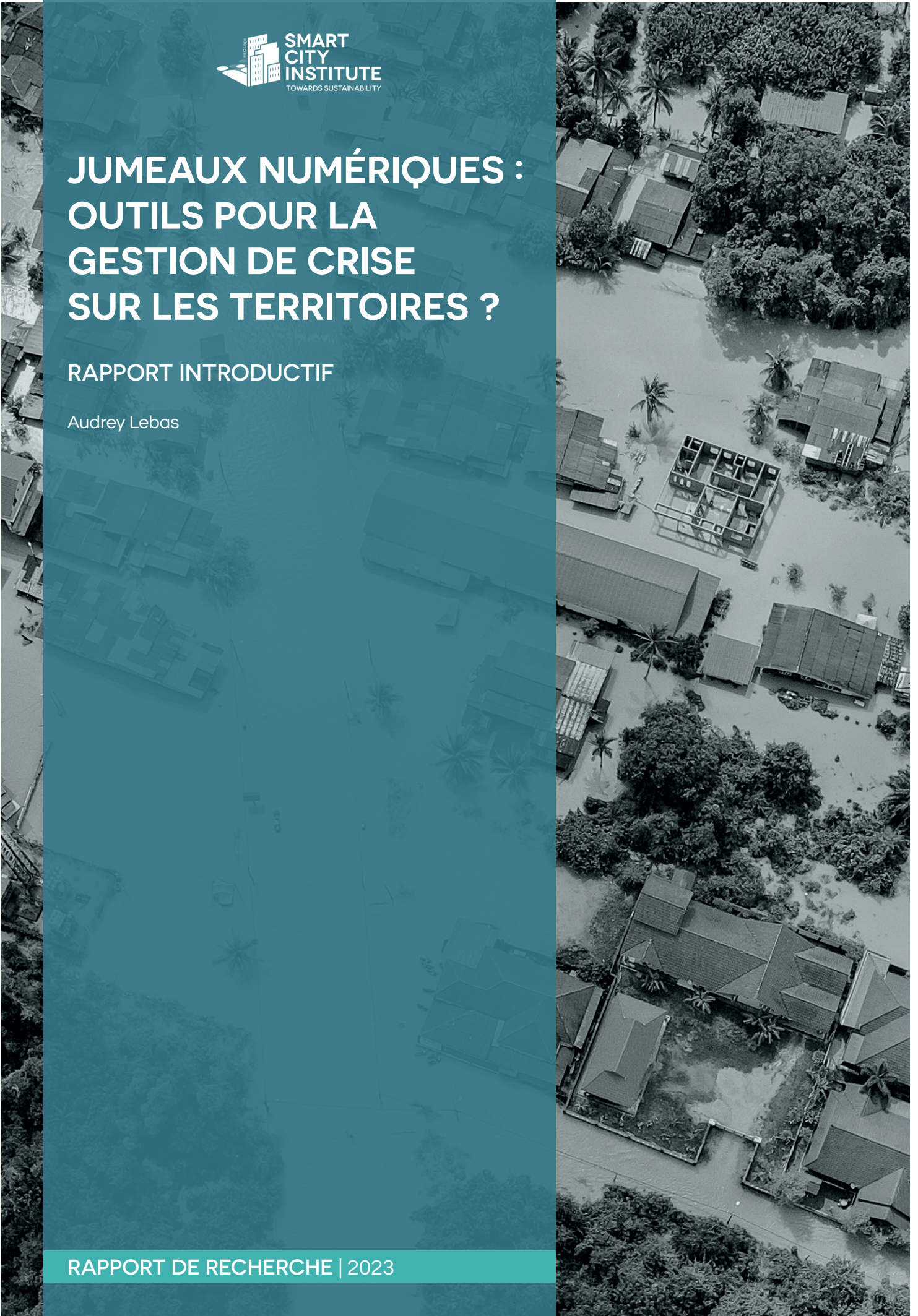


# JUMEAUX NUMÉRIQUES : OUTILS POUR LA GESTION DE CRISE SUR LES TERRITOIRES ?

RAPPORT INTRODUCTIF

Audrey Lebas







# JUMEAUX NUMÉRIQUES : OUTILS POUR LA GESTION DE CRISE SUR LES TERRITOIRES ?

RAPPORT INTRODUCTIF

**AUTRICE**

**Audrey Lebas**

Chargée de Recherche - Smart City Institute, HEC Liège,  
Université de Liège, Belgique

**DESIGN**

Alakazam

**PUBLICATION**

Novembre 2023





## TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION .....	6
2. GESTION DE CRISE .....	8
Définition .....	8
Types de crises .....	8
Gestion .....	10
Lien entre gestion de crise et Smart Cities .....	12
3. JUMEAU NUMÉRIQUE .....	14
Origines et définitions .....	14
Le jumeau numérique dans le contexte territorial .....	16
Différents niveaux de maturité .....	18
4. JUMEAU NUMÉRIQUE ET GESTION DE CRISE .....	20
Planification .....	21
Prise de conscience de la situation et optimisation des ressources .....	22
Collaboration des acteurs .....	23
5. LIMITES .....	24
Complexité des territoires .....	24
Données .....	25
Gouvernance .....	25
6. EXEMPLES .....	26
7. CONCLUSION .....	38
Smart City Institute .....	40
Références .....	42

# 01

## INTRODUCTION

---

La gestion de crise n'est pas un enjeu nouveau pour les territoires. Depuis la nuit des temps, l'une des préoccupations urgentes et immortelles de l'Homme est l'arrivée soudaine d'une catastrophe de masse qui pourrait menacer son existence et causer des ravages et des destructions au sein de sa communauté<sup>1</sup>. Les situations de crise sont un problème ancien et récurrent sur les territoires mais leur fréquence, leur forme et leurs impacts ont évolué à travers les siècles<sup>2</sup>. Au cours des dernières décennies, ces crises se sont complexifiées en raison de la mondialisation<sup>3</sup>. Certaines mégatendances telles que le changement climatique ont par ailleurs amplifié la fréquence des catastrophes et des crises qui y sont liées<sup>4</sup>. Cela a notamment été illustré en Wallonie par les inondations de juillet 2021.

Parallèlement, l'utilisation de l'innovation technologique au sein des territoires s'est aussi développée. Dans ce contexte, le concept de Smart City s'est imposé petit à petit comme un moyen d'optimisation et d'amélioration de l'environnement urbain et non-urbain<sup>5</sup>. Une des technologies fréquemment mises en avant depuis quelques années est le jumeau numérique, ou Digital Twin<sup>i</sup> en anglais, qui est communément décrit comme « une représentation numérique d'un élément physique ou d'un assemblage à l'aide de simulations intégrées et de données de service »<sup>6</sup>. En milieu urbain, il est particulièrement utilisé comme outil d'aide à la décision basé sur la simulation et la visualisation<sup>7,8,9</sup>. Des recherches prédisent d'ailleurs l'existence de plus de 500 jumeaux numériques urbains dans le monde d'ici 2025<sup>10</sup>.

Ce rapport introductif trouve son essence à l'intersection de ces deux constats et pose la question suivante : comment les jumeaux numériques peuvent-ils contribuer à la gestion de crise ? L'objectif de ce rapport est double. Il a d'abord pour but de positionner, d'un point de vue théorique, la gestion de crise et de démystifier le concept de jumeau numérique. Ensuite, il explore le rôle que pourrait avoir cette technologie dans la gestion de crise au sein des territoires. Pour ce faire, il est structuré comme suit : la première section revient sur la définition de la gestion de crise, ainsi que sur la typologie des différentes crises qui peuvent survenir, et enfin, sur le lien global entre gestion de crise et Smart Cities. La deuxième section explique les origines du jumeau numérique, son application à un contexte territorial et ses différents niveaux d'intégration. La troisième section met en lumière plusieurs possibilités d'utilisation du jumeau numérique dans le processus de gestion de crise. La quatrième section s'attarde quant à elle sur les limites actuelles du modèle, notamment du point de vue des données et de la gouvernance. Enfin, différents exemples internationaux sont mis en avant pour clôturer ce rapport.

D'un point de vue méthodologique, ce rapport se base sur une revue de la littérature scientifique et des rapports d'expertise ainsi que sur des échanges avec différents acteurs actifs dans le domaine.

---

<sup>i</sup> Les deux termes seront utilisés de manière interchangeable dans ce rapport.





# 02

## GESTION DE CRISE

### DÉFINITION

Une crise peut être définie comme «un moment de difficulté ou de danger intense»<sup>11</sup>. Les crises se produisent dans toutes sortes de contextes, à des degrés variables. Il est donc impossible d'en donner une définition exhaustive<sup>12</sup>. Cependant, une crise peut être caractérisée par les 3 critères suivants<sup>3,12</sup> :

1. Les crises sont associées à **des menaces** envers les valeurs fondamentales défendues par les décideurs telles que la sécurité, la santé, la démocratie, les libertés civiles, l'autonomie politique et la viabilité économique. Une crise a forcément un impact non négligeable sur la survie et le développement d'une organisation et aucune société, nation, organisation ou individu ne peut rester à l'abri des menaces imposées par les crises ;
2. Les crises impliquent un **degré élevé d'imprévu et d'incertitude** concernant la nature de la menace et la réponse à y apporter<sup>3</sup>. Une crise est une crise en partie parce qu'il est presque impossible de prédire le moment et l'endroit exact où elle se produira ou les conséquences qu'elle aura ;
3. Les crises mènent à un sentiment d'**urgence**. Les événements sont perçus comme évoluant rapidement et les possibilités d'influencer leur cours sont limitées. Elles obligent donc les décideurs à prendre des décisions importantes dans des circonstances extrêmement difficiles.

