

JUMEAUX NUMÉRIQUES DU TERRITOIRE

Identification des enjeux et défis via une revue de la littérature scientifique.
Rapport résumé en français.

Mars 2023
Version 1.0



FUTURE SUSTAINABLE
TERRITORIES, INFRASTRUCTURES
AND CITIES

SOMMAIRE

CONCEPTS ET DÉFINITIONS	4
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	6
1. UN LANGAGE COMMUN	8
Interopérabilité des données, Sémantique des données.	
2. INFRASTRUCTURE	9
Calcul, Réseau, Stockage.	
3. ACQUISITION DES DONNÉES ET ACTUATION	10
Acquisition des données via capteurs, synchronisation des capteurs, actuation, données non mesurées, manquantes ou inaccessibles.	
4. QUALITÉ DES DONNÉES ET FUSION	11
Harmonisation des données, qualité des données.	
5. MODÉLISATION ET AIDE À LA DÉCISION	12
Modélisation, simulation, aide à la décision.	
6. VISUALISATION	13
Moyens de communication de l'information, visualisation des données.	
7. RESSOURCES	14
Compétences et main-d'œuvre, capital / finance, coûts environnementaux.	
8. GOUVERNANCE ET ASPECTS SOCIAUX	15
Protection des données et souveraineté, inclusion, transparence et préoccupations sociétales, gouvernance et structure organisationnelle.	
POUR ALLER PLUS LOIN	16

CONCEPTS & DÉFINITIONS

JUMEAU NUMÉRIQUE

Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d'un système physique, de son environnement et de ses processus associés. Cette représentation est mise à jour en temps réel grâce à l'échange bidirectionnel d'information.

Modèle digital (Digital Model)

Le mode virtuel reflète le monde physique.



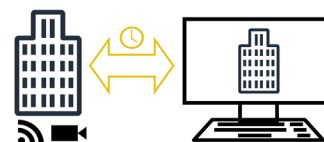
Ombre numérique (Digital Shadow)

Le mode virtuel reflète le monde physique en temps réel.



Jumeau numérique (Digital Twin)

Flux de données bidirectionnels en temps réel.



JUMEAU NUMÉRIQUE DU TERRITOIRE

Une réplique virtuelle du **territoire**, qui collecte les données de l'infrastructure, des processus et des services à l'aide d'appareils et de capteurs connectés.

Ce n'est pas un terme nouveau ! Le terme «Jumeau numérique» est apparu dans les années 90 et ne fait que refaire surface, avec l'explosion du **big data**, des **capteurs** (**INTERNET DES OBJETS** ou **IoT**), de l'**intelligence artificielle** et des **interconnexions technologiques**. Un certain nombre de synonymes existe dans la littérature scientifique (**City Digital Twin**, **Virtual City**, **Urban brain**, ou **Cognitive city**).

