrer dans la démarche.</p> <p>Plus les utilisateurs finaux sont associés dans la définition de ces besoins, plus le jumeau numérique qui en découlera sera pertinent et trouvera naturellement sa place dans l'activité des opérationnels.</p> <p>Il est recommandé d'accompagner la définition des besoins par des expérimentations parfois appelées des Proofs Of Concept pour qualifier plus précisément le besoin.</p>
<p><b>Minimum maîtrisé</b></p>	<p>Les démarches de création et d'utilisation d'un jumeau numérique ont plus de chance de réussir s'ils elles démarrent sur la base</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• D'un périmètre d'application restreint sur le plan technique et géographique (par ex. un tronçon d'infrastructure) et d'un jeu de données si possible déjà existant et suffisamment représentatif de la complexité des activités qu'elles supportent.</li> <li>• D'informations vivantes (ou chaudes, par opposition aux données froides), qui ont vocation à être régulièrement utilisées et dont le protocole de mise à jour a été pensé.</li> </ul> <p>Une stratégie de récupération du nécessaire et suffisant avec une sélection des données doit être définie.</p> <p>La frugalité des jumeaux favorise l'adoption. Si un opérateur doit avoir accès à une donnée, il doit la trouver vite et avoir confiance dans le résultat de sa recherche.</p>
<p><b>Gestion des données</b></p>	<p>Il est nécessaire de définir une méthode, des « règles » et des procédures pour l'enrichissement et le maintien à jour des données qui contribuent au jumeau numérique, ainsi que les passerelles entre les différents systèmes d'information connectés au jumeau (GMAO, GTC/GTB, cartes SIG, PLM etc.).</p> <p>Cette tâche doit être confiée à une équipe spécialisée en data management et familière des métiers traditionnels concernés par l'infrastructure physique. De même cette équipe doit avoir la responsabilité d'animer, stimuler les mises à jour du jumeau, vérifier le respect des règles de structuration données, dans le temps.</p> <p>Cette mission d'opérateur de jumeau peut être déléguée à une équipe indépendante des exploitants ou du gestionnaire de patrimoine, pourvu que le jumeau reste bien sous l'autorité du donneur d'ordre.</p>
<p><b>Effort de normalisation</b></p>	<p>Bien que certains composants disposent déjà de normes telles que les IFC (ISO 16739), Description de l'information (ISO19650) par exemple il reste de nombreux champs qui restent à couvrir : <sup>2</sup></p> <p>Dans le cas des systèmes ferroviaires, par exemple, l'utilisation des ontologies permet de fédérer les différents modèles sémantiques qui sont développés à différents niveaux tels que les objets (IFC pour le BIM) ou les sous-systèmes fonctionnels.</p> <p>La fédération des ontologies est réalisée dans le cadre du projet européen LinX4Rail et se poursuit dans le cadre du programme européen ERJU (Europe's Rail Joint Undertaking).</p> <p>La vision de description du réseau, RailTopomodel, devenue RailSystemModel, est incluse dans cette fédération.</p> <p>Le résultat de cette fédération (Conceptual Data Model) va faire l'objet d'une normalisation dès que son contenu sera stabilisé.</p>



D'un point de vue plus large, au-delà de l'aspect sémantique et des ontologies<sup>1</sup>, l'architecture de base des jumeaux numériques devrait faire l'objet d'une normalisation. Un exemple d'architecture est donné ci-dessous.

L'architecture fonctionnelles du jumeau numérique devraient être similaire à celle du système qu'il représente.

Comme on peut le voir ci-dessous sur cette architecture retenue par la SNCF, le jumeau numérique s'appuie sur des données, des modèles, des fonctions et une organisation en couches. Il offre des services s'appuyant sur un modèle unique.