Le concept de catastrophe est aussi intrinsèquement lié à ces notions de menace, d'incertitude et d'urgence. Une catastrophe peut être définie comme «une perturbation grave du fonctionnement d'une communauté, à quelque échelle que ce soit, due à des événements dangereux interagissant avec des conditions d'exposition, de vulnérabilité et de capacité, entraînant un ou plusieurs des éléments suivants : pertes et impacts humains, matériels, économiques et environnementaux»<sup>13</sup>. En raison de l'interdépendance complexe de la société, de l'infrastructure et de l'environnement naturel, les processus et les résultats des catastrophes sont donc extrêmement difficiles à prévoir<sup>14</sup>.

En d'autres termes, une catastrophe mène généralement à une crise. Par contre, une crise n'est pas toujours liée à une catastrophe puisqu'elle peut résulter d'un processus long terme (ex. crise économique). Dans ce rapport, nous nous focalisons sur la réaction en chaîne provoquée par une catastrophe qui mène rapidement à une crise.

### TYPES DE CRISES

Les catastrophes et les crises qui en découlent peuvent être catégorisées sur base de leurs causes : naturelles ou technologiques/humaines.

Les catastrophes naturelles sont le résultat d'un phénomène environnemental de grande intensité et sont classées selon leur(s) origine(s) : biologique, géophysique, hydrologique, météorologique et/ou climatologique. Certaines de ces catastrophes naturelles sont renforcées par l'impact humain et le changement climatique qui en résulte<sup>3</sup>.

Les catastrophes naturelles ont des répercussions non négligeables sur la politique et l'économie. Malgré les progrès scientifiques et technologiques constants, il est impossible de prédire les catastrophes de manière totalement exacte<sup>3</sup>.





TYPE	BIOLOGIQUE	GÉOPHYSIQUE	HYDROLOGIQUE	MÉTÉOROLOGIQUE	CLIMATOLOGIQUE
Explications	Exposition des organismes vivants à un microbe ou à des substances toxiques	Évènement provenant de la terre ferme	Évènement issu de l'eau	Évènement causé par des variations court terme des processus atmosphériques	Évènement causé par une variabilité climatique moyen/long terme
Exemples	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Épidémie (virale, bactérienne, parasitaire, fongique)</li> <li>• Infestation d'insectes</li> <li>• Mouvement de panique d'animaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tremblement de terre</li> <li>• Éruption volcanique</li> <li>• Mouvement de terrain sec (éboulement, glissement, avalanche, affaissement)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inondation (générale, crue éclair, côtière)</li> <li>• Mouvement de terrain humide (éboulement, avalanche, affaissement)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempête</li> <li>• Cyclone, ouragan ou typhon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Températures extrêmes (vague de chaleur, vague de froid, hiver extrême)</li> <li>• Sécheresse</li> <li>• Incendie (forêt, terre)</li> </ul>

Tab. 1 - Classification des catastrophes naturelles (Adapté depuis Below & al, 2009<sup>15</sup>)

Les catastrophes technologiques, ou catastrophes causées par l'Homme, sont des catastrophes qui ne peuvent être liées à la nature, et entraînent généralement des destructions massives et des décès<sup>16</sup>.

TYPE	ACCIDENTS INDUSTRIELS	ACCIDENTS DE TRANSPORT	ACCIDENTS MIXTES
Explications	Tout évènement qui se produit sur un site industriel, avec des conséquences graves pour le personnel, les riverains ou l'environnement	Tout évènement avec des conséquences pour les usagers d'un mode de transport et/ou son environnement	Toute catastrophe combinant différentes sources et causes
Exemples	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explosion</li> <li>• Incendie</li> <li>• Empoisonnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avion</li> <li>• Route</li> <li>• Route ferroviaire</li> <li>• Voie maritime</li> <li>• Espace</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accident ou attaque militaire</li> <li>• Attaque terroriste</li> <li>• Intoxication alimentaire</li> <li>• Pollution environnementale</li> <li>• Accidents miniers</li> <li>• Matériaux dangereux (fuite de gaz, radiation)</li> </ul>

Tab. 2 - Classification des catastrophes technologiques/humaines (Adapté depuis Below & al, 2009<sup>15</sup>)

En matière d'étendue territoriale, les crises peuvent s'étendre au-delà des frontières nationales et avoir des répercussions économiques importantes en raison de la nature interconnectée de l'économie mondiale et de l'interdépendance causée par cette mondialisation. Comme l'a démontré la pandémie de la Covid 19, une crise locale peut se transformer en crise mondiale en raison de l'effet de débordement<sup>3,12</sup>.

## GESTION

Comme précisé au début de ce rapport, les situations de crise sont un problème ancien et récurrent au sein des territoires mais leur fréquence, leur forme et leurs impacts ont évolué à travers les siècles<sup>2</sup>. Lors d'une crise, au niveau local, les autorités publiques sont exposées à des incertitudes (moment, durée, intensité), qui peuvent fortement affecter la vie des citoyens<sup>3</sup>.

Dès lors, les gouvernements locaux doivent développer des capacités de gestion de crise pour faire face à la complexité, à la nouveauté, à l'ambiguïté et/ou à l'incertitude qui caractérisent les crises contemporaines<sup>3</sup>. La gestion des crises est une responsabilité essentielle pour les décideurs qui ont un rôle crucial à jouer

dans le renforcement de la résilience de leurs réseaux d'infrastructures critiques et de leurs populations<sup>3</sup>.

La gestion de crise vise donc, *in fine*, à rendre un territoire plus résilient. Appliqué à un contexte urbain, la notion de résilience fait référence à « la capacité d'une ville à réussir en tant que centre d'habitation humaine, de production et de progrès culturel, malgré les défis posés par le changement climatique, la croissance démographique et la mondialisation »<sup>17</sup>. Les villes sont résilientes si elles absorbent les chocs et sont capables de maintenir leur activité habituelle. Pour tendre vers cette résilience territoriale, les décideurs doivent donc constamment améliorer leurs processus et capacités à prévenir, à réduire, à gérer et à atténuer les conséquences des crises<sup>3,18</sup>.

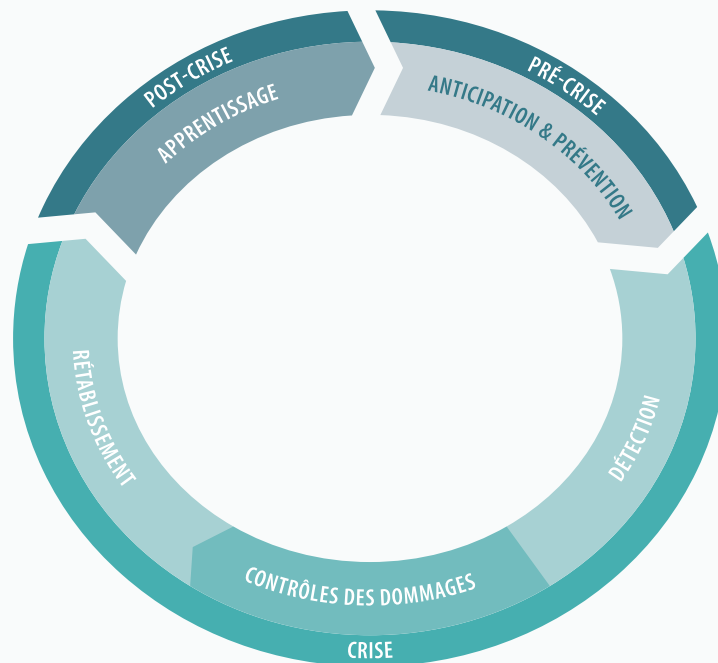


Fig. 1 - Cycle de gestion de crise (Crée à partir de Xue & al, 2022)

Comme le montre le schéma ci-dessus, la gestion de crise est composée de trois phases principales : la pré-crise, la crise et l'après-crise, elles-mêmes divisées en sous-phases<sup>12</sup>.

1. **Pré-crise** : la connaissance et l'évaluation des facteurs de risques sur le territoire (dangers, menaces, vulnérabilités) sont les fondements de la préparation aux crises et aux situations d'urgence. Cette connaissance permet de développer des capacités d'anticipation et de prendre des mesures préventives telles que la mise en place d'un système d'alerte précoce<sup>ii</sup> ou la constitution de stocks de biens ou de services.

2. **La crise** : dès que la crise se matérialise, la phase de réponse commence. Celle-ci est subdivisée en plusieurs étapes :

- a. Détection du début de la crise : identification des signes d'une crise potentielle ;
- b. Contrôle des dommages : lorsque les dommages ne peuvent être évités, vient la mise en place de mesures pour éviter que ceux-ci ne s'étendent à d'autres domaines ;
- c. Rétablissement : les effets de la réponse à la crise se font ressentir et un retour à la « normale » s'effectue.

<sup>ii</sup> Un système d'alerte précoce correspond à un système intégré de surveillance, de prévision et de contrôle des risques, d'évaluation des risques de catastrophe, de communication et de préparation aux activités, de systèmes et de processus qui permet aux individus, aux communautés, aux gouvernements, aux entreprises et autres de prendre des mesures opportunes pour réduire les risques de catastrophe avant que des événements dangereux ne se produisent (United Nations, n.d).