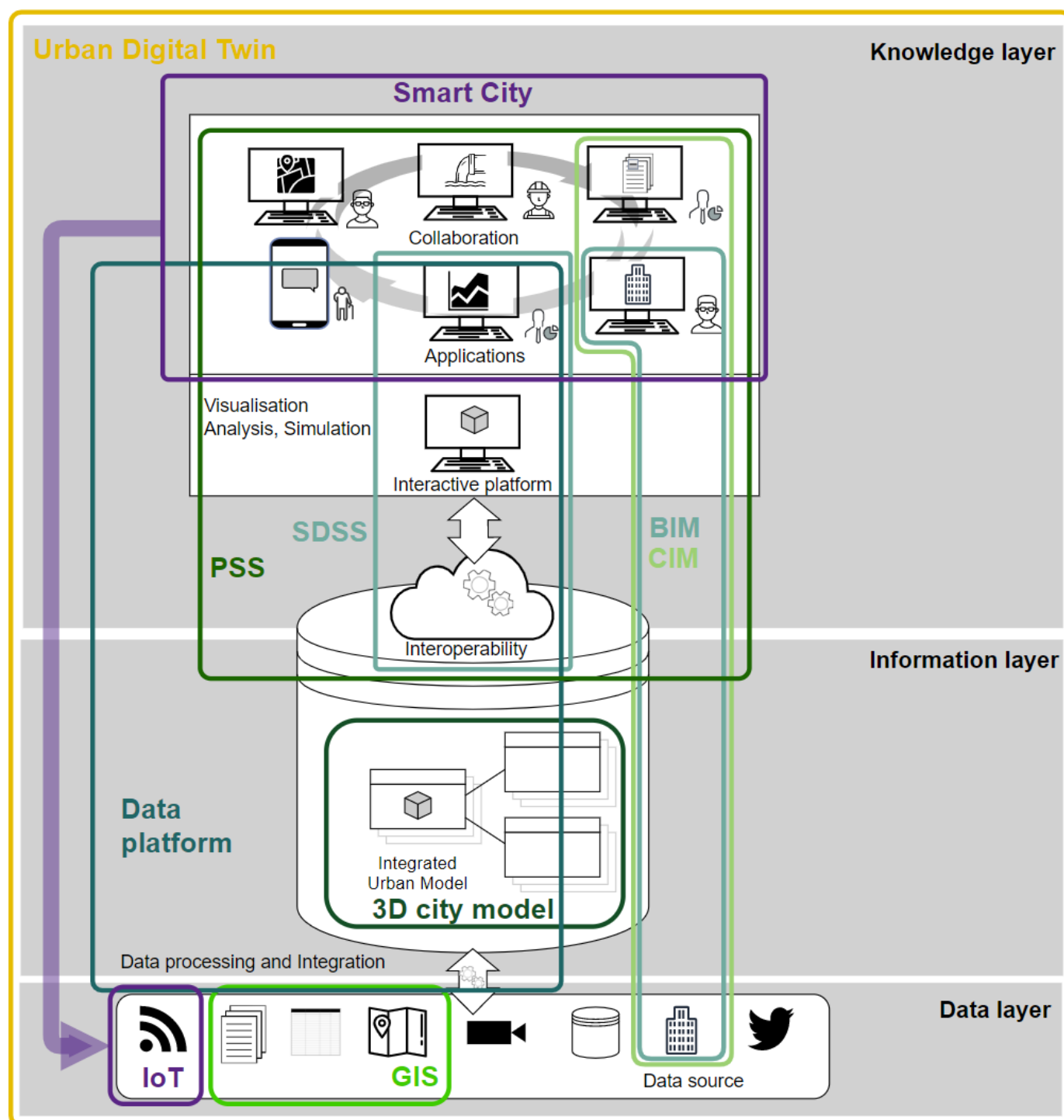
EXEMPLE

Pour illustrer la notion de jumeau numérique du territoire, prenons un exemple concret. **1** En cas d'accident routier, des capteurs (**2** humains ou **3** automatique) détectent l'incident et le signalent au système central, qui **4** alerte automatiquement les secours et organise la déviation du trafic sur d'autres axes afin de faciliter les déplacements des autres usagers. De plus, l'évènement est enregistré pour être pris en compte dans de futures **5** modélisations et prédictions.

Cet exemple illustre le flux d'informations bidirectionnel entre le monde réel et virtuel, à la base d'un jumeau numérique du territoire.



CONCEPTS LIÉS AU JUMEAU NUMÉRIQUE DU TERRITOIRE



Plus d'informations sur les concepts et acronymes utilisés dans le document *Urban Digital Twins & City Data Platforms - A simple glossary of key concepts*.



OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Ce document est une synthèse du rapport *Literature review to identify key challenges of Urban Digital twins* rédigé pour le compte de l'Etat de Genève. Afin de faciliter sa lisibilité, ce document ne contient pas de références aux sources, et présente les informations sous une forme simplifiée, sans compromettre leur exactitude ou leur qualité.

INTRODUCTION

L'objectif de cette étude est de réaliser une **revue de la littérature scientifique** internationale récente sur le thème des jumeaux numériques du territoire. Le but est d'identifier les **challenges** et les **aspects essentiels** à prendre en compte lors de la mise en place d'une telle infrastructure.

MÉTHODOLOGIE

Ce projet se repose sur l'analyse de 200 articles scientifiques sélectionnés sur la plateforme *Web of Science* à l'aide des mots clés «Urban Digital Twin» dans le titre ou le résumé et «Urban Data Platform» dans le titre pour des publications allant de 2021 au 10 octobre 2022. Pour chaque article, les challenges et aspects essentiels ont été répertoriés et classés en huit grandes catégories et diverses sous-catégories.

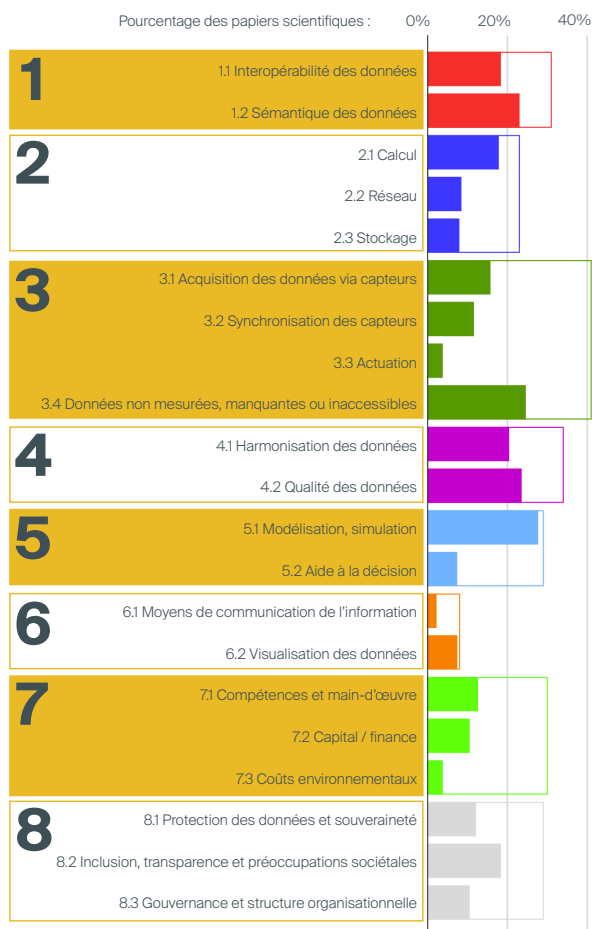
Dans le cas où la littérature scientifique mentionne des solutions potentielles aux challenges répertoriés, celles-ci sont incluses dans le rapport et parfois enrichies de compléments d'informations. Il convient toutefois de souligner que ces solutions ne sont pas exhaustives, mais plutôt un point de départ pour une exploration et une réflexion plus approfondie.

