

Le « jumeau numérique environnemental » à l'échelle du territoire, les données au cœur des cas d'usage

Fanny Josse^{1,*}, and Sylvain Riss²

¹LABURBA, ^{1,2}WSP

Résumé. Le jumeau numérique constitue une avancée majeure dans la gestion et la modélisation des territoires. Cet article présente une méthodologie incrémentale et itérative pour la construction d'un jumeau numérique environnemental, en s'appuyant sur l'analyse de cas d'usage. La définition de ces cas d'usage permet d'identifier les données numériques territoriales nécessaires à la création du jumeau numérique. Les résultats de cette étude offrent un éventail d'applications permettant de planifier et de gérer les territoires tout en intégrant les enjeux environnementaux. En se basant sur l'analyse de projets existants de jumeaux numériques à grande échelle et en décomposant leurs différentes applications et compositions, cette approche permet aux décideurs d'anticiper les impacts des changements climatiques, d'optimiser la gestion des ressources et de concevoir des stratégies d'aménagement plus durables et résilientes.

Mots-clés. jumeau numérique environnemental, données environnementales, jumeau numérique territorial, jumeau numérique urbain

Abstract. The digital twin represents a major step forward in land management and modelling. This article presents an incremental and iterative methodology for the construction of an environmental digital twin, based on the analysis of use cases. Defining these use cases enables us to identify the territorial digital data needed to create the digital twin. The results of this of this study offer a range of applications for planning and managing territories while integrating environmental issues. By analysing existing large-scale digital twin projects and breaking down their different applications and compositions, this approach enables decision-makers to anticipate the impact of climate change, optimize resource management and design more sustainable and resilient planning sustainable and resilient development strategies.

* Corresponding author: fanny.normand.josse@gmail.com

Keywords. Environmental digital twin, Environmental data, Territory digital twin, Urban digital twin.

1 Introduction

Les villes et territoires font conjointement face à des transitions numériques et écologiques. En effet, les changements climatiques qui opèrent aujourd'hui nous imposent de repenser de manière profonde nos modes de fonctionnements, notre gestion des ressources et de notre façon d'aménager, tant à l'échelle individuelle que collective.

La conception urbaine s'appuie aujourd'hui principalement sur des technologies digitales en intégrant divers modèles et des processus, tels que le Building Information Modeling (BIM), le City Information Modeling (CIM), les smart cities et les jumeaux numériques. À travers ces outils, les territoires visent à anticiper et à adapter leurs façons de concevoir la ville de demain plus durable, en réponse aux enjeux écologiques actuels.

1.1 Questions et hypothèses

Ce document se consacrera à la technologie émergente du « jumeau numérique » (JN) ou « Digital twin » (DT) à différentes échelles qui connaît une expansion significative ces dix dernières années [1], touchant de nombreux domaines comme l'industrie, la médecine et surtout le secteur de la construction, s'imposant de plus en plus comme un outil pour la conception, la planification et la gestion de nos villes et territoires.

Cet article se questionne sur « Comment élaborer des jumeaux numériques pour modéliser et simuler les enjeux territoriaux permettant ainsi de gérer l'adaptation des villes aux enjeux de transition climatique ».

À travers cette question, nous explorerons la notion de cas d'usage spécifiques, la collecte et l'analyse des données nécessaires et les sources potentielles de ces données. Pour y répondre nous nous demanderons quelle est la méthodologie pouvant être mise en place lors de la création d'un jumeau numérique ? Quelles sont les typologies de données nécessaires pour leur développement et leur implémentation efficaces ? Et est-ce que l'approche par le domaine applicatif est une approche pertinente pour la création d'un jumeau numérique environnemental ?

1.2 Le jumeau numérique à l'échelle du territoire

Un jumeau numérique du territoire est une réplique virtuelle d'un ou de plusieurs territoires [2], intégrant des données statiques et dynamiques « en temps réel » pour simuler, prédire et gérer les territoires.

Possédant actuellement une multitude de définitions, de nombreuses initiatives et projets comme celui lancé en 2024 par le Cerema, l'IGN et l'Inria[†] sont en cours d'expérimentations afin de standardiser, normaliser et harmoniser des jumeaux numériques à différentes échelles [3].

[†] Un appel à communs pour construire, ensemble, le Jumeau numérique de la France et de ses territoires | Cerema

La notion d'échelle du territoire, ainsi que celle du jumeau numérique environnemental, restera, dans ce document, volontairement poreuse car elle se définit lors du déploiement du JN selon les usages et les besoins de chaque projet.

1.3 Le « cas d'usage environnemental »

Dans le cadre de cette recherche, il est primordial de définir en amont la notion de cas d'usage environnemental, axe principal de ce développement. Nous commencerons par définir celle du « cas d'usage » des jumeaux numériques, puis nous préciserons l'intention derrière la notion « environnementale » afin de bien délimiter ce qui est entendu par « cas d'usage environnemental ».

La notion environnementale, plus large et difficile à appréhender, quant à elle concerne les impacts de l'activité humaine sur l'environnement[‡] ainsi que les actions entreprises pour les atténuer. Cela englobe dans le cas présent la gestion durable des ressources, les impacts engendrés par nos activités (construction et exploitation) sur l'environnement direct et la préservation de la biodiversité, enjeux majeurs des villes et territoires.

Dans le contexte des jumeaux numériques, un cas d'usage environnemental se réfère donc à l'utilisation de ce dernier pour gérer, surveiller, analyser et optimiser les performances environnementales d'une ville ou d'un territoire, contribuant ainsi à mettre en place des pratiques numériques, durables et responsables.

En ingénierie des systèmes, le cas d'usage, ou cas d'utilisation, se définit comme l'ensemble des utilisations potentielles décrivant les exigences fonctionnelles d'un système, en adoptant le point de vue et le langage de l'utilisateur final [4], autrement dit, il s'agit de répondre de manière fonctionnelle à un besoin précis.