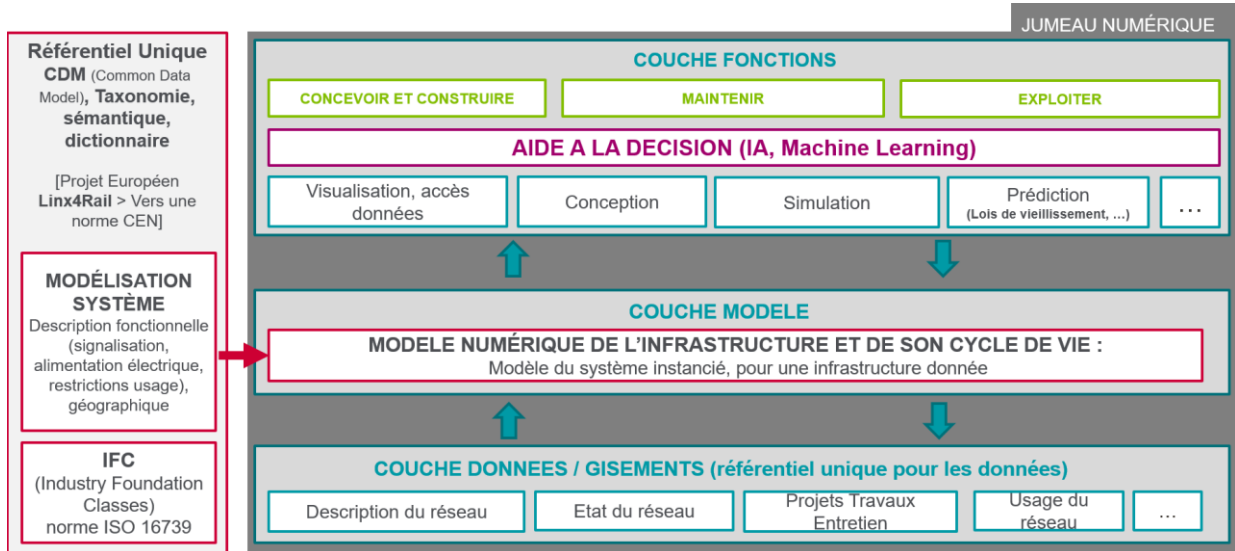


Figure 10 Vision de l'architecture du jumeau numérique selon la SNCF. Source SNCF.

<sup>1</sup> Ontologie : En informatique et en science de l'information, une ontologie est l'ensemble structuré des termes et concepts représentant le sens d'un champ d'informations, que ce soit par les métadonnées d'un espace de noms, ou les éléments d'un domaine de connaissances

# 7. TABLE DES MATIÈRES

Mots clés principaux (Fra).....	1
Mots clés spécifiques au livrable (Fra).....	1
Main key words (Eng).....	1
Deliverable key words (Eng).....	1
<b>I. SYNTHÈSE.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Contexte.....</b>	<b>2</b>
Évolution du BIM.....	2
Le double virtuel «vivant».....	2
Flux et base de données dynamiques.....	2
Common Data Environment.....	2
<b>1.2 Apports et Position de MINnD.....</b>	<b>2</b>
Jumeau Numérique.....	2
Donner une description du JN et de ses interactions... ..	2
...et une architecture associée.....	2
...nécessitant des avancées en normalisation.....	3
Une architecture numérique distribuée et ouverte.....	3
Définition.....	3
<b>1.3 Propositions.....</b>	<b>3</b>
Nécessité de collaborer.....	3
Stocker les données.....	3
Collaborer.....	3
Innover.....	4
Ce qu'il reste à faire.....	4
Et l'humain dans tout cela ?.....	4
Le CDE de demain.....	4
<b>2. RÉSUMÉ DU LIVRABLE / ABSTRACT.....</b>	<b>5</b>
Résumé.....	5
Abstract.....	5
<b>3. INTRODUCTION AU JUMEAU NUMÉRIQUE.....</b>	<b>6</b>
Introduction.....	6
Le BIM.....	6
DOE numérique, un état de l'ouvrage.....	6
Vie de l'ouvrage, un BIM perpétuel ?.....	6
Le jumeau numérique.....	6
Objectifs.....	7
Donner une description du JN et de ses interactions... ..	7
...et une architecture associée.....	7
...nécessitant des avancées en normalisation.....	7
<b>4. ÉTAT DE L'ART DES JUMEAUX NUMÉRIQUES.....</b>	<b>8</b>
<b>4.1 Vision générale.....</b>	<b>8</b>
Vision et définition.....	8
Origine.....	8
Représentation et couplage virtuel - réel.....	8
Des efforts internationaux.....	9
<b>4.2 Les jumeaux numériques par secteurs.....</b>	<b>9</b>
La genèse : l'industrie aérospatiale.....	9
Application.....	9
Le cas de l'automobile.....	10
Améliorer les processus de production.....	10
Améliorer l'usage et la maintenance de l'automobile.....	10
Améliorer la conception d'un modèle à l'autre.....	10
Le secteur manufacturier.....	11