CATÉGORIES DES CHALLENGES

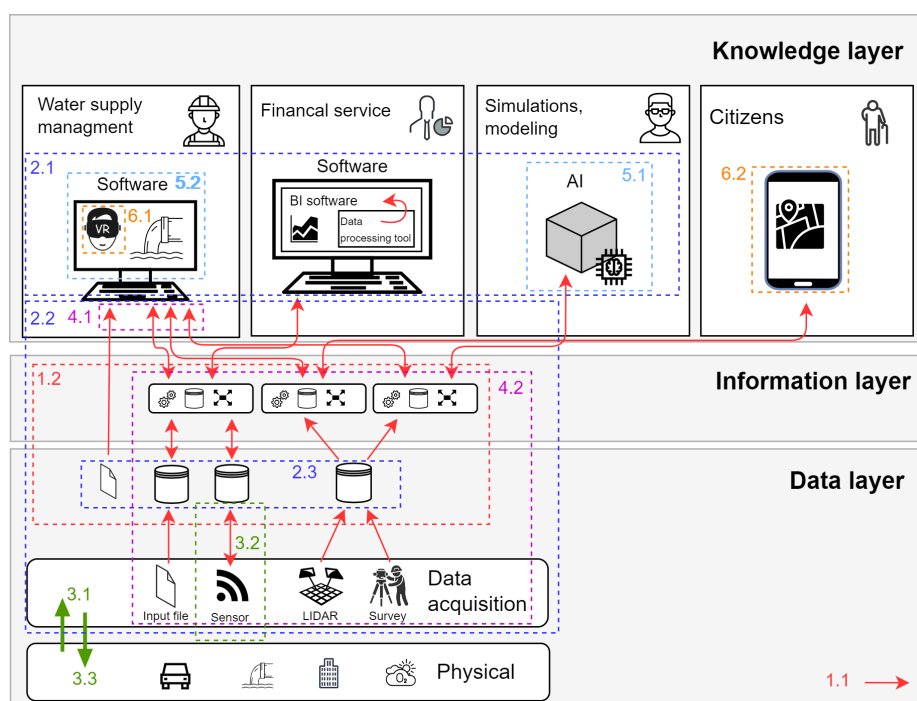
- | | | | |
|---|--------------------------------------|---|---------------------------------------|
| 1 | Un langage commun | 5 | Modélisation et aide à la décision |
| 2 | Infrastructure | 6 | Visualisation et communication |
| 3 | Acquisition des données et actuation | 7 | Ressources |
| 4 | Harmonisation et qualité des données | 8 | Ethique, légal, gouvernance et social |

SOUS-CATÉGORIES

Le graphique ci-contre montre le taux d'occurrence dans la littérature scientifique de chaque catégorie (barres vides) et sous-catégorie (barres pleines).



La figure ci-contre représente les différentes sous-catégories dans le contexte d'un jumeau numérique du territoire.



1. UN LANGAGE COMMUN

Un Jumeau numérique du territoire peut être considéré comme le regroupement de toutes les données pertinentes utilisées dans le contexte de la gestion urbaine. L'un des principaux enjeux mis en évidence lors de cette étude est l'interopérabilité des données, c'est-à-dire la capacité de deux ou plusieurs systèmes, composants ou processus à échanger des informations. L'**interopérabilité** va de pair avec la **sémantique des données** (la manière dont un objet virtuel représente un objet réel) qui jouent un rôle important dans la représentation et la compréhension des informations.

CHALLENGES

Dans le cadre de l'utilisation de données au travers de jumeaux numériques du territoire, l'interopérabilité est limitée par plusieurs facteurs tels que le manque de standards pour les **échanges de données** sous forme de **fichiers**, pour les échanges des données sous forme de diffusion par internet (**streaming**), ainsi que pour la description des **métadonnées**. De plus, certaines données sont très fortement liées à des logiciels métiers (propriétaires ou libres), limitant l'export et l'import. La représentation de données au sein des jumeaux numériques manque aussi de standardisation (de **sémantique**). De plus, lorsque l'échange d'informations est possible, la transformation des données en différents modèles de données s'avère souvent compliquée et non sans perte. Les modèles de données (ontologie) sont eux aussi non standardisés. Enfin, il faut mentionner le mode de **travail en silo** des administrations qui ne favorise pas l'échange d'informations.

31%

DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE MENTIONNE DES CHALLENGES RELATIFS À L'INTEROPÉRABILITÉ ET LA SÉMANTIQUE DES DONNÉES

LINKED DATA

De nombreuses recherches scientifiques font état de l'utilisation de l'**Ontologie Web (OWL)** pour représenter des objets, des groupes d'objets et leurs relations afin de faciliter l'interopérabilité des données. Le **Resource Description Framework (RDF)** est un langage de modélisation de données utilisé pour représenter ces informations sous forme de graphes, les données pouvant être validées à l'aide du langage **SHACL** selon un ensemble de conditions, et les données pouvant être interrogées à l'aide du langage **SPARQL**.

FORMATS VECTORIELS

Plusieurs formats vectoriels standards (CityGML, IFC, InfraGML - LandInfra, LandXML, IndoorGML, Green Building XML, INTERLIS) peuvent être utilisés dans le partage de fichiers dans le contexte de jumeau numérique du territoire.