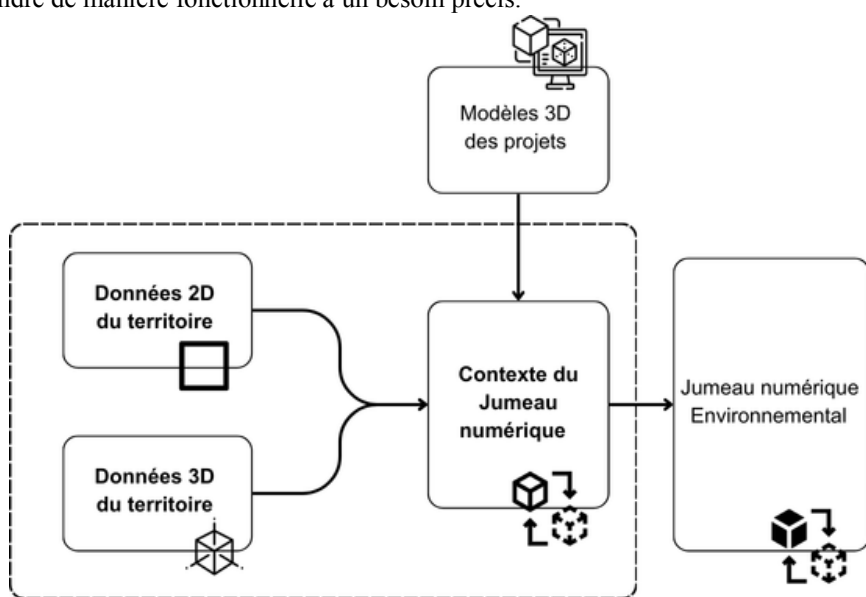


Figure 1. La constitution d'un jumeau numérique « environnemental ». Auteur : F. Josse

[‡] Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (ecologie.gouv.fr)

2 Méthodologie

La première partie de cet article développe une méthode dite « itérative et incrémentale » afin de mettre en place un jumeau numérique « environnemental » dans lequel chaque cas d'usage permettra d'alimenter ce dernier au fil des cas d'usages en s'enrichissant de ses propres expérimentations.

La seconde de cette méthodologie consiste à mener une revue exhaustive de projets présents et analysés dans la littérature scientifique. Cette revue vise à comprendre les différentes utilisations des jumeaux numériques « urbains » ou à grande échelle et à évaluer dans quelle mesure ces applications répondent aux enjeux environnementaux.

Une fois cette analyse effectuée, l'examen des données qui alimentent ces jumeaux numériques permet de comprendre les besoins et éléments nécessaires pour concevoir un jumeau numérique. Cette méthodologie vise à fournir aux acteurs urbains les outils nécessaires pour concevoir, mettre en œuvre et exploiter efficacement des jumeaux numériques « environnementaux ».

Bien que « *La technologie de simulation actuelle ne peut toujours pas saisir les détails complexes des matériaux et des dimensions d'une infrastructure, ni décrire les facteurs environnementaux externes complexes* » [5], La technologie du jumeau numérique environnemental vise toujours à aller plus loin dans la précision de ses simulations permet « *d'esquisser des paysages urbains entièrement nouveaux* » [6].

2.1 Méthode itérative et incrémentale pour la création d'un jumeau numérique

La littérature existante [7],[8] met en valeur la méthodologie itérative et incrémentale pour la conception qui semble être une méthode pertinente pour la création d'un jumeau numérique. En effet basée sur une approche dynamique, modulable et adaptable pour le développement de projets, qui s'adapte en continu aux exigences pouvant ainsi évoluer au cours du projet et des expérimentations.

Elle se décompose en quatre phases : l'analyse, la conception, l'implémentation et le test.

La première phase vise à appréhender les besoins et les exigences des futurs utilisateurs du jumeau numérique ainsi que d'identifier les usages et les priorités initiales du projet. Pour ce faire il est mis en place une collecte d'informations sur les exigences auprès des parties prenantes via des entretiens, des questionnaires, des ateliers donnant lieu à un plan initial permettant de guider la suite de la construction du jumeau numérique.

Dans la seconde phase, il s'agit de détailler la conception de chaque « utilisation » à implémenter. Pour chaque incrément des diagrammes de flux de données et des maquettes d'interface pour les futurs utilisateurs sont développés.

La troisième phase permet d'implémenter les précédentes recherches dans le futur jumeau numérique afin de développer chaque incrément de manière itérative, afin de vérifier que chaque incrément est bien fonctionnel et de s'assurer que les incréments n'introduisent pas d'erreurs dans le jumeau numérique existant.

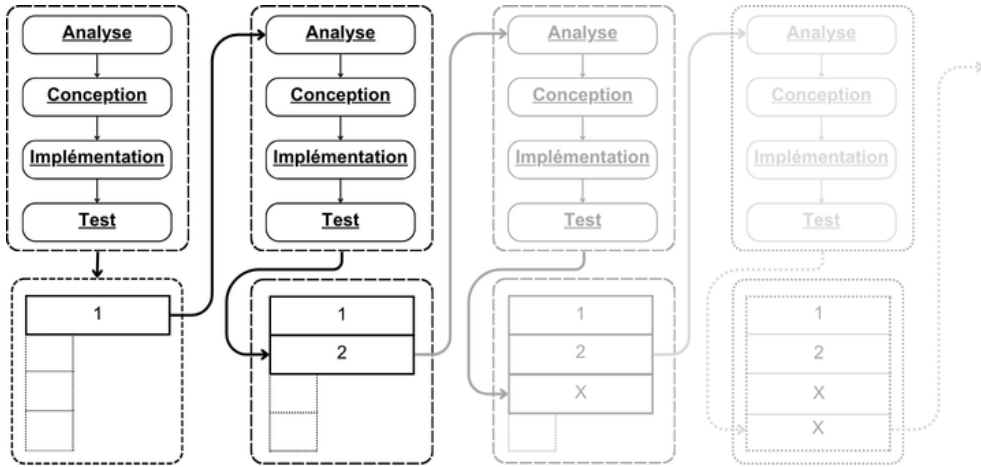


Figure 2. Méthode incrémentale et itérative pour la construction du jumeau numérique.
Auteur : F. Josse

2.2 Méthode pour définition des cas d'usage

2.2.1 Applications des jumeaux numériques à grande échelle

Cette étude, initialement menée en 2023 et mise à jour à la mi-2024, a pour objectif d'explorer les différentes applications des jumeaux numériques du territoire, de dresser un échantillonnage de cas d'usage « environnementaux » et de recenser les initiatives en place. Une recherche a été réalisée à l'aide de plusieurs mots-clés sur la base documentaire internationale Scopus©. Les termes utilisés, en anglais pour maximiser les résultats, étaient « urban digital twin » (jumeau numérique urbain) et « territor* digital twin » (jumeau numérique du territor*). Après une première identification par mots-clés, une deuxième sélection a été effectuée en analysant les titres et les résumés pour déterminer la pertinence des articles dans le cadre défini. Une fois les projets identifiés dans la littérature, ils sont analysés par une grille présentée dans le paragraphe suivant permettant de décomposer les éléments nécessaires et d'appréhender la composition des projets.