**3. Post-crise :** les mesures entreprises sont examinées et analysées pour en dégager des apprentissages et améliorer la gestion des crises à l'avenir.

Bien que les gouvernements locaux aient un rôle majeur à jouer dans cette gestion de crise, la privatisation et/ou la décentralisation de certains services ont altéré leur capacité à prendre des mesures directes pour prévenir ou atténuer les risques dans des secteurs essentiels tels que la gestion des eaux ou les transports. Les différences de perception voire les conflits de valeurs entre les différents acteurs impliqués dans une crise compliquent parfois la prise de décision<sup>12</sup>. La gestion de crise doit donc être adaptée pour inclure un grand nombre de parties prenantes qui ont potentiellement toutes des priorités et des intérêts différents<sup>3</sup>. Par conséquent, il est important de développer une convergence interdisciplinaire vers une vision unifiée<sup>9</sup>.



## Questions à Simon Riguelle, Directeur du Centre régional de crise de Wallonie<sup>19</sup>

### D'après vous, en quoi consiste la gestion de crise et comment celle-ci est-elle structurée en Wallonie ?

La gestion des crises s'inscrit plus largement dans un processus appelé cycle de gestion des risques qui comprend plusieurs étapes (ndlr : voir page précédente). Il y a donc toujours un travail en amont pour prévenir les risques et prévoir des plans pour faire face aux risques résiduels, et en aval pour retrouver un état stable du système et améliorer les processus.

Au niveau wallon, il faut comprendre ce qui relève de la Région wallonne en tant qu'entité institutionnelle. A cet égard, le décret<sup>iii</sup> relatif à la gestion de crise structure la gestion des risques autour du cycle du risque, et prévoit l'établissement d'un plan régional de gestion de crise qui doit, à terme, reprendre l'ensemble des procédures de gestion des risques et des crises par les services publics régionaux. A ce titre, chaque service est responsable d'identifier, de prévenir et de gérer les risques associés aux compétences qu'il exerce. La coordination entre les acteurs, lorsqu'elle est nécessaire, est exercée par le Centre de coordination des risques et de l'expertise (CoRTEX), futur ex Centre régional de crise<sup>20</sup>.

Concernant les situations d'urgence survenant sur le territoire wallon, leur gestion concrète est du ressort des autorités locales (communes et Gouverneurs de Province) ou nationales (Ministre de l'Intérieur) en fonction de leur ampleur.

### Quels acteurs sont particulièrement importants ?

Tous les maillons de la chaîne sont importants. Mais la gestion de crise repose souvent sur des personnes clés, à savoir les différentes disciplines opérationnelles (D1 : services de secours ; D2 : aide médicale ; D3 : police ; D4 : Défense et Protection civile ; D5 : communication) et les services de planification d'urgence. Au niveau communal, un fonctionnaire chargé de la planification d'urgence exerce ces missions de préparation et de réaction lors de crises et urgences, en appui de l'autorité administrative.

### Quelle est la relation entre la Région wallonne et les communes ?

La Région wallonne fournit un support et une expertise aux communes. Cela va d'outils cartographiques et informations nécessaires à la planification d'urgence, à l'expertise des risques relevant de ses compétences avant et pendant la crise. A cet effet, des cellules d'expertise (Celex) analysent de façon pluridisciplinaire les risques (feux de forêt, inondation, sécheresse, etc.) et conseillent l'autorité locale dans la prise de mesures.

<sup>iii</sup> Le 8 juin 2023, le Gouvernement wallon a adopté le projet de décret relatif à la gestion des risques et des crises en Région wallonne. Ce projet définit les modalités organisationnelles en situation de crises spécifiques en Wallonie.

## LIEN ENTRE GESTION DE CRISE ET SMART CITIES

Si chaque territoire est unique, il partage cependant des défis similaires avec d'autres tels que les changements démographiques, l'organisation des transports, la gestion de l'eau, la sécurité ou la durabilité énergétique<sup>21</sup>. Au cours des dernières décennies, la révolution digitale, notamment au travers des technologies de l'information et de la communication (TIC)<sup>iv</sup>, a changé les manières de communiquer, de travailler, de produire et de vivre ensemble<sup>21</sup>. C'est à l'intersection de ces défis et solutions qu'a émergé le concept de Smart City<sup>2,21</sup>.

Dans cette logique, l'utilisation des TIC et des données peut donc faciliter le processus de transition durable et intelligente des territoires pour améliorer la vie de ces citoyens. La liste non exhaustive inclut :

- ◊ l'internet des objets (IoT) au sens large ;
- ◊ les capteurs ;
- ◊ le big data ;
- ◊ les microprocesseurs ;
- ◊ le cloud ;
- ◊ les robots ;
- ◊ les applications mobiles ;
- ◊ l'intelligence artificielle (IA), y compris l'apprentissage automatique ;
- ◊ le GPS (système de positionnement global) ;
- ◊ la réalité virtuelle et la réalité augmentée et ;
- ◊ les technologies des drones.

D'un point de vue de gestion de crise, le onzième objectif de développement durable (ODD) des Nations Unies<sup>v</sup> explicite que les Smart Cities doivent être en mesure de se préparer et de mieux répondre à des événements imprévus<sup>17,22</sup>. Dès lors, l'utilisation des TIC peut être étendue au contexte de crise et en atténuer les effets lorsqu'elles deviennent inévitables<sup>2</sup>.

En effet, cet accès accru à l'information et une meilleure utilisation de celle-ci peut présenter des avantages décisifs en cas de crise comme la gestion intelligente des foules, la coordination des interventions, les systèmes d'alerte d'urgence et la gestion des opérations d'urgence<sup>2,3,16,22</sup>. Dans un contexte territorial, cet accès à l'information constitue la base de la valeur ajoutée d'un jumeau numérique dans la prise de décision.

### Pour rappel, le Smart City Institute définit une Smart City comme<sup>21</sup> :

- ◊ un écosystème de parties prenantes (gouvernements, citoyens, entreprises multinationales et locales, associations, ONG, universités, institutions internationales, etc.) ;
- ◊ sur un territoire (urbain) donné ;
- ◊ engagé dans un processus de transition durable (l'objectif est donc d'assurer la croissance et la prospérité économique, le bien-être social et le respect des ressources naturelles sur ce territoire) ;
- ◊ tout en utilisant les technologies (technologies digitales, ingénierie, technologies hybrides) comme facilitateur ;
- ◊ pour atteindre ces objectifs de durabilité et mener à bien les actions qui y sont liées.

<sup>iv</sup> Ensemble d'outils et de ressources technologiques permettant de transmettre, d'enregistrer, de créer, de partager ou d'échanger des informations, notamment les ordinateurs, l'internet (sites Web, blogs et messagerie électronique), les technologies et appareils de diffusion en direct (radio, télévision et diffusion sur l'internet) et en différé (podcast, lecteurs audio et vidéo et supports d'enregistrement) ainsi que la téléphonie (fixe ou mobile, satellite, visioconférence, etc.) (UNESCO).

<sup>v</sup> Le 2 août 2015, les 193 pays membres des Nations Unies ont approuvé 17 objectifs de développement durable (ODD) à l'horizon 2030. Cet agenda définit des cibles à atteindre à l'horizon 2030. Les ODD répondent aux objectifs généraux suivants : éradiquer la **pauvreté** sous toutes ses formes et dans tous les pays, protéger la **planète** et garantir la **prospérité** pour tous.







# 03

## JUMEAU NUMÉRIQUE

### ORIGINES ET DÉFINITIONS

Les prémices de la notion de jumeau numérique peuvent être associées à la mission de sauvetage du vaisseau d'Apollo 13 en 1970. La NASA avait fabriqué deux engins spatiaux identiques, dont l'un, resté sur terre, a été utilisé pour cartographier l'état de l'engin envoyé dans l'espace<sup>23</sup>. A cette époque, la NASA définit le jumeau numérique comme « une simulation probabiliste multi-physique et multi-échelle intégrée d'un véhicule ou d'un système qui utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, les mises à jour des capteurs, l'historique de la flotte, etc. pour reproduire la vie de son jumeau volant »<sup>24,25</sup>. Le concept a ensuite été ramené sur le devant de la scène en 2002, lorsque le Dr Michael Grieves, chercheur à l'Université du Michigan, propose le jumeau numérique comme modèle de simulation pour améliorer la gestion du cycle de vie de divers produits industriels.