Les fondements du **Data Mesh** permettent une gestion décentralisée des données, tandis que divers **frameworks** Open Source ou propriétaires permettent de rassembler les données du territoire pour constituer la colonne vertébrale d'un jumeau numérique. En outre, l'utilisation de normes ouvertes est cruciale pour les **transferts de fichiers**, la **diffusion des données**, les **ontologies** et le **matériel**. Au niveau des applications métiers, il est préférable de favoriser les produits proposant des API ouvertes.

2. INFRASTRUCTURE

Le jumeau numérique du territoire repose sur l'utilisation massive de données. Dès lors, les infrastructures de **calcul**, de **stockage** ainsi que le **réseau** doivent être dimensionnés de façon adéquate.

CHALLENGES

Il est essentiel d'avoir une **grande puissance de calcul** pour traiter en temps réel **le flux massif de données** provenant des capteurs IoT. Les data centers centralisés et le réseau en amont peuvent être submergés par l'afflux de données, et il n'existe pas encore de norme pour coordonner le traitement décentralisé des données (par exemple, le **Edge computing**). Le réseau de communication actuel ne peut pas garantir un temps de latence suffisamment faible pour certaines applications, telles que la conduite autonome. La quantité de données créées nécessite la mise en place d'une **infrastructure de stockage importante** et d'une **politique d'archivage**. En outre, il est important de prendre en compte les aspects liés à la **cybersécurité**, notamment lors de l'utilisation de données sensibles.

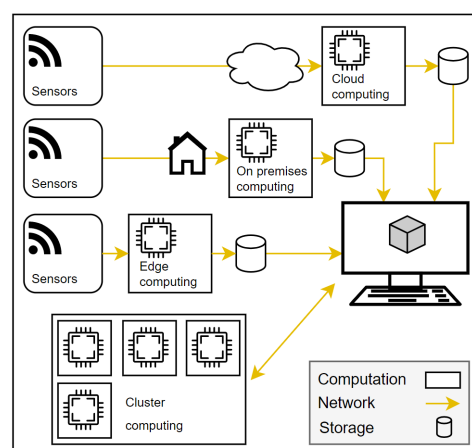
Afin d'optimiser l'utilisation de l'infrastructure, il est nécessaire de gérer l'orchestration des calculs sur des **unités décentralisées** de petite taille (**edge computing**) ainsi que sur des **centres de calcul** (**cloud** ou **on-premise**, c'est-à-dire sur site). Cette approche est complétée par l'utilisation de **frameworks** qui facilitent l'exploitation des données IoT (**Distributed machine learning**, modèle **Sensing-as-a-Service**, **blockchain**). L'amélioration de la diffusion des données peut être obtenue en augmentant la capacité de transfert des données (notamment en déployant la **5G** ou la **6G**) et en optimisant les données transférées (par exemple avec des données **tuilées** ou des **algorithmes de fusion de données**).

23%

DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE
MENTIONNE DES CHALLENGES
RELATIFS AU CALCUL, AU RÉSEAU
ET AU STOCKAGE.

TYPES DE COMPUTING

	Définition	Advantages
On-premise	Software or hardware installed and operated within an organization's physical location.	Full control over the IT infrastructure and data security. Customization of the system to specific needs.
Cloud	The delivery of computing services over the internet, including servers, storage, databases, networking, software, and analytics.	Only pay for what they use. Scalability.
Edge	A decentralized computing infrastructure where data is processed at the edge of the network, closer to the source.	Reduce the amount of data that needs to be transmitted. Improve the responsiveness of applications. Cost-effective.
Cluster	A technique for connecting multiple computers in a network to work together as a single system to perform high-performance computing tasks.	Increased processing power. Improve the scalability and fault-tolerance of the system.



3. ACQUISITION DES DONNÉES ET ACTUATION

41%

DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE MENTIONNE DES CHALLENGES RELATIFS À L'ACQUISITION ET LA SYNCHRONISATION AINSI QU'À L'ACTUATION

L'acquisition et le transfert d'informations revêtent une importance primordiale pour garantir la fiabilité et la précision du jumeau numérique du territoire. Il est crucial de collecter de grandes quantités de données en temps réel, principalement grâce aux **capteurs** (IoT). De plus, le flux d'information doit être **bidirectionnel** pour agir sur le monde physique c'est-à-dire qu'il s'opère aussi, du monde virtuel vers le réel (**actuation**).

CHALLENGES

L'installation des capteurs IoT peut être coûteuse et entraîner des **disparités** par rapport à leur répartition sur le territoire. De plus, les informations collectées peuvent être inexactes et les capteurs doivent être régulièrement **calibrés** et **entretenus**. Les nouveaux types de capteurs, en particulier les capteurs *crowdsourced*, posent des défis supplémentaires en matière d'infrastructure et de traitement des données. De plus, le volume et la qualité de ce type de donnée dépendent de la **volonté du public**.

En outre, la transmission et la synchronisation des données en temps réel peut être limitée par des **connexions intermittentes** ou **lentes**.