2.2.2 Identification des typologies de cas d'usages « environnementaux »

Afin d'identifier et d'analyser les cas d'usages « environnementaux » présents dans la littérature à travers des indicateurs qualitatifs de type morphologique, une grille d'analyse (Table 1.) a été mise en place.

Les dimensions sont les six dimensions déployées dans le concept de smart city [10] l'économie, la gouvernance, les individus, l'environnement, la mobilité et la vie quotidienne. La liste des indicateurs utilisée se repose quant à elle sur le travail de V. Moustaka [11] qui identifie des indicateurs pour les villes issues d'un travail d'analyse des trois normes internationales ISO traitant des « Villes et communautés territoriales durables » : ISO 37120[12], ISO37122[13] et ISO 37123[14].

Les typologies de terrains sont classées conformément aux Plans Locaux d'Urbanisme (PLU), appliqués en France, en quatre zones : urbaine (U), à urbaniser (AU), agricole (A) et naturelle (N).

Choisir une approche multi-échelle permet de couvrir une large gamme de contextes urbains et territoriaux, garantissant ainsi une analyse exhaustive et pertinente des diverses situations rencontrées dans le cadre des différents exemples de cas d’usage. C’est pourquoi l’échelle spatiale s’étend de l’édifice individuel à l’échelle nationale, en passant par les niveaux intermédiaires de l’îlot, du quartier, de la municipalité, de la métropole, du département et de la région. Lorsqu’un projet a été mené sur l’étude d’une ville existante, celle-ci est précisée ainsi que son pays.

Une fois l’utilisation de ces jumeaux numériques mise en avant, un choix a été fait pour les apparenter ou non à des cas d’usages environnementaux. Enfin, une liste non exhaustive issue de la documentation a été établie pour identifier les typologies de données mobilisées. Ces types de données seront ensuite redéveloppés et analysés dans la section suivante.

Tableau 1. Extrait des résultats

Dimensions	Indicateurs	Typologie de Terrain	Échelle	Ville ou Territoire	Cas d’usage	Cas d’usage « envi »	Reference littérature Review
Environnement	-	U	Municipalité	Sofia (BUL)	Modélisation des infrastructures	N	[15]
		U	Municipalité	Columbus (USA)	Exposition îlots de chaleur	O	[16]
		U	Métropole	Milan (IT)	Densité urbaine	N	[17]
		U	Quartier	Imola (IT)	Exposition îlots de chaleur Planification des espaces verts	O	[18]

2.3 Méthode d’analyse des jeux de données

L’observation quantitative permet de réaliser une analyse statistique des données existantes dans les projets de jumeau numérique étudiés. Afin de comprendre les enjeux des données et leur rôle dans la construction d’un jumeau numérique, ce document propose donc trois typologies de données.

Les données « Socles » sont communes à tous les jumeaux numériques dans le secteur de la conception et leur construction. Celles qui apparaissent fréquemment dans de nombreux projets sont catégorisées comme les données « Récurrentes » et celles qui sont « Spécifiques » peuvent être sollicitées en fonction de l’application, du contexte ou de l’environnement du jumeau.

Ici les données sont identifiées par et pour leurs typologies de « représentation », la table 2 présente une méthode qui sera seulement évoquée dans ce document, mais qui dans le contexte général de l’étude dans lequel s’inscrit cet article est menée et fera l’objet d’autres communications. Cette méthodologie soulève de nouveaux questionnements sur l’interopérabilité des bases de données et des logiciels qui les supportent, mettant en lumière l’importance de comprendre les origines, les formats et les traitements des données pour consolider le projet du jumeau numérique.

Tableau 2. Organisation des analyses des données

Données d'entrées				Action sur la donnée	Sortie de la donnée		
Type de donnée	Support de données d'entrée	Bases de données	Origine des données	Traitement de la donnée	Création des indicateurs de sortie	Formule	
						Type de formule	Unités

3 Résultats

3.1 Un jumeau numérique « environnemental » itératif et incrémental pour répondre à chaque cas d'usage

La méthodologie incrémentale a donc été choisie lors de la mise en place du jumeau numérique « environnemental » pour sa capacité à intégrer de manière itérative les nouveaux cas d'usage en incrémentant des données environnementales « récurrentes » et « spécifiques » au jumeau numérique possédant les données « socles » dans sa configuration initiale. Par simplification on l'appellera dans cet article le « jumeau numérique SOCLE » Elle permet un développement incrémental du Jumeau Numérique et une validation progressive des cas d'usages, car certains d'entre eux peuvent être déjà en cours de développement et seront modifiés ou remplacés à chaque étape itérative. Le cycle de vie de ce processus est répété continuellement à chaque itération et étape incrémentale afin que tous les cas d'usage soient traités. Chaque itération devenant un cas d'usage permet d'ajuster et d'améliorer les modèles existants, assurant ainsi une évolution constante et adaptable du jumeau numérique.