Il définit alors le jumeau numérique comme la combinaison de trois éléments clés<sup>26</sup> :

- (1) un jumeau virtuel
- (2) une contrepartie physique et
- (3) un cycle de flux de données entre les entités physique et virtuelle

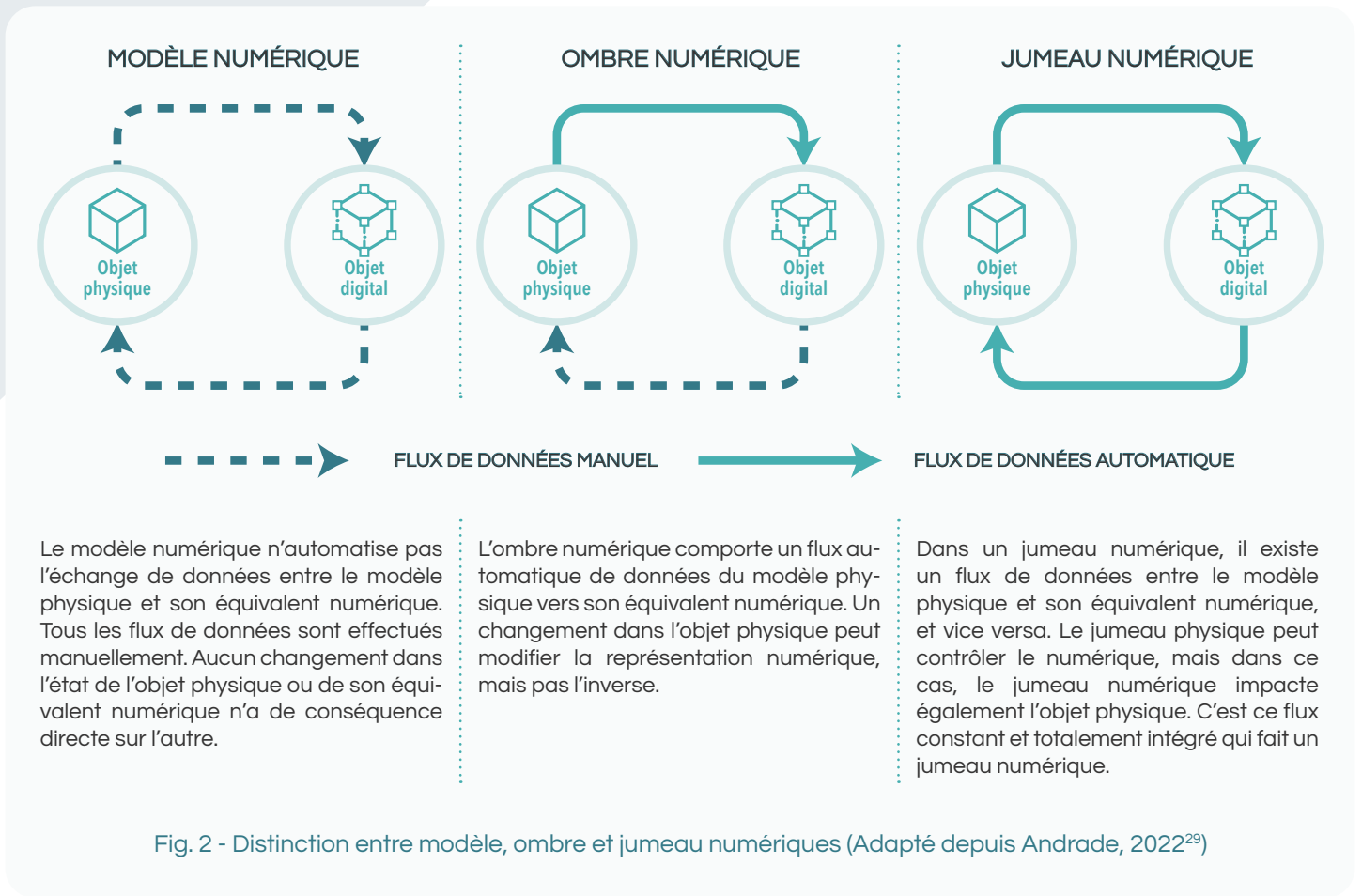
Bien qu'il n'y ait pas de définition unique du concept, toutes les définitions existantes s'accordent sur ces 3 éléments<sup>27,28</sup>.

Dans le cadre de ce rapport, nous compléterons ces éléments avec la définition suivante : « Un jumeau numérique est un modèle virtuel dynamique et auto-évolutif ou une simulation d'un sujet ou d'un objet réel représentant l'état exact de son jumeau physique à un moment donné via l'échange de données en temps réel et la conservation de données historiques. Le jumeau numérique n'imité pas seulement son jumeau physique : tout changement dans le jumeau numérique est également imité par le jumeau physique »<sup>24</sup>.

Un jumeau numérique est une plateforme qui repose donc sur l'utilisation intensive de données quantitatives et qualitatives (liées au matériau, à la fabrication, au processus, etc.), tant historiques qu'en temps réel. L'utilisation intensive de ces données est couplée à des capacités d'analyse, de modélisation et/ou d'apprentissage (ex. intelligence artificielle).

L'atout majeur d'un jumeau numérique dans un contexte industriel est sa capacité à prédire l'état futur d'un système lorsqu'il est testé dans différentes conditions, sur la base d'analyses et de simulations fondées sur des données, dans des conditions réelles ou hypothétiques<sup>26</sup>. Il permet de pouvoir simuler certaines décisions sur le jumeau numérique et non sur le jumeau physique. L'information remplace donc les ressources physiques gaspillées, c.à.d. le temps, l'énergie et le matériel<sup>26</sup>.

Au-delà des débats qui concernent ce qu'est un jumeau numérique, il est important de noter ce qu'il n'est pas. Même si de nombreuses organisations utilisent le terme « jumeau numérique » comme synonyme de modèle 3D, un modèle 3D n'est qu'une potentielle infime partie d'un jumeau numérique<sup>24</sup>. Comme le montre le schéma à la page suivante, selon le niveau d'intégration des données entre les contreparties physique et numérique, trois sous-catégories sont considérées : le modèle numérique, l'ombre numérique et le jumeau numérique.



L’échange bidirectionnel de données, aussi appelé « cycle de flux de données », et l’autogestion en temps réel distinguent ainsi le jumeau numérique des autres systèmes numériques<sup>24</sup>.

Un jumeau numérique, dans sa forme la plus complète, présente les 3 caractéristiques suivantes<sup>25</sup>:

**LA CONCENTRATION**



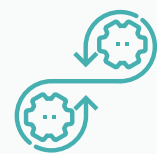
Toutes les données du cycle de vie d’un système physique sont stockées sur une ligne numérique principale pour une gestion centralisée et unifiée, ce qui rend le transfert de données dans les deux sens plus efficace.

**L’INTÉGRITÉ**



Les jumeaux numériques intègrent toutes les composantes et sous-composantes d’un système, ce qui constitue la base d’une modélisation de haute précision. La surveillance en temps réel des données permet d’enrichir et d’améliorer ce modèle, ce qui permet à ce dernier de contenir toutes les connaissances du système.

**LE DYNAMISME**



Les données des capteurs décrivant l’environnement ou l’état du système physique peuvent être utilisées pour des mises à jour dynamiques des objets. L’interaction en temps réel entre les jumeaux physique et numérique permet aux modèles de croître et d’évoluer tout au long de leur cycle de vie.

## LE JUMEAU NUMÉRIQUE DANS UN CONTEXTE TERRITORIAL

Le développement rapide et la popularisation du Big Data, de l'IoT et de l'IA ont donné une forte impulsion au développement et à l'adoption des jumeaux numériques<sup>12</sup>. Le concept de jumeau numérique a été largement utilisé dans différents secteurs tels que la fabrication, l'aviation ou le secteur automobile. Son application à l'environnement bâti et aux territoires est quant à elle plus récente (2017)<sup>28,30</sup>. On remarque d'ailleurs qu'on retrouve très peu de publications scientifiques à ce sujet avant 2018<sup>31</sup>.

Comme expliqué dans la section sur la gestion de crise, les territoires sont devenus des systèmes complexes où les défis sociaux, économiques, environnementaux et technologiques s'influencent et s'alimentent mutuellement (ex. changement climatique, urbanisation, perte de biodiversité)<sup>5,25,32</sup>. Dans ce contexte, la gestion des territoires est donc devenue plus complexe et les systèmes de gouvernance publics sont parfois inadéquats puisque ces enjeux dépassent les cloisonnements organisationnels, institutionnels et sectoriels traditionnels<sup>33</sup>.

La modélisation urbaine n'est pas un nouveau phénomène puisque les urbanistes débattent de son utilité et de son impact depuis les années 1960<sup>33</sup>. Cependant, les jumeaux numériques constituent une nouvelle génération de modèles et permettent de surpasser des silos traditionnels en analysant l'impact des décisions sur les différents secteurs et différentes parties prenantes du territoire<sup>5,10,33</sup>.

La capacité à gérer et à traiter les données d'un territoire est essentielle en raison des multiples thématiques et des quantités de données hétérogènes qui peuvent être générées<sup>30</sup>. Les jumeaux numériques ont le potentiel d'améliorer l'interopérabilité sur les territoires grâce à leur capacité à intégrer plusieurs modèles de données<sup>30</sup>. En effet, **la principale valeur ajoutée des jumeaux numériques par rapport à d'autres types de systèmes d'informations est leur capacité à interconnecter ces différentes sources de données urbaines grâce à l'intelligence artificielle et à des algorithmes d'une manière qui peut évoluer avec le territoire et refléter sa complexité**<sup>8,31,33,34</sup>. Suivant la même logique qu'un jumeau numérique industriel, un **jumeau numérique urbain permet donc d'explorer les opportunités stratégiques interdisciplinaires, lorsqu'il est risqué, compliqué ou coûteux d'expérimenter cela sur le terrain**<sup>35</sup>.