	Améliorer la rétroaction utilisation vers conception et production .....	11
	Exemple des équipements ferroviaires.....	11
	<b>Autres secteurs/applications.....</b>	<b>11</b>
	Le cas du jumeau du corps humain .....	11
<b>4.3</b>	<b>Ceux du BTP et des infrastructures ?.....</b>	<b>12</b>
	<b>Un secteur en évolution .....</b>	<b>12</b>
	Maintenant.....	12
	<b>Processus émergeant.....</b>	<b>12</b>
	Restons confiant.....	12
	<b>Applications.....</b>	<b>12</b>
	Planification de conception .....	12
	Opérations standard.....	12
	Opérations en modes dégradés.....	12
	Maintenance préventive .....	12
	Opérations de secours .....	12
	Performance des services rendus.....	12
	Résistance mécanique.....	12
	Consommation énergétique.....	12
	Bilan carbone.....	12
	Impacts environnementaux .....	13
	Avancement des travaux .....	13
	Planification.....	13
	Allocation des ressources.....	13
	Assistance au personnel de chantier .....	13
	Analyses de sécurité .....	13
	Qualité et conformité des travaux.....	13
	Résistance mécanique.....	13
	Formations des opérateurs .....	13
	<b>Optimisations et pérennités .....</b>	<b>13</b>
	En conception.....	13
	En construction.....	13
	Lors de la prise en main.....	13
	En l'exploitation.....	13
	En déconstruction de démantèlement .....	14
<b>5.</b>	<b>CONSTITUTION D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE.....</b>	<b>15</b>
<b>5.1</b>	<b>Principe.....</b>	<b>15</b>
	Introduction .....	15
<b>5.2</b>	<b>Le cas particulier des infras : quels défis ?.....</b>	<b>15</b>
	Du référentiel produit au référentiel projet.....	15
	La conception ne s'amortit que sur un seul produit.....	16
	Une organisation fragmentée sans leader fort.....	16
	Pas d'écosystèmes.....	16
	Division des prestations .....	16
	Harmonisation .....	16
	Maitre d'ouvrage – Exploitant ? .....	16
	Un temps très long pour le cycle de vie .....	16
	Des complexités différentes de construction et d'exploitation .....	16
	Domaines sollicités.....	17
	Types d'ouvrages .....	17
	Autres systèmes impactés.....	17
	Activités de mise en œuvre.....	17
	Une nécessaire synthèse .....	17
<b>5.3</b>	<b>Contraintes du secteur des infrastructures et ressources à mobiliser .....</b>	<b>17</b>
	Spécificité .....	17
	Temporalité .....	17
	Archive.....	18
	Captation .....	18
	Prédiction.....	18