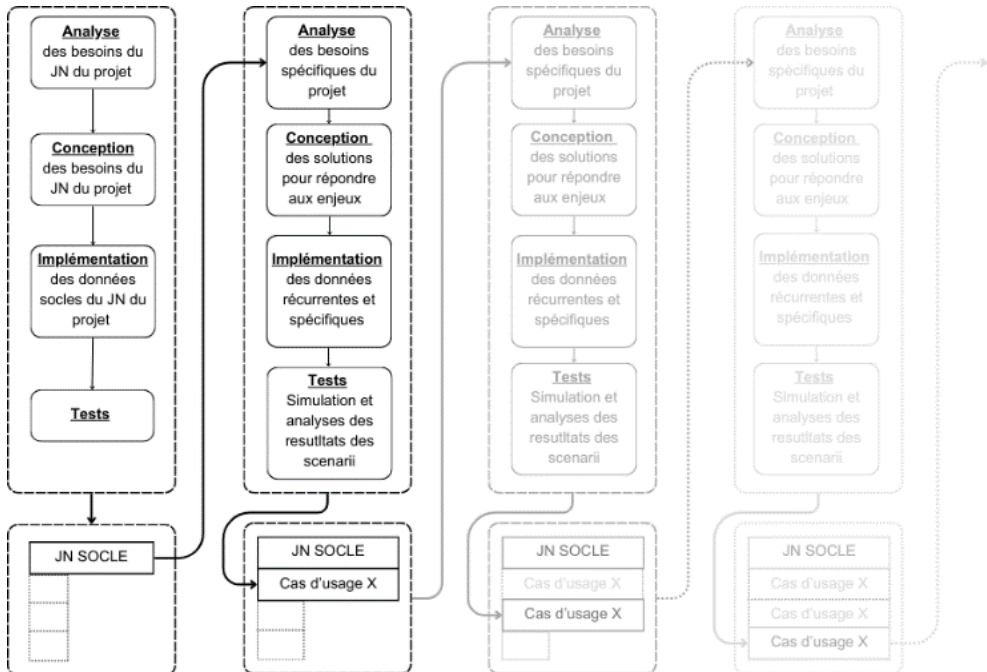


Figure 3. Méthode incrémentale et itérative pour la construction du jumeau numérique « environnemental ». Auteur : F. Josse

3.2 Les cas d'usage présents dans la littérature étudiée

3.2.1 Revue de littérature pour identifier les cas d'usages

La recherche du mot-clé « urban digital twin » a fait apparaître cent seize documents, celle de « city digital twin » révèle quatre-vingt-treize articles et trois pour celle du « territor* digital twin », soit un total de deux cent douze papiers. Après élimination des occurrences redondantes et une analyse par titre et résumé à la recherche de cas d'usage potentiellement « environnementaux », quarante-quatre documents ont été sélectionnés, dont treize qui possèdent l'analyse d'une ville concrète comme étude de cas.

Le tableau 1 de la section 2.2.2 présente un extrait des résultats de cette revue de littérature sur les documents traitant de projets sur des villes existantes. La méthode a été aussi utilisée pour la partie cas d'usage sans « terrain » ou exemples s'appuyant sur des territoires existants et sera développée dans le paragraphe suivant.

3.2.2 Les cas d'usage présents dans la littérature étudiée

Dans un premier temps, une analyse sur l'inscription de cette littérature dans les dimensions a été effectuée. Les premiers résultats révèlent un fort intérêt pour la dimension de l'environnement [16, 18–39]. Un focus a été donc fait sur ces documents afin d'en extraire les typologies de cas d'usages.

De nombreux documents [18, 19, 21–23, 28, 30, 39–44] axent leurs utilisations des jumeaux numériques sur l'énergie. La notion de résilience ainsi que celle des risques naturels y sont également représentées de façons conséquentes [19, 24, 34, 37–42, 43].

En ce qui concerne l'énergie, les jumeaux numériques sont principalement utilisés pour la gestion de la production à travers par exemple la simulation du potentiel solaire [21, 51] les capacités de stockages l'énergie et la gestion des consommations des ressources énergétiques.

Les jumeaux numériques traitant des enjeux climatiques sont utilisés pour analyser et atténuer divers usages tels que les îlots de chaleur urbains [16, 28, 52], ainsi qu'amélioration du confort thermique en ville se reposant sur la gestion des espaces verts [18]. De plus, les cas d'usage de surveillance et la prédiction des inondations [48, 50, 53] et des tremblements de terre [54], permettent de proposer aux autorités locales des scénarii adaptés afin de prendre des mesures préventives et d'élaborer des plans d'intervention en cas de catastrophes naturelles, contribuant ainsi à renforcer la résilience des territoires face aux aléas climatiques et géologiques.

3.2.3 Identification de potentiels cas d'usage non répertoriés

Afin d'identifier les éventuels cas d'usages non présents dans la liste déjà étudiés, une analyse non-exhaustive de la littérature grise française a été effectuée. Ce qui a pu mettre en évidence de nouveaux cas d'usage tels que la gestion de l'artificialisation des sols dans les projets qui s'inscrit dans un objectif « zéro artificialisation nette à objectif 2050 » [55]. La

gestion et la surveillance de la préservation de la biodiversité impactée par les projets, en prenant notamment en compte les déplacements d'espèces[§]. La gestion des ressources de l'eau en suivant les consommations et les réserves aquifères, tout en anticipant les restrictions futures.

3.3 Les données du jumeau numérique

3.3.1 Les données « socles »

L'analyse de typologie de données réalisée à partir de ces documents met en avant, en premier lieu, celles issues des systèmes d'informations géographiques (SIG). Ces systèmes regroupent des données ortho-photographiques, ainsi que des données issues de la cartographie géologique, cadastrale, des bâtiments et des réseaux de transport, facilitant ainsi l'identification des infrastructures existantes. Ces données, principalement représentées en deux dimensions, sont enrichies par des couches de modèles tridimensionnels, provenant souvent de projets de bâtiments, d'infrastructures ou de développement urbain.

La seconde catégorie de données, intégrée dans le socle du jumeau numérique, provient des projets conçus selon les processus du Building Information Modeling (BIM) et de son équivalent urbain, le City Information Modeling (CIM). Ces données peuvent également émaner de projets de « smart cities », notamment dans les villes et territoires qui ont déjà structuré leurs données ou développé des initiatives de « villes intelligentes » comme Angers ou Dijon en France qui ont déjà mis en place des stratégies de numérisations de leurs services municipaux et ont déjà entamé un processus de structuration de leurs données.