In fine, le **jumeau numérique urbain vise à améliorer la gestion et les opérations afin de tendre vers des politiques urbaines durables et une meilleure qualité de vie pour les citoyens**<sup>7,33,36</sup>. On distingue deux catégories d'avantages liés aux simulations d'un jumeau numérique<sup>10</sup>:

- ⊕ Les avantages prédictifs : l'amélioration de la planification de scénarios à plus long terme pour éclairer les décisions d'investissement
- ⊕ Les avantages réactifs : l'amélioration des interventions en temps réel ou en temps quasi réel et le bon fonctionnement quotidien de la ville ou de l'infrastructure analysée

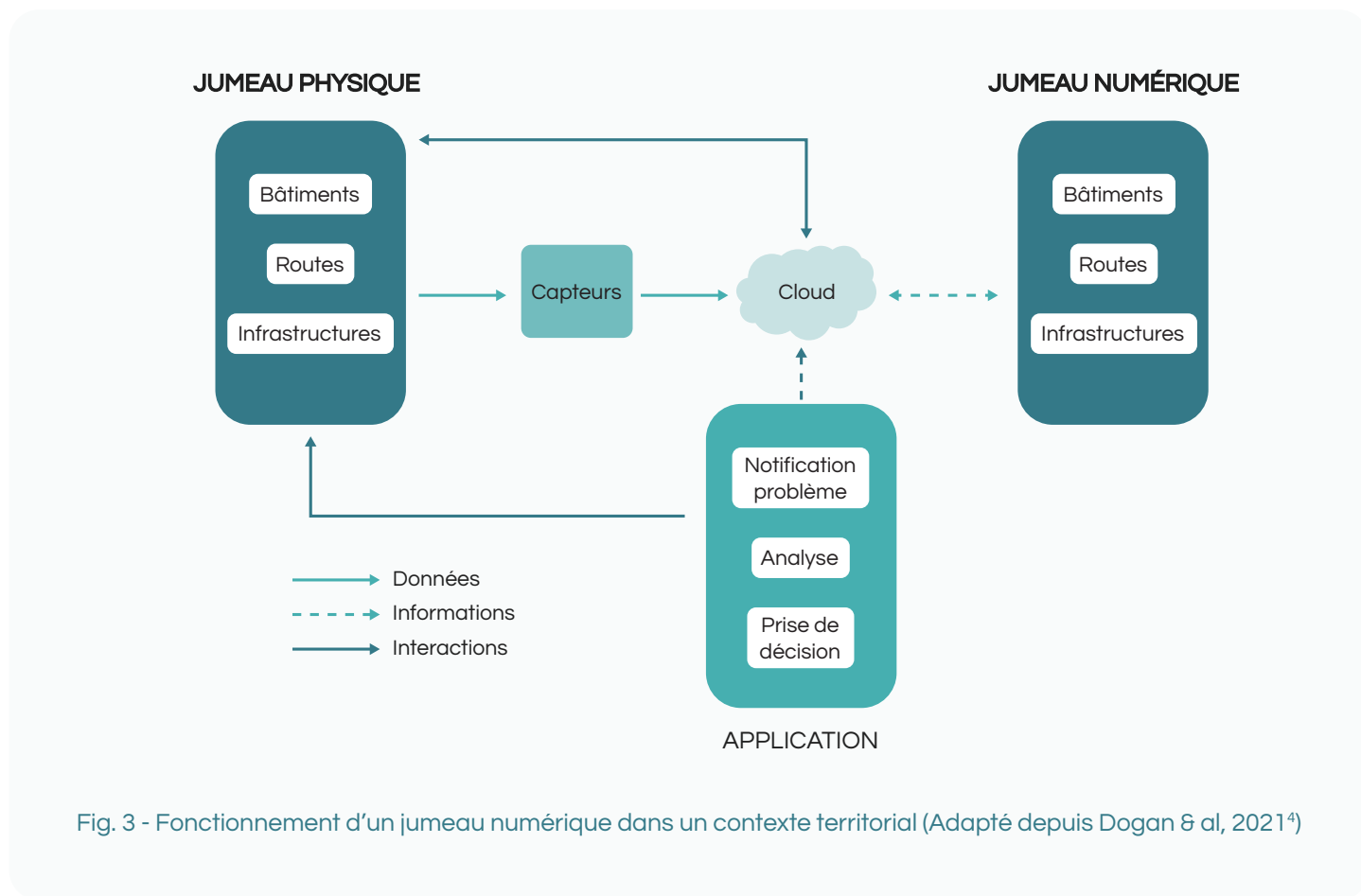
L'interface graphique est également un élément clé pour permettre une meilleure compréhension des résultats. Le jumeau numérique devient alors une plateforme de simulation urbaine qui permet d'afficher un modèle actualisé en temps réel montrant les requêtes et l'analyse de divers domaines de la ville (ex. espaces urbains, infrastructures, végétalisation)<sup>30</sup>. Cette visualisation peut se faire en 2D ou en 3D, en fonction des besoins du projet et des ressources à disposition. La vision 3D permet une modélisation plus précise, notamment dans le cas de bâtiments ou de ponts. Cependant, elle nécessite énormément de capacités de simulation et de temps. La vision 2D, quant à elle, ne permet pas de modéliser des infrastructures complexes et est donc moins précise mais nécessite moins de capacités de simulation et permet d'examiner plus facilement des larges espaces<sup>4</sup>.

Il est important de préciser que, même si on parle de jumeau numérique urbain, ou territorial au sens large, un système holistique d'un territoire n'existe pas. Il s'agit en réalité d'un écosystème virtuel, constitué de la superposition de plusieurs jumeaux numériques (ex. routes, infrastructure énergétique), dans lequel tous les éléments qui constituent le territoire, ou une fonctionnalité du territoire, y sont représentés<sup>37</sup>. Ce système de systèmes fédérés sert d'environnement de simulation et de gestion et fournit les liens manquants entre les modèles urbains spécialisés existants<sup>33</sup>. Pour être exacte et précise, la technologie des jumeaux numériques doit donc permettre de construire une perception globale de l'infrastructure, tant statique (ex. routes, écoles, hôpitaux) que dynamique (ex. flux piétons, consommation énergétique, position des services d'urgence)<sup>12</sup>.

Son fonctionnement est simplifié dans le schéma de la page suivante.







## DIFFÉRENTS NIVEAUX DE MATURITÉ

Il existe plusieurs niveaux de maturité des jumeaux numériques urbains. Comme déjà expliqué, la précision et l'utilité d'un jumeau numérique dépendent du niveau de détail et de l'exhaustivité des données disponibles<sup>34</sup>. De plus, son aptitude d'anticipation nécessite des capacités informatiques capables de fonctionner plus rapidement que l'activité physique qu'elles simulent<sup>26</sup>. Dans le tableau qui suit, nous définissons ces différents niveaux de maturité en distinguant bien les niveaux qui sont en réalité un modèle numérique, une ombre numérique ou un réel jumeau numérique.

La majorité des jumeaux numériques urbains sont actuellement au niveau 2 ou 3<sup>31</sup>. Dès lors, il est important de noter que le terme jumeau numérique est communément utilisé alors qu'au sens strict et académique du terme, il s'agit en réalité de modèles et d'ombres numériques.

Le modèle est connecté à des ensembles de données historiques mises à jours sur le bâti (ex. informations de conception, matériaux, rapports d'inspection). Des données sont ajoutées, étiquetées et extraites des systèmes existants, et non pas intégrées ou stockées directement dans le modèle 2D/3D. A ce niveau, le modèle fournit des simulations multiphysique et multi échelle intégrées et répond à des questions telles que « que se passerait-il si...? » ou « Si je change X, quel sera l'impact sur Y ? ». Il permet donc aux ingénieurs, planificateurs et gestionnaires de projets de prendre des décisions plus rapides et plus judicieuses grâce à des encodages uniques à partir desquelles toutes les données peuvent être visualisées et interrogées. Ce qui réduit les erreurs, les incertitudes et les coûts.

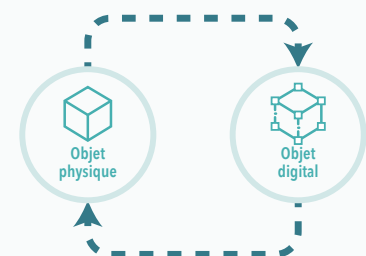
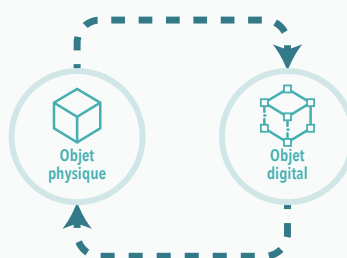
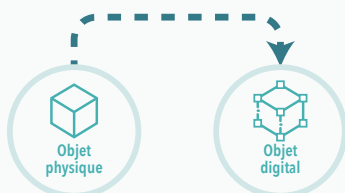
A ce niveau, l'objectif est avant tout de modéliser l'environnement physique existant. Les données sont collectées via diverses méthodes (ex. relevés, photographies, drones, cartes, plans).

A ce stade, les objets sont conçus et mis à jour sur base du modèle établi au niveau 0. Les données sont des données historiques et sont encodées manuellement. A ce niveau de maturité, la valeur ajoutée du modèle réside dans l'optimisation et la coordination pour la conception d'actifs, en répondant à des questions telles que : y a-t-il de la place pour faire passer une nouvelle ligne électrique à cet endroit ? Comment l'équipe de maintenance gèrerait-elle cette tâche?

**Niveau 2**  
Connexion à des données historiques

**Niveau 0**  
Capture de la réalité

**Niveau 1**  
Cartographie 2D-3D basique



Grâce à des capteurs et à l'IoT, des données dynamiques sont obtenues et affichées en temps réel (ou quasi réel) par le biais d'un flux unidirectionnel depuis le jumeau physique vers le jumeau numérique. Ces données peuvent être analysées pour informer et prédire le comportement de l'actif construit et faciliter la prise de décision.