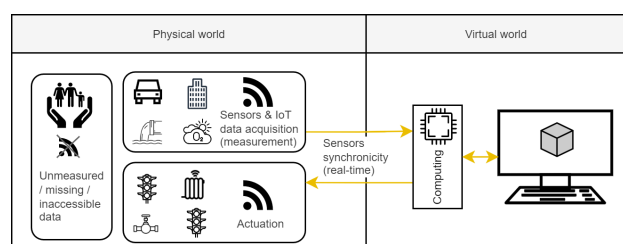
Certaines informations peuvent être inaccessibles en raison de difficultés **techniques**, **financières**, **historiques**, **légales** ou **sociétales**.

Enfin, les actions de contrôle initiées par le virtuel sur le réel (**actuation**) sont encore limitées par un manque de **technologie standardisée**, ainsi que d'outils participatifs ou décentralisés pour agir sur le monde réel.

TYPES DE CAPTEURS

Type de capteur	Fréquence de mise à jour	Echelle	Coût par unité (km, km2, ...)	Précision
Lidar aéroporté	2-3 ans.	ville	par km ²	15 cm
Imagerie par drone	mensuel	local	faible par km ²	15 cm
Monté sur voiture	au besoin	route	par km	5 cm
Intérieur, transportable par l'homme	au besoin	local	par m ²	2 cm
Réseaux de capteurs IoT	temps réel	local	par installation	10 cm

PHYSIQUE ↔ VIRTUEL



Plusieurs études ont souligné que pour alimenter le jumeau numérique, il sera nécessaire d'ajouter de nouveaux capteurs IoT et de les orchestrer au sein de frameworks. Ces capteurs peuvent être complétés par des sources de données alternatives, telles que les données «crowdsourced» provenant, par exemple, de téléphones portables. La **blockchain** peut également ajouter une couche de sécurité à ce réseau de capteurs. En outre, les méthodes de **machine learning** peuvent compenser le manque de données référencées.

4. QUALITÉ ET FUSION DES DONNÉES

Il est essentiel de considérer à la fois la structure des données (comme expliqué dans le chapitre *Un langage commun*) et les informations réelles qu'elles contiennent, c'est-à-dire leur **contenu**. Par conséquent, la **qualité** et l'**harmonisation** des données ont une importance capitale pour garantir l'acceptation et la fiabilité des jumeaux numériques.

CHALLENGES

Les données collectées sont souvent très disparates en termes de répartition géographique et temporelle, ce qui rend leur utilisation combinée difficile, surtout lorsqu'elles proviennent de **sources très diverses** et en **grande quantité**. La **qualité** des données peut affecter les résultats des processus liés aux jumeaux numériques d'un territoire, tels que la planification et la prédiction, en raison de leur origine (capteurs IoT, fournisseurs externes ou *crowdsourced*, *big data* ou collection manuelle) ou de méthodes d'acquisition moins précises utilisées par le passé.

34%

DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE
MENTIONNE DES CHALLENGES
RELATIFS À L'HARMONISATION ET
À LA QUALITÉ DES DONNÉES.

Pour améliorer la qualité des données et faciliter leur utilisation, de nombreuses études suggèrent l'utilisation de formats conformes aux normes ouvertes et internationales ainsi que l'utilisation d'ontologies de données ouvertes pour favoriser la compréhension de la structure des données. L'utilisation de linked data (RDF) et de règles d'intégration (SHACL) permet également de garantir une certaine qualité des données (Voir aussi les solutions proposées au chapitre *Un langage commun*). En outre, des mesures de contrôle de la fiabilité des données peuvent également être mises en place.

5. MODÉLISATION ET AIDE À LA DÉCISION

Les modélisations basées sur les données (*data-driven*), qui utilisent les derniers développements en matière de **ML** (*machine learning*, ou apprentissage automatique) et d'**IA** (intelligence artificielle) pour exploiter de vastes quantités de données, sont très prometteuses dans le cadre des jumeaux numériques du territoire. Combinées à des approches de modélisations plus traditionnelles (*process-based*), de puissants modèles permettent de traiter de sources d'informations massives, d'effectuer des analyses en temps réel, afin d'obtenir des prédictions et prescriptions d'actions.

CHALLENGES

L'un des plus grands défis est de s'assurer que les données utilisées pour développer des modèles sont de **qualité suffisante**. En effet, la qualité des données affecte directement la **qualité des modèles** développés. Les chercheurs de ces domaines notent que la **quantification de l'incertitude**, ainsi que l'**étalonnage** et la **validation** des modèles dans des conditions réelles font souvent défaut, ce qui rend difficile l'évaluation de la **fiabilité des modèles**. De plus, il est parfois nécessaire de **simplifier les modèles** pour réduire la quantité de calculs nécessaires, notamment avec de larges jeux de données à traiter efficacement et rapidement. Évaluer le niveau optimal de simplification des données et des modèles selon les besoins est important, pour trouver un équilibre entre la précision et l'efficacité.

Un autre challenge réside dans la capacité de combiner des résultats provenant de types de modèles différents (par exemple, modèles traditionnels vs. modèles *data driven*) et de résolutions hétérogènes. Plusieurs recherches explorent que les modèles actuels ne parviennent pas à saisir la complexité des systèmes urbains. Enfin, les modélisations impliquent toujours des choix humains qui peuvent introduire des biais, que ce soit dans les approches *data-driven* (par exemple via le choix des données d'entraînement), ou dans les approches traditionnelles, dans la structure même des équations du modèle.

Les capacités prédictives limitées de l'apprentissage automatique dans les **situations futures à long terme** et dans des **conditions extrêmes** posent également problème.