3.3.2 Les données « récurrentes » et les données « spécifiques »

Lors de l'identification des cas d'usage et des données nécessaires pour développer un jumeau numérique efficace, de nombreuses données ont été mises en avant. Celles-ci ne pouvant pas être classées parmi les données de base du jumeau numérique, car leurs utilisations varient selon la réponse envisagée pour répondre au cas d'usage. Par exemple, les données de circulations comme le trafic routier peuvent servir à gérer le passage des secours en cas de catastrophe naturelle ou à simuler l'impact sur la pollution de l'air.

Parmi ces données, se trouvent les informations climatiques telles que la température, l'humidité et l'hydrométrie. Des données qualitatives concernant l'air et l'eau sont également régulièrement mobilisées, tout comme les données démographiques. Ces informations peuvent provenir de sources statiques, historiques et statistiques ou de capteurs, et sont donc dynamiques, en effet elles sont mises à jour de façon régulière et en « temps réel » selon leur origine.

Les données « spécifiques » ne sont incluses ni dans les données « socles », ni dans les données « récurrentes », car elles varient en fonction des cas d'usage. Issues principalement des données du projet et appartiennent généralement aux parties prenantes et nécessitent une protection particulière. Elles sont identifiées et définies dès la phase initiale de détermination du cas d'usage. La première partie de ce document fournit une méthodologie pour leur intégration efficace dans les jumeaux numériques, garantissant que les données nécessaires

[§] Bientôt, des jumeaux numériques pour la biodiversité | TerrOiko (terroiko.fr)

pour les calculs, la modélisation ou la maintenance répondent précisément aux besoins et aux enjeux du cas d'usage.

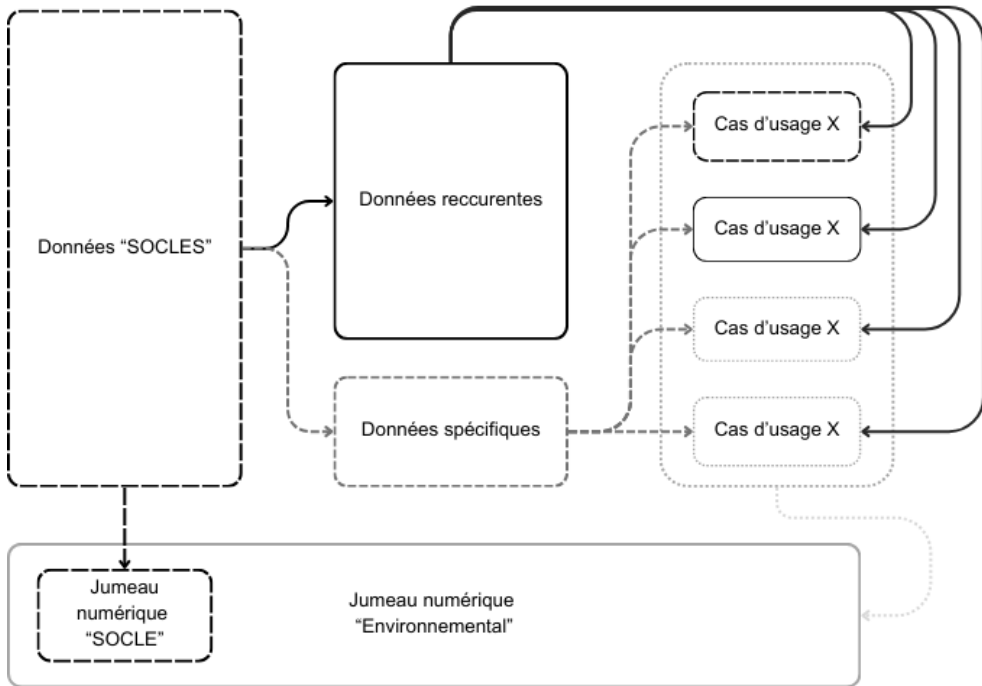


Figure 4. Flux de données lors de la mise en place du jumeau numérique. Auteur : F. Josse

4 L'application pour cas d'usage d'exposition aux îlots de chaleurs

Afin d'illustrer les propos de cet article, le cas d'usage des îlots de chaleur est détaillé. L'analyse des documents traitant du sujet [16, 28, 52] a permis de définir les données indispensables à la création d'un jumeau numérique dédié à ce sujet.

Les données « socles » comprennent des éléments géographiques tels que le relief, l'orientation et la géologie du site, enrichies par une couche de données tridimensionnelles qui détaillent la morphologie urbaine.

Les données « récurrentes » incluent des informations sur les bâtiments, telles que la densité de construction, la typologie d'utilisation et les consommations énergétiques. Les données climatiques, comme la température de l'air, l'humidité, le rayonnement solaire, les précipitations et l'exposition aux vents, sont également nécessaires. Les données de végétation jouent un rôle important dans ce contexte, car elles permettent de simuler ou d'identifier les îlots de fraîcheur grâce à des détails sur la hauteur, la localisation et les espèces des plantes. Les données démographiques, la densité de population et la vulnérabilité des habitants y sont également mentionnées.

Pour ce cas d'usage, les données spécifiques se basent sur les informations complémentaires des matériaux et revêtements existants et/ou futurs offrant la possibilité d'évaluer la réflectivité, la capacité thermique et la conductivité thermique.

La superposition de ces données permet donc de modéliser avec précision les impacts des îlots de chaleur et proposer des scénarii efficaces grâce à l'utilisation du jumeau numérique.