A ce stade, l'outil peut devenir un outil de simulation en temps réel grâce à l'utilisation massive de données en temps réel et à l'IA. Différents modèles, fournis par divers acteurs, peuvent être opérationnels au sein du jumeau numérique urbain. Un modèle peut utiliser les résultats d'un autre modèle et les modèles peuvent être remplacés par d'autres, sans entraver le fonctionnement du jumeau numérique urbain dans son ensemble.

Ce niveau de maturité représente ce que de nombreux fournisseurs de technologies et de services considéreraient comme le point de départ d'un « véritable » jumeau numérique même si ce n'est pas le cas au sens académique de la définition du terme. Ce niveau de maturité est le plus complet/avancé actuellement utilisé.

L'élément déterminant de ce niveau est le flux bidirectionnel de données entre le jumeau physique et sa contrepartie numérique (leur synchronisation)<sup>24,27,38</sup>. L'état et la condition de l'actif physique peuvent être modifiés par le biais du jumeau numérique, les résultats étant renvoyés et mis à jour dans le jumeau physique.

Par exemple, un opérateur pourrait manipuler une vanne ou activer une machine en déclenchant l'action à partir du jumeau numérique. Ce niveau d'intégration nécessite une importante quantité de capteurs et une précision mécanique du jumeau physique pour lui permettre de se mettre à jour.

Un dernier niveau de maturité est atteint lorsque le jumeau numérique urbain ne se contente pas de soutenir les décisions humaines, mais permet également la prise de décision automatisée.

Atteindre ce niveau de maturité n'est pour l'instant qu'une utopie. Ce bi-flux permettrait d'effectuer un processus d'optimisation virtuel basé sur l'état actuel de l'entité physique et de mettre en œuvre cet ensemble optimal de paramètres virtuels dans le jumeau physique<sup>39</sup>. Les avantages quantifiables ne sont pas encore pleinement compris.

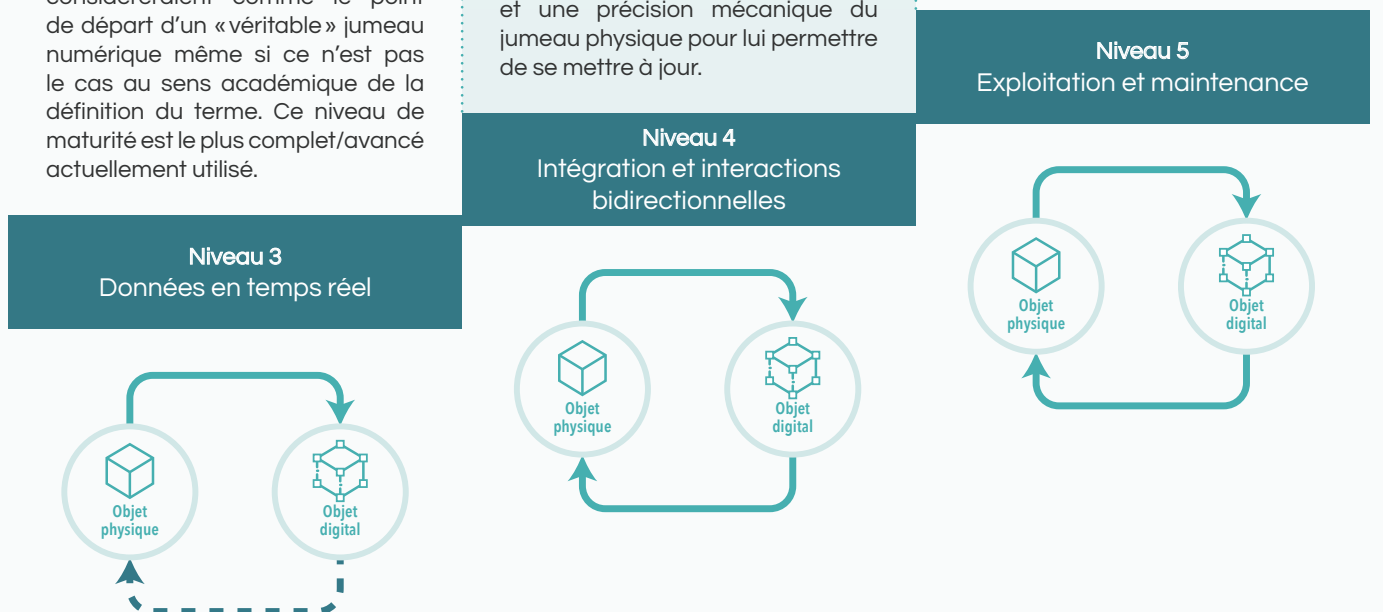


Fig. 4 - Niveaux de modélisation et d'intégration de l'environnement physique et de sa contrepartie numérique dans un contexte territorial (Adapté depuis Evans & al, 2019<sup>37</sup>)

# 04

## JUMEAU NUMÉRIQUE ET GESTION DE CRISE

Actuellement, la technologie ne permet pas encore de prédire le moment où les catastrophes se produisent mais elle peut fournir des moyens de prendre des mesures avant et après afin de réduire leurs effets sur les citoyens et l'infrastructure<sup>4</sup>. A cet égard, le jumeau numérique est l'une des technologies les plus prometteuses vu que sa raison d'être est sa capacité à effectuer des simulations pour déterminer la manière dont un jumeau physique réagirait dans une grande variété de conditions et de former ses utilisateurs à des situations anormales auxquelles ils pourraient être confrontés<sup>12,26</sup>.

D'un point de vue technique, les éléments constitutifs du territoire (c.à.d. objets, infrastructures et flux d'informations), anciens et actuels, peuvent être intégrés par le modèle de jumeau numérique et être analysés plus en détail pour mieux comprendre la manière dont ils interagissent. L'utilisation des TIC et de l'IA permet de simuler et d'analyser les impacts de différents scénarios pour informer la prise de décision en amont ou en temps réel, en associant les informations passées et présentes et les scénarios futurs<sup>30</sup>.

De manière concise, **les jumeaux numériques offrent un environnement réaliste et fondé sur des données pour la prise de décision, la formation et la préparation, permettant aux dirigeants de mieux comprendre, répondre et atténuer les effets de diverses crises. Ils ont donc le potentiel d'améliorer l'évaluation de la situation, la prise de décision, ainsi que la coordination et l'allocation des ressources**<sup>7,9,30</sup>.

Dans ce rapport, nous nous intéressons aux aspects liés à la planification, à la prise de conscience de la situation et à l'optimisation de l'intervention, ainsi qu'au rôle du jumeau numérique pour la collaboration entre les acteurs. Ces utilisations ne sont pas mutuellement exclusives et permettent généralement même de se renforcer l'une l'autre. Comme le montrent les schémas de la page suivante, ces différents usages couvrent l'ensemble du cycle de gestion de crise.



### Questions à Simon Riguelle, Directeur du Centre régional de crise de Wallonie<sup>19</sup>

#### D'après vous, de manière générale, quel est le rôle de la technologie et de l'utilisation des données dans la gestion de crise ?

La technologie joue un rôle central dans la gestion de crise. L'utilisation des données et technologies doit permettre d'améliorer la détection précoce des menaces et l'évaluation des risques pour en anticiper les effets. La remontée d'informations du terrain pendant une crise est un deuxième élément crucial que la technologie devrait permettre d'optimiser. Cependant, l'usage de la technologie est encore trop peu exploré et exploité.

#### Qu'en est-il du jumeau numérique ?

Pour le jumeau numérique, cela pourrait permettre de renforcer la capacité de prise de décision des autorités en leur mettant à disposition des informations en temps réel.

#### Quelles limites ou freins voyez-vous à l'utilisation de la technologie durant la gestion de crise ?

Les freins sont inhérents aux technologies. On peut notamment citer : leur fiabilité et stabilité même en situation dégradée (réseaux de télécommunication détériorés), leur maîtrise suffisante par les acteurs, les coûts qui leur sont associés, leur compatibilité avec d'autres systèmes, etc.