29%

DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE MENTIONNE DES CHALLENGES RELATIFS À LA MODÉLISATION, LA SIMULATION ET L'AIDE À LA DÉCISION

Enfin, les exercices d'optimisation soulèvent toujours la question du choix des objectifs à maximiser, et l'état de l'art met en évidence un manque de preuves quant à l'efficacité de l'utilisation des jumeaux numériques pour soutenir la prise de décision, notamment dans des contextes urbains aux phénomènes interdépendants, sujets à des circonstances inattendues et soumis des cadres législatifs complexes. L'**interprétabilité des modèles** est également faible, en particulier pour les modèles d'intelligence artificielle.

Pour répondre à ces enjeux, de nombreuses méthodes algorithmiques, de **quantification de l'incertitude**, existent ou sont en développement. Par exemple, pour s'adapter à l'infrastructure de calcul et modélisation, l'intégration des données peut être facilitée en divisant les données en partitions et ainsi limiter le volume importé. De manière complémentaire, les modèles eux-mêmes peuvent être fractionnés en sous-modèles liés par des protocoles de communication.

Quant aux jumeaux numériques comme outil d'aide à la décision, le concept de scénarii (*scenario modeling*) est extrêmement prometteur et a prouvé son efficacité dans d'autres contextes de décisions territoriales.

6. VISUALISATION

Transmettre les informations collectées et générées au sein des jumeaux numériques du territoire à leurs différents utilisateurs est essentiel pour atteindre les objectifs visés. Les nouveaux médias - en particulier les technologies immersives - peuvent contribuer à une communication efficace de l'information. En particulier, la *extended reality* (XR, comprenant les technologies de la réalité augmentée AR et la réalité virtuelle VR) offre des opportunités prometteuses.

CHALLENGES

Les technologies de réalité augmentée et virtuelle (AR/VR) manquent encore de **maturité** et ne sont pas spécifiquement conçues pour le **contexte urbain**. Plusieurs chercheurs soulèvent donc la nécessité d'une amélioration des interactions de l'utilisateur avec les objets virtuels.

La visualisation des environnements urbains doit s'adapter aux différents besoins des utilisateurs, le réalisme des représentations peut grandement influencer la perception. Présenter des **scénarios objectifs** à plusieurs types d'utilisateurs est essentiel, mais parfois difficile. La multidimensionnalité des données rend aussi la **visualisation des données dense et complexe**.

Enfin, toutes les données ne peuvent pas être présentées en 3D et des défis de **performance** existent lors de la visualisation de données à grande échelle.

8%

DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE
MENTIONNE DES CHALLENGES
RELATIFS À LA DE COMMUNICA-
TION DE L'INFORMATION ET LA
VISUALIZATION DE LA DONNÉE

FORMATS DE STREAMING

Il est possible de transmettre en streaming des données géo-référencées en utilisant des formats spécifiques tels que OGC 3D Tiles, Indexed 3D Scene Layers (I3S), GeoJSON-LD, CityJSON, KML Network Link, et GL Transmission Format (glTF).

Il est possible d'utiliser des rendus de moteurs de jeux vidéo pour obtenir une immersion plus élaborée.

7. RESSOURCES

La mise en place et l'exploitation de jumeaux numériques du territoire ne sont pas sans impact sur les ressources humaines, financières et environnementales.

CHALLENGES

Deux défis auxquels sont confrontées les ressources humaines dans le cadre des jumeaux numériques sont le besoin de **personnel qualifié et spécialisé**, ainsi que le manque de **communauté professionnelle**. Le premier défi découle de la demande croissante de compétences et de connaissances. Le second défi est lié à l'absence de communauté professionnelle bien établie et de programmes de formation pour attirer et fidéliser les talents, établir des normes et promouvoir les bonnes pratiques dans le domaine.

D'un point de vue financier, la mise en place et l'exploitation d'un jumeau numérique **s'avèrent coûteuses**. En plus du développement de fonctionnalités sur la plateforme, la **collecte de données fiables**, en temps réel, l'acquisition de **ressources matérielles**, le **calcul** et le **stockage** de données induits des charges financières non-négligeables. De plus, les administrations publiques peuvent se rendre dépendantes de **solutions propriétaires**, avec des coûts de licences ou de sortie très élevés.

En ce qui concerne l'impact environnemental, les jumeaux numériques nécessitent des ressources matérielles pour leur fonctionnement, et l'utilisation à grande échelle des données ainsi que la puissance de calcul requise ont un impact considérable sur l'environnement, à savoir les matériaux et ressources en eau et énergie pour la fabrication des dispositifs technologiques et les besoins en énergie pour l'alimentation et la diffusion des informations. Un défi dans le cadre d'une politique de numérique responsable qui prône une utilisation sobre de l'IT pour maîtriser les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES).

30%

DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE
MENTIONNE DES CHALLENGES
RELATIFS AUX COMPÉTENCES ET
LA MAIN-D'ŒUVRE, AU CAPITAL
/ FINANCE ET AUX COÛTS ENVI-
RONNEMENTAUX

Il est envisageable de réduire l'impact sur l'environnement en utilisant des capteurs **sans batterie** ainsi que de **nouveaux modes de transmission d'information** nécessitant moins de consommation d'énergie.