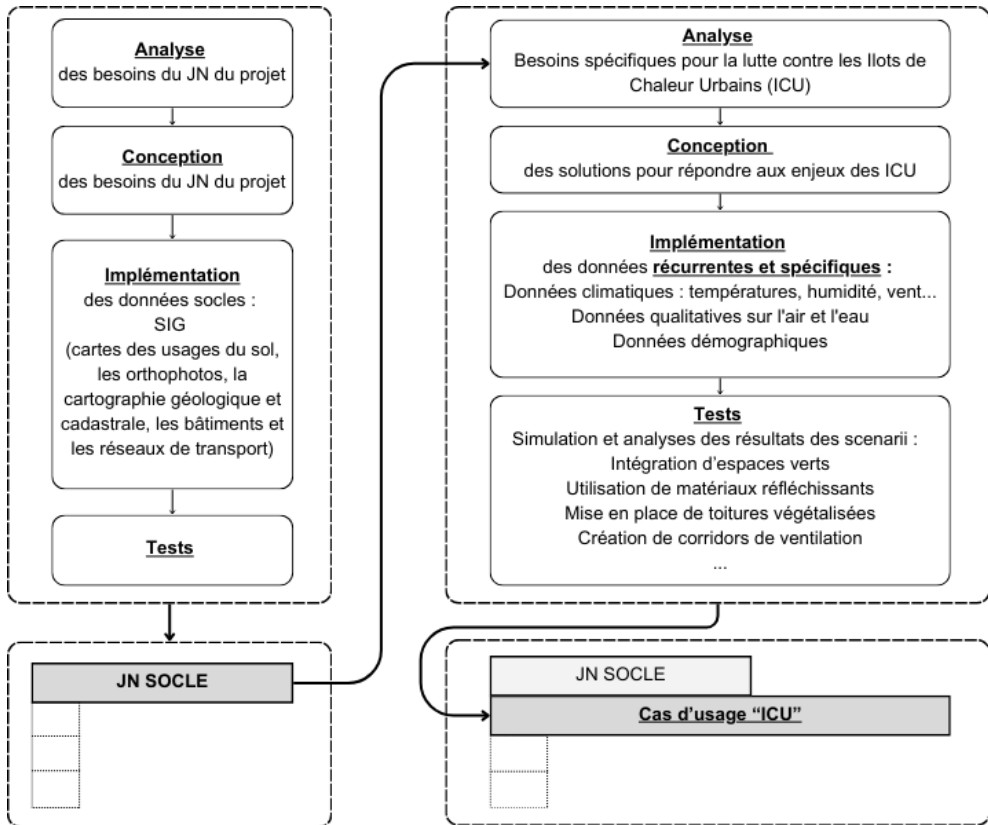


Figure 5. Création du cas d'usage « Îlot de Chaleur Urbain » (ICU). Auteur : F. Josse

5 Discussions

5.1 Bilan et Interprétation des Résultats

La méthodologie itérative et incrémentale adoptée dans cette étude permet de répondre de manière progressive et adaptative à la création d'un jumeau numérique. En décomposant les projets de ces derniers par cas d'usage spécifiques. Chaque itération ou domaine applicatif permet d'incorporer de nouvelles données et simulations nécessaires au cas d'usage, permettant au JN s'adapter aux différents besoins et futurs enjeux numériques. Avec cette approche, chaque incrément ou données est testé et validé permettant une nouvelle application à un nouveau cas d'usage. Cela réduit les risques d'erreur de calcul et assure que chaque itération apporte une valeur ajoutée tangible au jumeau numérique « environnemental ».

5.2 Critiques et Difficultés

L'un des principaux défis dans la création d'un jumeau numérique réside dans la collecte et la gestion des données nécessaires. Ces données doivent être précises, actualisées et complètes. La diversité et la multitude des sources de données, ainsi que les différents standards de création, rendent leur intégration complexe dans un jumeau numérique. L'interopérabilité entre les différents systèmes et bases de données est essentielle, mais pas toujours fonctionnelle. En effet, les jumeaux numériques doivent pouvoir interagir avec de nombreux systèmes numériques, tels que les systèmes d'information géographique (SIG), les modèles BIM/CIM et les capteurs d'informations en temps réel. Cette interopérabilité nécessite des standards ouverts et des protocoles de communication robustes qui sont en cours de développement.

La méthode basée sur les cas d'usage requiert un développement et une maintenance continue des jumeaux numériques sur le long terme. Chaque nouveau besoin ou cas d'usage implique une mise à jour régulière. Cela nécessite non seulement une maîtrise des méthodologies de mise en place, mais aussi des compétences techniques spécifiques aux différents cas d'usage. Ainsi, le jumeau numérique doit être conçu de manière collaborative et rester accessible en fonction des diverses compétences techniques des utilisateurs.

6 Conclusion

Dans le contexte actuel où les transitions numériques et écologiques sont devenues impératives pour nos villes et territoires, l'émergence des jumeaux numériques représente une solution numérique pour répondre à ces enjeux.

À travers une méthodologie rigoureuse, nous avons détaillé la méthode itérative et incrémentale employée pour créer et affiner les jumeaux numériques environnementaux, permettant ainsi une intégration progressive des nouveaux cas d'usage et une adaptation continue aux évolutions des besoins. Cette approche favorise une gestion précise et adaptable des données, rendant les jumeaux numériques au plus juste lors des simulations environnementales.

Cet article a examiné les cas d'usage environnementaux existants des jumeaux numériques, offrant la possibilité de gérer, surveiller, analyser et optimiser les performances environnementales des villes et territoires. Une revue des projets dans la littérature existante a permis d'identifier diverses applications, allant de la gestion de l'énergie à la surveillance des risques naturels.

L'analyse des données nécessaires à la création de ces jumeaux numériques a souligné l'importance des données socles, récurrentes et spécifiques à chaque cas d'usage permettant de modéliser les impacts environnementaux et de proposer de nouvelles solutions à travers des prédictions et des scénarii.

Afin d'envisager la poursuite de ce travail, nous envisageons de continuer à développer et à affiner les cas d'usages et leurs implémentations en adoptant des méthodologies flexibles et évolutives afin de les intégrer de manière collaborative et s'adaptant aux compétences techniques diversifiées des utilisateurs. En conjuguant une solution digitale de conception par le prisme d'une approche environnementale, les jumeaux numériques se positionnent ainsi comme des outils d'aide à la décision pour proposer aux villes et aux territoires des solutions durables et résilientes face aux défis écologiques auxquels nous sommes tous confrontés aujourd'hui.