Pérennité des données.....	18
Accès aux données .....	18
Indépendance.....	18
Interopérabilité.....	18
Directive Inspire .....	19
Ses prescriptions.....	19
Informations détaillées dans les annexes .....	19
Une opportunité.....	19
Protection des données personnelles .....	19
Propriété intellectuelle.....	20
Multiplicité :.....	20
Échelles.....	20
Intégration dans de multiples systèmes indépendants .....	20
Maîtrise des droits d'accès .....	20
Cybersécurité .....	20
Environnement .....	20
Planification et ressources .....	20
<b>5.4 Référentiels de données stockées .....</b>	<b>21</b>
Référentiels multiples .....	21
Environnement commun de données (iso 19650) .....	21
Maquette numérique .....	21
Big Data .....	21
Volume.....	21
Vélocité .....	21
Variété.....	21
Valeur .....	21
Vérité.....	21
Visualisation .....	21
Exemple référentiels multiples.....	21
<b>5.5 Données captées .....</b>	<b>22</b>
Données temps « réel ».....	22
IoT .....	22
Les capteurs ou objets.....	22
Le réseau.....	22
Les données .....	22
Les informations .....	22
Les logiciels.....	23
Contraintes technologiques liées aux plateformes.....	23
Systèmes ETL .....	23
(n <> m) .....	23
Bus de données ESB.....	23
(n > l < m) .....	23
<b>5.6 Protocole d'échanges de données .....</b>	<b>24</b>
Standards et normes dans l'industrie .....	24
REST API : .....	24
SOAP.....	24
oDATA.....	24
OPCUA .....	25
MQTT .....	25
Besoin d'API standardisées ou normalisées .....	25
<b>5.7 Structures de données en fichiers .....</b>	<b>25</b>
Contraintes liées à la structuration de la donnée en fichiers .....	25
STEP .....	25
IFC : .....	26
BCF : .....	26
CityGML : .....	26

	Open Geospatial Consortium (OGC) .....	27
	Geographic Data File (GDF) .....	27
<b>5.8</b>	<b>Outils et méthodes .....</b>	<b>27</b>
	<b>Des compétences étendues .....</b>	<b>27</b>
	<b>Base de données .....</b>	<b>27</b>
	Relationnelle .....	27
	NoSQL .....	28
	<b>Plateforme collaborative .....</b>	<b>28</b>
	<b>PLM .....</b>	<b>28</b>
	<b>Intelligence Artificielle .....</b>	<b>28</b>
	Cas d'usage .....	28
	<b>Réalité virtuelle et augmentée .....</b>	<b>28</b>
	Réalité virtuelle .....	28
	Réalité augmentée .....	28
	<b>Simulation .....</b>	<b>28</b>
	Cas d'usage .....	28
<b>5.9</b>	<b>Architecture de systèmes d'information .....</b>	<b>29</b>
	<b>Urbanisation du Système d'informations .....</b>	<b>29</b>
	Couplage faible .....	29
	Cohérence forte .....	29
	<b>Architectures .....</b>	<b>29</b>
	Architecture logicielle .....	29
	Architecture physique .....	29
	<b>Architecture logicielle .....</b>	<b>29</b>
	Décomposition fonctionnelle .....	29
	Architecture distribuée .....	29
	Architecture en couches (tier) .....	29
	Architecture client/serveur .....	29
	Architecture trois tier(s) .....	29
	Architecture orientée services (SOA) .....	29
	Architecture micro-services .....	29
<b>6.</b>	<b>CONDITIONS DE SUCCÈS .....</b>	<b>30</b>
	Check-list .....	30
	Acteurs à impliquer .....	30
	Anticiper .....	30
	Expression du besoin .....	31
	Minimum maîtrisé .....	31
	Gestion des données .....	31
	Effort de normalisation .....	31
<b>7.</b>	<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>33</b>
<b>8.</b>	<b>SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS .....</b>	<b>37</b>

## 8. SOMMAIRE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1	Parallélisme permanent entre l'infrastructure réelle et son jumeau numériques - Naval Group	6
Figure 2	Les espaces réel et virtuel mis en parallèle par la NASA dans les années 2000.	8
Figure 3	Un jumeau physique au sol d'un satellite dans l'espace piloté par les données transmises depuis le satellite. NASA	9
Figure 4	Le jumeau numérique dans la santé Crédit image © usine nouvelle	11
Figure 5	Le jumeau numérique et sa plateforme de services associés - Egis	14
Figure 6	JN : de la conception à l'exploitation, de la réalité au jumeau et aux applications - Ingérop	15
Figure 7	JN en construction : exploitation et construction, BIM et simulation, SI et applications des parties prenantes	22
Figure 8	Interopérabilité en système ETL	23
Figure 9	Interopérabilité et architecture ESB	24
Figure 10	Vision de l'architecture du jumeau numérique selon la SNCF. Source SNCF.	32