Du point de vue des ressources humaines, des **formations** et **cursus** devraient être mis en place.

8. GOUVERNANCE

ASPECTS SOCIAUX

29%

DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE MENTIONNE DES CHALLENGES RELATIFS A LA PROTECTION DES DONNÉES ET LA SOUVERAINETÉ, L'INCLUSION, TRANSPARENCE ET AUTRES PRÉOCCUPATIONS SOCIÉTALES.

Les jumeaux numériques du territoire peuvent avoir d'importants impacts sur la société. Les aspects éthique, sociaux, légaux, et la structure organisationnelle de gouvernance d'un tel outil sont essentiels à considérer.

CHALLENGES

La confidentialité de certaines données, leur collecte et leur utilisation appropriée posent des défis importants pour lesquels des réglementations existent (GDPR, Loi suisse de protection des données...) mais ne sont pas toujours respectées. En effet, les **exigences légales** sont difficiles à respecter lorsque de nombreuses sources de données sont combinées. Les enjeux de cybersécurité sont d'autant plus essentiels dans ces contextes de données sensibles.

De plus, les collectivités publiques sont souvent affaiblies par la **perte de la souveraineté** sur les données au profit des sociétés privées. Les aspects sociaux, éthiques et politiques sont souvent négligés dans la conception des jumeaux numériques du territoire, les chercheurs déplorent un manque de mécanismes pour la participation citoyenne. Les avantages de tels systèmes pour les citoyens sont souvent peu clairs, et la complexité et la réticence à **partager les données** sont des barrières à la transparence. Par ailleurs, certaines inquiétudes subsistent concernant l'utilisation malveillante des données ouvertes.

En outre, il est important de souligner l'importance de l'inclusivité dans la conception d'un tel outil. Les jumeaux numériques peuvent marginaliser certaines catégories de personnes, en retard sur les **compétences numériques** par exemple, aggravant ainsi les inégalités. Les questions **légales** telles que **responsabilité** en cas de décisions erronées sont également à considérer.

Il existe plusieurs solutions envisageables pour assurer la protection des données face aux défis mentionnés. Parmi celles-ci, on peut citer une **transmission sélective** des données (utilisant des tuiles vectorielles épurées plutôt que la transmission d'un modèle complet) afin de préserver les informations confidentielles en interne. En outre, le **chiffrement** et l'**authentification** des données peuvent garantir leur confidentialité et intégrité. La technologie de la **blockchain** est également mise en œuvre pour assurer la sécurité et la traçabilité des données.

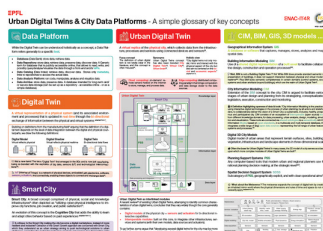
La **gestion dynamique du consentement des citoyens** pourrait apporter une partie de la solution. Ce système relie un flux de données à son propriétaire, afin de permettre aux citoyens de donner et de révoquer leur consentement à tout service utilisant leurs données. Par ailleurs, des outils méthodologiques peuvent être mis en place pour aider à la **promotion sociale du big data**, afin d'encourager les citoyens à mieux comprendre les avantages et les risques associés à ces technologies.

Enfin, il est important d'anticiper la **dépendance aux entreprises privées** en matière de collecte et de traitement de données massives, en encourageant le développement de solutions open source et en favorisant la coopération entre les secteurs public et privé pour garantir la transparence et la responsabilité.

POUR ALLER PLUS LOIN...

Les jumeaux numériques du territoire sont des modèles virtuels qui permettent de reproduire en temps réel et d'agir sur les aspects physiques et fonctionnels d'un territoire. Ces modèles ont des objectifs multiples, telles que la planification urbaine, l'optimisation des ressources, la gestion des risques, et bien plus encore. Cependant, ces objectifs peuvent entrer en conflit, rendant leur mise en œuvre complexe. Par exemple, une planification urbaine efficace peut nécessiter une collecte de données plus poussée, mais cela ouvre également des problématiques autour de la protection des données par exemple. La complexité de la mise en œuvre des jumeaux numériques est également liée à leur dépendance à d'autres technologies tels que l'intelligence artificielle et l'Internet des objets. Par conséquent, il est important de prendre en compte ces multiples objectifs et conflits potentiels afin de développer des jumeaux numériques efficaces et responsables.

RÉFÉRENCES



[Lien de téléchargement](#)

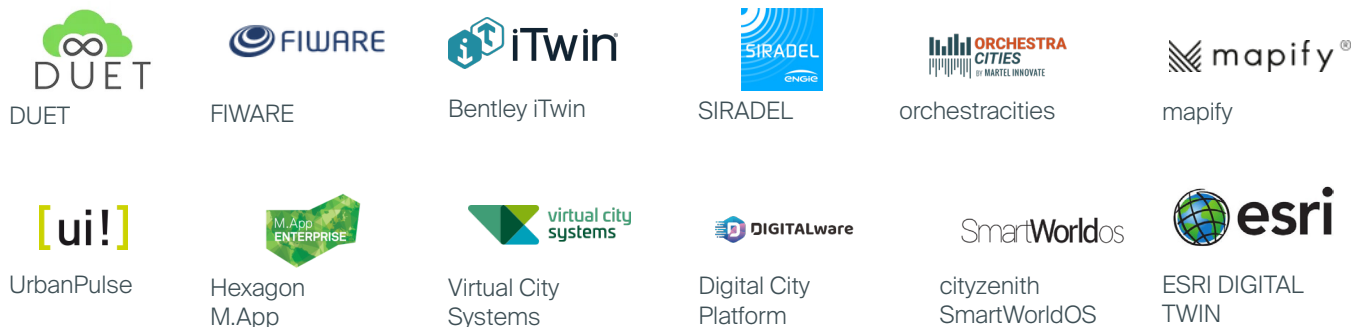


Urban Digital Twins & City Data Platforms - A simple glossary of key concepts, Octobre 2022 (poster, EN).