Références

- [1] 5 Emerging Technology Trends and 2018 Hype Cycle. In: Gartner. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-08-20-gartner-identifies-five-emerging-technology-trends-that-will-blur-the-lines-between-human-and-machine>. Accessed 29 May 2024
- [2] B. Ketzler, V. Naserentin, F. Latino, *et al* (2020) Digital Twins for Cities: A State of the Art Review. *Built Environment* 46:547–573. <https://doi.org/10.2148/BENV.46.4.547>
- [3] A digital twin of Earth for the green transition | Nature Climate Change. <https://www.nature.com/articles/s41558-021-00986-y>. Accessed 30 May 2024
- [4] I. Jacobson (1987) Object-oriented development in an industrial environment. In: Conference proceedings on Object-oriented programming systems, languages and applications. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 183–191
- [5] M. Shahzad, M. Shafiq, D. Douglas, M. Kassem (2022), Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. *Buildings* **12** (2):120. <https://doi.org/10.3390/buildings12020120>
- [6] P. Geoffron (2017) Comment transition numérique et transition écologique s’interconnectent-elles ? *Annales des Mines - Responsabilité & environnement* **87**, pp. 17–19. <https://doi.org/10.3917/re1.087.0017>
- [7] T. Tan, Q. Li, B. Boehm, *et al.* (2009) Productivity trends in incremental and iterative software development. pp. 1–10
- [8] X.Y. Ma, H. Hafit (2022) Emergency Notification And Healthcare Mobile Application For Elderly. *Applied Information Technology And Computer Science*, **3** (1), pp. 264–278
- [9] B. García-Mendoza, C. Jaimez-González (2017) A Customisable and Responsive Design Online Booking System. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, **9** (5), pp. 67–86. <https://doi.org/10.5121/ijcsit.2017.9506>
- [10] V. Albino, U. Berardi, R.M. Dangelico (2015) Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of Urban Technology*, **22** (1), pp. 3–21. <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092>
- [11] V. Moustaka, A. Maitis, A. Vakali, L.G. Anthopoulos (2021) Urban Data Dynamics: A Systematic Benchmarking Framework to Integrate Crowdsourcing and Smart Cities’ Standardization. *Sustainability*, **13** (15): 8553. <https://doi.org/10.3390/su13158553>
- [12] 14:00-17:00 ISO 37120:2018. In: ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/68498.html>. Accessed 21 May 2024
- [13] 14:00-17:00 ISO 37122:2019. In: ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/69050.html>. Accessed 17 Jul 2024
- [14] 14:00-17:00 ISO 37123:2019. In: ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/70428.html>. Accessed 21 May 2024
- [15] H. Dimitrov, D. Petrova-Antonova (2021) *3D city model as a first step towards digital twin of Sofia City*. pp. 23–30
- [16] X. Pan, D. Mavrokapnidis, H.T. Ly, *et al.* (2024) Assessing and forecasting collective urban heat exposure with smart city digital twins. *Scientific Reports*, **14** (9653). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59228-8>
- [17] M. Franzini, V.M. Casella, B. Monti (2023) Assessment of Leica CityMapper-2 LiDAR Data within Milan’s Digital Twin Project. *Remote Sensing*, **15** (21). <https://doi.org/10.3390/rs15215263>

- [18] M. Gholami, D. Torreggiani, P. Tassinari, A. Barbaresi (2022) Developing a 3D City Digital Twin: Enhancing Walkability through a Green Pedestrian Network (GPN) in the City of Imola, Italy. *Land* **11** (11). <https://doi.org/10.3390/land11111917>
- [19] V. Ramani, M. Ignatius, J. Lim *et al.* (2023) A Dynamic Urban Digital Twin Integrating Longitudinal Thermal Imagery for Microclimate Studies. pp. 421–428
- [20] S. Agostinelli (2021) Actionable Framework For City Digital Twin-Enabled Predictive Maintenance and Security Management Systems. pp. 223–233
- [21] U. Leopold, C. Braun, P. Pinheiro (2023) An Interoperable Digital Twin to Simulate Spatio-Temporal Photovoltaic Power Output and Grid Congestion at Neighbourhood and City Levels in Luxembourg. pp. 95–100
- [22] L. Chen, X. Li, J. Zhu (2024) Carbon peak control for achieving net-zero renewable-based smart cities: Digital twin modeling and simulation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **65**. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103792>
- [23] S. HosseiniHaghighi, P.M.Á. de Urbarri, R. Padsala, U. Eicker (2022) Characterizing and structuring urban GIS data for housing stock energy modelling and retrofitting. *Energy and Buildings*, **256**. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111706>
24. J. Luo, P. Liu, L. Cao (2022) Coupling a Physical Replica with a Digital Twin: A Comparison of Participatory Decision-Making Methods in an Urban Park Environment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **11**. <https://doi.org/10.3390/ijgi11080452>
- [25] B. Turilazzi, G. Leoni, J. Gaspari, *et al.* (2021) Cultural Heritage and Digital Tools: The Rock Interoperable Platform. *International Journal of Environmental Impacts*, **4**, pp. 276–288. <https://doi.org/10.2495/EI-V4-N3-276-288>
- [26] B. Royo, D. Politaki, J.N. Gonzalez, A. Batalla (2023) Digital Twin opportunities and benefits in last-mile logistics for Madrid value case. pp 1693–1699
- [27] F. Cinquepalmi, G. Piras (2023) Earth Observation Technologies for Mitigating Urban Climate Changes. *Urban Book Series Part F813:589–600*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29515-7_53
- [28] C. Miller, M. Quintana, M. Frei, *et al.* (2023) Introducing the Cool, Quiet City Competition: Predicting Smartwatch-Reported Heat and Noise with Digital Twin Metrics. pp. 298–299
- [29] A.A. Diakite, L. Ng, J. Barton, *et al.* (2022) Liveable City Digital Twin: A Pilot Project for the City of Liverpool (NSW, Australia). pp. 45–52
- [30] B. Lei, P. Liu, N. Milojevic-Dupont, F. Biljecki (2024) Predicting building characteristics at urban scale using graph neural networks and street-level context. *Computers, Environment and Urban Systems* **111**. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2024.102129>
- [31] K. Karamitov, D. Petrova-Antonova, E. Hristov, M. Borukova (2023) Supply-Demand Analysis of Urban Amenities Based on Walking Accessibility. pp. 3973–3979
- [32] C. Chioni, C. Pezzica, S. Favargiotti (2024) Territorial Digital Twins: A key for increasing the community resilience of fragile mountain inner territories? *Sustainable Development* **32** pp. 1548–1563. <https://doi.org/10.1002/sd.2688>
- [33] J.L. Bermúdez González, Castaño Perea E, Fernández Tapia EJ (2023) The time variable in the Territorial Digital Twin: The case of Guadalajara (Spain). *Vitruvio* **8**:38–51. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20828>