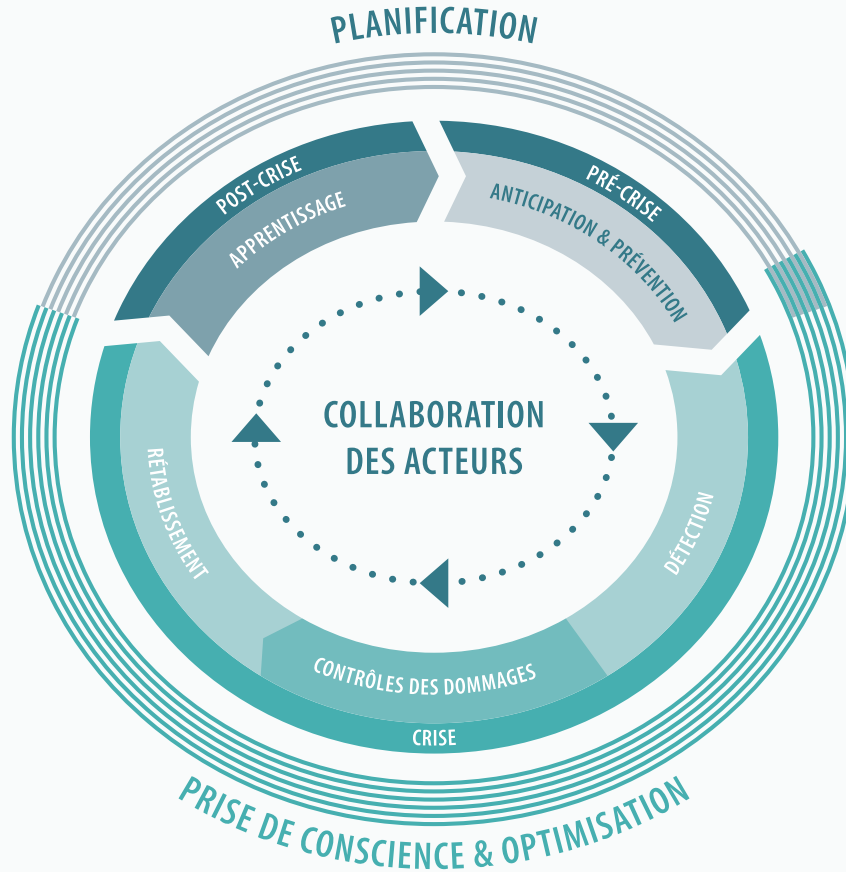


Fig. 5 - Contributions du jumeau numérique dans le processus de gestion de crise

## PLANIFICATION

Même s'il n'est pas possible d'éviter tous les dommages liés à une crise, les risques potentiels peuvent être atténués grâce à une bonne planification. La planification consiste à déterminer ce que l'on veut faire, comment le faire et quels moyens et ressources utiliser pour le faire<sup>3</sup>. L'objectif de la planification d'urgence est de s'assurer que les différents acteurs du territoire disposent de capacités suffisantes pour être capables d'improviser et d'innover<sup>3</sup>. Quel que soit le type de crise, une activité de planification implique un certain nombre d'actions, telles que<sup>3</sup> :

- ◊ Identifier les lieux particulièrement vulnérables ;
- ◊ Appréhender le(s) problème(s) et besoin(s) ;
- ◊ Identifier les possibilités, les opportunités et les ressources à disposition ;
- ◊ Déterminer les actions à entreprendre en utilisant les moyens et les ressources existants pour améliorer les capacités de réponse à la crise ;
- ◊ Lister les acteurs et le matériel nécessaires à la mise en place de ces actions (ex. Installer des dispositifs IoT dans les bâtiments et dans les infrastructures critiques telles que les réseaux de transport, de télécommunication, d'électricité et de gaz naturel).

Comme déjà expliqué, les crises contemporaines nécessitent des capacités de réaction plus agiles que dans le passé<sup>3</sup>. Les territoires ont besoin de modèles de planification fiables, capables d'imiter des expériences réelles, afin de reproduire des événements passés, mais aussi de prédire l'avenir<sup>39</sup>.

**Dans ce contexte, les jumeaux numériques peuvent jouer un rôle clé dans une réelle logique de d'anticipation et de formation. Ils facilitent l'évaluation des risques et des dangers susceptibles de provoquer une catastrophe, de les prévenir ou d'en atténuer les effets éventuels<sup>16,26</sup>. Ils permettent d'effectuer des simulations dans des situations extrêmement rares mais qui peuvent avoir des conséquences désastreuses<sup>34</sup>.**

Grâce à la mise en place de scénarios « et si ? » et la mesure des effets des interventions, les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour visualiser des relations de cause à effet complexes et peut-être abstraites<sup>7,39</sup>. Il est par exemple possible d'identifier plusieurs scénarios (meilleur, pire, et intermédiaire) à partir des informations disponibles<sup>3,7</sup>. Ces simulations permettent aux décideurs de comprendre les conséquences de différentes stratégies et de mettre au point des plans d'intervention efficaces.

En organisant des simulations, les différents acteurs impliqués dans la gestion de crise peuvent aussi s'entraîner et affiner leurs stratégies de réponse dans un environnement simulé, pour réagir de manière plus efficace et plus efficiente face à des situations d'urgence réelles<sup>16</sup>.

En résumé, dans une logique de planification, les simulations sur un jumeau numérique permettent donc :

- ◊ De soutenir les processus de prise de décision et de promouvoir des scénarios politiques alternatifs<sup>30,38</sup> ;
- ◊ D'identifier les principales parties prenantes, les menaces et les opportunités liées à la crise<sup>3</sup> ;
- ◊ De veiller à ce que toutes les parties prenantes soient préparées aux catastrophes par le biais de formations et d'exercices<sup>16,36</sup> ;
- ◊ D'anticiper autant que possible la hiérarchisation des ressources à déployer pendant la crise ;
- ◊ De minimiser les pertes en intervenant à temps, de manière rapide et efficace<sup>16</sup> ;
- ◊ D'élaborer des solutions qui permettent d'intervenir d'une manière équilibrée et mesurée<sup>3</sup>.

La planification est possible à tout niveau de maturité mais plus le jumeau numérique est mature, plus celle-ci sera précise et exacte.

A titre d'illustration, une planification et une conception adaptées aux inondations impliquent de mettre en place les bonnes interventions aux bons endroits. Dans un jumeau numérique, les données liées au niveau de l'eau peuvent être modifiées de manière dynamique, mettant ainsi en évidence les zones qui seraient les premières touchées par la crue d'une rivière ou par de fortes pluies. Le jumeau numérique permet ainsi de tester plusieurs scénarios selon le type, la vitesse, la vélocité, l'étendue et le débit des inondations. Ces simulations peuvent dès lors être utiles aux autorités urbaines pour planifier leur capacité de réaction à ces phénomènes (ex. décider où déployer des sacs de sable et quelles zones de la ville évacuer en premier)<sup>34</sup>.

Dans une optique plus long terme, les simulations peuvent permettre la mise en place de politiques publiques adéquates pour empêcher ou atténuer les effets d'une catastrophe. Par exemple, les rues peuvent être reconfigurées pour améliorer le drainage de l'eau en cas d'inondations<sup>40</sup>.

## PRISE DE CONSCIENCE DE LA SITUATION ET OPTIMISATION DES RESSOURCES

Lorsqu'une crise débute, l'une des tâches les plus fondamentales et les plus difficiles pour les gestionnaires est de comprendre ce qu'il se passe et de se faire une idée de l'évolution de la situation pour une prise de décision effective et juste<sup>3</sup> :

- ◊ Que s'est-il passé ?
- ◊ Combien de personnes sont ou pourraient être affectées ?
- ◊ Quels sont les biens et les intérêts en jeu ?
- ◊ Comment la crise pourrait-elle évoluer ?
- ◊ Quelles sont les capacités disponibles d'un point de vue opérationnel ?

Au début de la crise, les informations recueillies grâce au jumeau numérique peuvent être valorisées dans des systèmes d'alerte d'urgence (SAU). Les SAU sont des systèmes utilisés à différentes fins et dans différentes situations pour avertir la communauté et réduire les dommages causés avant, pendant et/ou après de nombreuses catastrophes<sup>16</sup>. Bien qu'ils existent depuis des décennies, ces systèmes bénéficient aujourd'hui des améliorations significatives apportées à la détection et à la surveillance des risques ainsi qu'aux TIC ces dernières années. Ces systèmes utilisent également des outils d'intelligence artificielle pour déduire, apprendre, mémoriser, planifier et analyser les données<sup>3</sup>.

Durant la phase de contrôle des dommages, les décisions doivent souvent être prises au fur et à mesure de l'évolution de la situation, même si les conséquences ne sont pas toujours bien évaluées<sup>3</sup>. **Le jumeau numérique permet une meilleure compréhension de la situation en cours pour optimiser le déploiement et la gestion des ressources (humaines, financières et matérielles)<sup>5,9</sup>. Le jumeau numérique peut aussi permettre de surveiller et de suivre en temps réel l'état des infrastructures et des ressources critiques<sup>3</sup>. Grâce à l'utilisation de l'IA (niveaux de maturité 2 et 3), les autorités peuvent visualiser les activités et les dommages causés, les lieux et les personnes les plus vulnérables ainsi qu'anticiper les prochaines étapes à suivre<sup>9,30</sup>. Le jumeau numérique permet donc d'anticiper des blocages potentiels et d'identifier les stratégies de réponse les plus efficaces en optimisant la gestion des ressources, potentiellement limitées, pour garantir un rétablissement de la situation le plus rapidement possible<sup>3,26</sup>.**

A titre d'illustration, en cas d'orage violent, les fortes précipitations peuvent provoquer des inondations, ce qui peut mener à des fermetures de routes ou à une coupure d'eau et d'électricité<sup>9</sup>. Grâce au jumeau numérique, les services d'urgence (ambulances, pompiers, services de secours et police) peuvent bénéficier d'un accès aux données météorologiques et de trafic en temps quasi réel pour coordonner plusieurs services, par exemple pour réévaluer un itinéraire sur le réseau de transport touché par des inondations ou des incidents routiers<sup>9</sup>.

## COLLABORATION DES ACTEURS

Les capacités d'intervention en cas de crise sont réparties entre une multitude d'acteurs publics, privés et associatifs, à différentes échelles territoriales. On compte parmi ceux-ci : les agences de gestion des urgences, les départements de protection civile, les services de santé, les pompiers, les forces de police, les unités d'urgence des opérateurs de transport, d'énergie et de communication ou encore la société civile. Tous ces acteurs peuvent et doivent contribuer aux capacités de réponse aux crises en fonction de la nature de celles-ci, de leur structure institutionnelle et de leur mandat. Cependant, ces acteurs ont généralement des perceptions différentes de la définition du problème, des solutions possibles et des voies à suivre pour les mettre en œuvre<sup>3</sup>.

Le contexte de crise, souvent chaotique, requiert une capacité à construire et à partager une expertise multidisciplinaire sous une pression intense. L'efficacité de la gestion des crises dépend d'une coordination en réseau et d'une prise de décision collective entre les différents acteurs<sup>9</sup>. Cependant, ce n'est pas une chose aisée puisque les informations détenues par ces acteurs sont rarement mises en commun.