Literature review to identify key challenges of Urban Digital Twins, Mars 2023, (78 pages, EN).

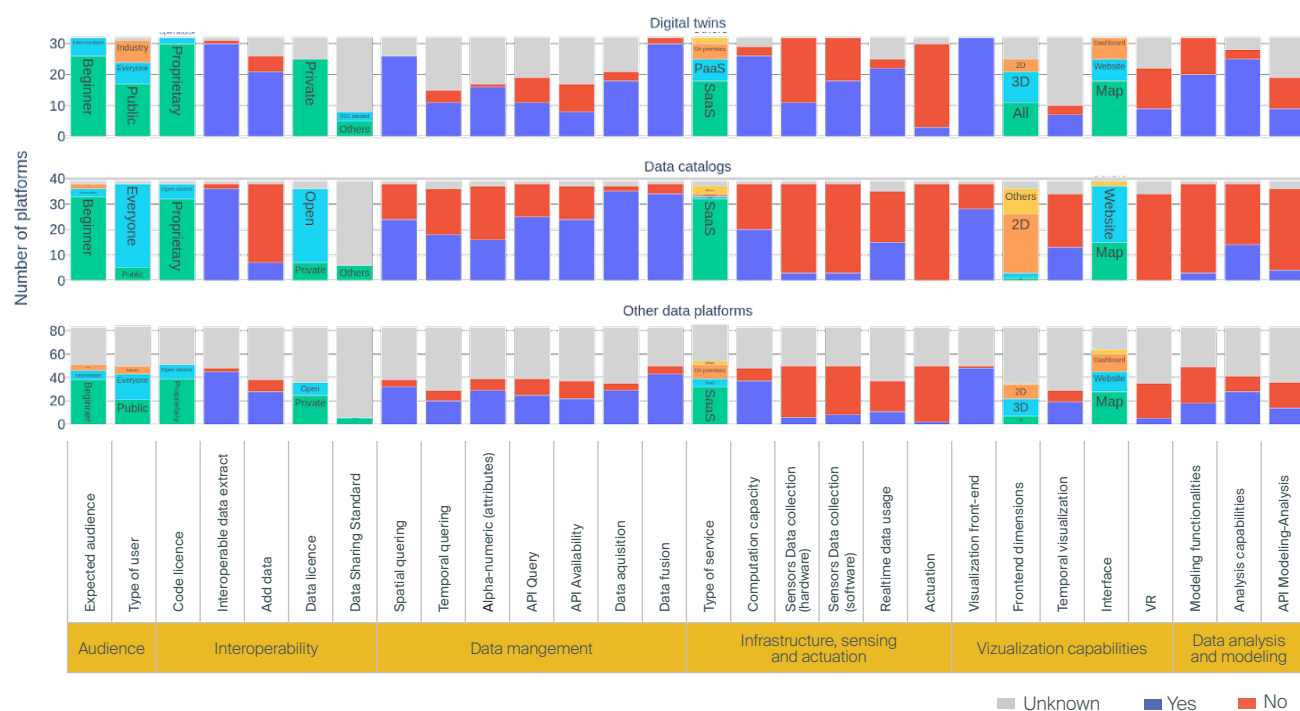
EXEMPLES DE PLATEFORMES

Exemples de frameworks de jumeaux numériques du territoire :



Fonctionnalités

En complément de la revue de littérature, 120 plateformes de données existantes ont été explorées - une trentaine se réclamant être des Urban Digital Twins (première ligne), une quarantaine de catalogue de données utilisées dans des contextes similaires (seconde ligne) et le reste étant un mélange de plateformes d'analyse du territoire plus traditionnelles et d'outils utilisés pour les jumeaux numériques du territoire (troisième ligne). Ces implémentations actuelles permettent d'entrevoir les fonctionnalités clefs de telles plateformes, ainsi que les spécificités des jumeaux numériques (généralement plus de fonctionnalités combinées par outil, accent portés sur les possibilités de captation de données en temps réel, et d'actuation).



NOTES:

NOTES:



**FUTURE SUSTAINABLE
TERRITORIES, INFRASTRUCTURES
AND CITIES**

CONTRIBUTEURS

- Auteurs: Régis Longchamp et Charlotte Weil, ENAC-IT4R, EPFL
- Mandant: Etat de Genève, Département du territoire (DT), Direction de l'information du territoire
- Gestion du mandat : Dr. Frédéric Dreyer
- Encadrement académique : Prof. François Golay

Les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance pour les contributions lors de la revue de la littérature par les étudiants Bruno Rodriguez Carrillo et Nearchos Potamiti et pour le graphisme par Delphine Thongvilay et Armand Goy.