- [34] P. Liu, T. Zhao, J. Luo, *et al.* (2023) Towards Human-centric Digital Twins: Leveraging Computer Vision and Graph Models to Predict Outdoor Comfort. *Sustainable Cities and Society* **93**:. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104480>
- [35] S. Corrado, F. Scorza (2024) Towards Sustainable Urban Development: Matera's Urban Digital Twin and Challenges in Data Integration. *Lecture Notes in Civil Engineering* **467** LNCE:230–236. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54118-6_22
- [36] M. Hämäläinen (2021) Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city. *IET Smart Cities* **3**:201–210. <https://doi.org/10.1049/smc2.12015>
- [37] F. Dembski, U. Wössner, M. Letzgus, *et al.* (2020) Urban digital twins for smart cities and citizens: The case study of herrenberg, germany. *Sustainability (Switzerland)* **12**:. <https://doi.org/10.3390/su12062307>
- [38] S.F. Luna-Romero, C.R. Stempniak, M.A. de Souza, G. Reynoso-Meza (2024) Urban Digital Twins for Synthetic Data of Individuals with Mobility Aids in Curitiba, Brazil, to Drive Highly Accurate AI Models for Inclusivity. *Lecture Notes in Networks and Systems* **871** LNNS:116–125. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52090-7_12
- [39] S. Dey, E. Mallen, B. Jr Stone, Y. Joshi (2024) Using Multiscale Atmospheric Modeling to Explore the Impact of Surface Albedo on Anthropogenic Heat Release. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer* **146**:. <https://doi.org/10.1115/1.4065088>
- [40] S. Anselmo, M. Ferrara, S.P. Corgnati, P. Boccardo (2023) Aerial urban observation to enhance energy assessment and planning towards climate-neutrality: A pilot application to the city of Turin. *Sustainable Cities and Society* **99** (2). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104938>
- [41] X. Li, J. Luo, Y. Li, *et al.* (2022) Application of effective water-energy management based on digital twins technology in sustainable cities construction. *Sustainable Cities and Society* **87** (3) . <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104241>
- [42] Huang J, Zonghui W, Koroteev DD, Rynkovskaya M (2024) Energy efficiency security in urban areas: Challenges and implementation. *Sustainable Cities and Society* **107**:. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105380>
- [43] D. Maiullari, C. Nageli, A. Rudena, L. Thuvander (2023) Gothenburg Digital Twin. *Modelling and communicating the effect of temperature change scenarios on building demand*
- [44] A. Francisco, N. Mohammadi, J.E. Taylor (2020) Smart City Digital Twin-Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking. *Journal of Management in Engineering* **36**:. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000741](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000741)
- [45] C. Johannsen, J. Salten, W. Franke (2023) A Whole-of-Government Approach to Climate change and the Process of Making Cities Resilient: Constructing a Digital Twin Network for Urban Adaptation. *Progress in IS Part F2546*:165–181. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18311-9_10
- [46] C. Fan, H. Farahmend, A. Mostafavi (2020) Rethinking infrastructure resilience assessment with human sentiment reactions on social media in disasters. pp 1665–1674
- [47] Scopus - Document details - Digital Twins for Climate-Neutral and Resilient Cities. State of the Art and Future Development as Tools to Support Urban Decision-Making. <https://www-scopus-com.univ-eiffel.idm.oclc.org/record/display.uri?eid=2-s2.0-85163940874&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=2011a3b7f30e890cf5b149e29e3de2c3&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28%22urban+digital+twin%22%29&sl=35&sessionSearchId=2011a3b7f30e890cf5b149e29e3de2c3&relpos=66>. Accessed 29 May 2024

- [48] M. Ghaith, A. Yosri, W. El-Dakhkhni (2022) Synchronization-Enhanced Deep Learning Early Flood Risk Predictions: The Core of Data-Driven City Digital Twins for Climate Resilience Planning. *Water (Switzerland)* **14**:. <https://doi.org/10.3390/w14223619>
- [49] M. Ziehl, R. Herzog, T. Degkwitz, *et al.* (2023) Transformative Research in Digital Twins for Integrated Urban Development: Two Real-World Experiments on Unpaid Care Workers Mobility. *International Journal of E-Planning Research* **12**:. <https://doi.org/10.4018/IJEPR.333851>
- [50] H. Josephs, J. Gong, Y. Wang, J. Xia (2024) Urban Digital Twin-Based Decision Support for Housing Rebuilding Choices in Catastrophically Flooded Communities. pp 1–9
- [51] C.S. Shrivastav, A. Masola, N. Capodiecici, R. Cavicchioli (2023) Parking Lots Management and Visualization in the Smart City - Digital Twin context. pp. 185–192
- [52] D. Mavrokapnidis, N. Mohammadi, J.E. Taylor (2021) Community dynamics in smart city digital twins: A computer vision-based approach for monitoring and forecasting collective urban hazard exposure. pp. 1810–1818
- [53] S. Sabri, K. Alexandridis, M. Koohikamali, *et al.* (2023) Designing a Spatially-explicit Urban Digital Twin Framework for Smart Water Infrastructure and Flood Management
- [54] S. Yu, Q. Lei, C. Liu, *et al.* (2023) Application research on digital twins of urban earthquake disasters. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* **14**:. <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2278274>
- [55] L. Grolleau. Sobriété foncière, comme cas d’usage du jumeau numérique du bâti. *Sciences de l’environnement*. 2023. (dumas-04510860)