Même si tous les acteurs ont accès aux mêmes informations de base, les interprétations et les priorités risquent de diverger considérablement car chacun d'entre eux a tendance à analyser et interpréter les événements de son propre point de vue en se concentrant sur un aspect spécifique de la situation : celui qui concerne sa raison d'être<sup>3</sup>.

**Les jumeaux numériques ont la capacité de gérer toutes sortes d'informations de manière unifiée, permettant aux différents acteurs d'accéder et d'ajouter des données à tout moment<sup>25</sup>. L'utilisation de jumeaux numériques peut résoudre les problèmes d'asymétrie de l'information au travers d'un canal d'information unique, d'établir un lien entre plusieurs acteurs, de planifier de manière ordonnée, de répartir raisonnablement les tâches et de fournir un feedback constant<sup>41</sup>. L'aspect visualisation permet également de construire une compréhension commune<sup>42</sup>. En d'autres termes, les jumeaux numériques ont le potentiel d'améliorer la communication et la collaboration entre différentes**

parties prenantes, en veillant à ce qu'elles aient accès aux mêmes informations et travaillent à la réalisation d'un objectif commun<sup>3</sup>.

Cette expertise pluridisciplinaire doit être organisée avant, pendant et après la crise<sup>33</sup> :

- > Avant et après la crise : le jumeau numérique peut servir d'environnement de collaboration entre les différents acteurs du territoire pour s'accorder autour de la complexité du territoire et des interdépendances entre ses éléments (tels que les êtres humains, les infrastructures et les technologies) et de la prise de décision dans le cadre de différents scénarios-catastrophes.
- > Durant la crise, un jumeau numérique peut aussi améliorer la coopération entre toutes les parties prenantes, et notamment au sein des pouvoirs publics, tant de manière horizontale entre les différents départements, que verticalement entre les différents échelons de pouvoir.

Notons l'importance particulière à porter aux échanges avec les citoyens. La communication de crise traditionnelle consiste à transmettre des messages sur l'état d'une crise, ses impacts et les actions et mesures qui ont été déployées. Elle vise généralement à alimenter les médias en faits et à démontrer aux citoyens que les autorités publiques gèrent l'incident le mieux possible<sup>3</sup>. La technologie des jumeaux numériques peut améliorer l'engagement des citoyens en leur permettant de participer à la gestion de crise (ex. un jumeau numérique d'une ville peut fournir aux habitants des mises à jour en temps réel sur les situations d'urgence, ce qui leur permet de prendre les mesures appropriées pour se protéger ainsi que leur famille)<sup>33</sup>.





# 05

## LIMITES

Bien que la technologie des jumeaux numériques soit prometteuse, le développement de jumeaux numériques territoriaux à travers le monde n'en est généralement qu'à un stade 2 ou 3 de maturité. De plus, l'utilisation des jumeaux numériques dans la gestion de crise reste relativement isolée<sup>4</sup>. Il subsiste de nombreux freins ou limitations, notamment : la difficulté à refléter la complexité des territoires, la maturité de la technologie et la gouvernance du modèle.

### COMPLEXITÉ DES TERRITOIRES

La première étape pour la mise en place de jumeaux numériques territoriaux consiste en la modélisation des différentes infrastructures du territoire. Au vu de leur complexité, en tant qu'entité géographique et espace de vie, la construction de ces modèles peut s'avérer difficile. Les critiques ont souligné le degré élevé de simplification des processus nécessaires pour les simuler. Or, ce réductionnisme ne permet pas de comprendre et d'évaluer d'importantes interconnexions entre les différents éléments constitutifs du territoire<sup>33</sup>.

Le premier défi consiste donc à appréhender les différentes couches d'infrastructures qui sont interconnectées et agissent l'une sur l'autre dans une dynamique non-linéaire<sup>32</sup>. Au-delà de l'infrastructure, **un territoire est composé de quartiers qui se définissent autant par leur urbanisme que par leurs interactions, qui sont difficilement mesurables**<sup>30,32</sup>. Cela signifie que les modes de fonctionnement des jumeaux numériques négligent souvent l'importance des **interactions et normes sociales, des lois, de la culture, de l'histoire ou des dynamiques politiques** au sein d'un territoire<sup>10</sup>. Dans un contexte de crise, l'interdépendance entre l'infrastructure physique et ces aspects rend les réactions des citoyens difficilement quantifiables.

Il n'est pas possible de donner un sens à ce qu'il se passe dans le monde réel sans une connaissance solide des relations entre la réalité contextuelle et les choix des personnes présentes sur le territoire. Les données sont un instrument et non un but, et elles ne parlent pas d'elles-mêmes<sup>39</sup>. **Le territoire n'est pas un système automatisé qui peut être facilement compris et prédit, mais plutôt un système vivant qui évolue constamment à travers les variations et les développements de ses constructions physiques, de ses activités économiques et politiques, de ses cadres sociaux et culturels**<sup>3,25,36</sup>. Certaines critiques vont même jusqu'à dire que l'universalisme numérique est un « mythe », en mettant particulièrement l'accent sur les dangers et les risques que comporte son intention de parvenir à une représentation et à une connaissance complètes des phénomènes<sup>10</sup>.

Dans le futur, il sera donc primordial de pouvoir intégrer une variable comportementale pour analyser et évaluer de manière critique l'impact social, politique, économique et technique des jumeaux numériques sur un territoire<sup>33</sup>.





## DONNÉES

Outre la difficulté d'appréhender la complexité d'un territoire, un jumeau numérique requiert des quantités massives de données et de capacités informatiques et techniques pour les intégrer, et ce, dès les prémices du projet<sup>26, 27, 41</sup>.

La **disponibilité et la qualité des données** utilisées est un enjeu majeur<sup>12, 18</sup>. Il est impossible de construire le jumeau numérique d'un territoire sans une base de données solide et sans Big Data<sup>27, 38</sup>. Une gestion de crise nécessite des données en temps réel sur l'état des infrastructures multiples, diverses et connectées simultanément<sup>43</sup>. Cependant, les projets impliquant le Big Data sont susceptibles d'échouer en raison de l'absence de gouvernance et de gestion des données pour relever les défis notamment liés à l'identification et à l'accès aux données, de la transformation des données provenant de différentes sources ou de la mauvaise qualité des données<sup>24</sup>. L'acquisition de ces dernières n'est pas chose aisée puisqu'une partie de celles-ci n'est pas accessible publiquement. En effet, les acteurs qui les possèdent ont certaines prérogatives. Cela peut potentiellement mener à des conflits d'intérêts entre des grosses entreprises, qui ont le monopole de données, et les autorités publiques<sup>10</sup>.

Par ailleurs, lors d'une crise, il est particulièrement difficile d'avoir accès à toutes les données nécessaires en temps réel, entre autres parce qu'il existe un **risque que l'infrastructure (ex. capteurs) soit endommagée** en raison d'un événement climatique fort<sup>3</sup>. Les informations provenant des citoyens sont souvent mises en avant pour pallier ce risque mais celles-ci ne suffisent pas toujours pour une prise de décision efficace<sup>44</sup>.

De surcroît, rappelons qu'il ne suffit pas d'avoir des données en temps réel pour que le jumeau numérique fonctionne. Ces **données doivent également y être chargées automatiquement**<sup>26, 43</sup>. On constate par exemple une tendance à ne pas utiliser automatiquement les sources de données disponibles en raison de leur hétérogénéité (sources variées, différents formats). La standardisation des formats de données et leur interopérabilité, qui permettent une meilleure intégration, constituent donc un défi majeur<sup>32, 45</sup>.

Pour finir, actuellement, les jumeaux numériques peuvent majoritairement être utilisés pour des prédictions à court terme, lorsque l'on peut supposer une relation stable entre les causes et les effets, mais il n'en va pas de même lorsqu'on les utilise pour la planification et les décisions à long terme<sup>39, 44</sup>. En outre, **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**<sup>45</sup>. Une meilleure intégration des données des jumeaux numériques avec les technologies numériques associées est donc nécessaire<sup>10, 46</sup>.

## GOVERNANCE

L'adoption des jumeaux numériques va au-delà de la maturité de la technologie elle-même, et nécessite notamment de prendre en compte des aspects de gouvernance.

Avant toute chose, les décideurs doivent savoir quels sont leurs défis ultimes en matière de gestion d'un jumeau numérique et à quoi ressemblent les processus qui sous-tendent leur prise de décision. Lorsque ce point n'est pas clair, il est difficile de convaincre les utilisateurs finaux que le jumeau numérique peut leur être utile, et la première étape consiste à cartographier les décisions de gestion les plus importantes que le jumeau devra prendre en charge<sup>47</sup>.

Ensuite, pour pouvoir transformer les données en informations utiles et impactantes, il est primordial de **partager l'information de manière appropriée et de la présenter de la façon la plus accessible possible**<sup>42</sup>. En 2002, Dr Grieves, fondateur du jumeau numérique, disait déjà: « *Nous pensons que la technologie nécessaire pour résoudre ces problèmes sera disponible bien plus tôt que les changements culturels indispensables pour adopter et utiliser pleinement la technologie* »<sup>48</sup>.

Dans ce contexte, la **transparence** constitue aussi un enjeu clé. Le manque de transparence envers les citoyens et parties prenantes positionne parfois les données et la modélisation comme une « boîte noire ». Cela crée donc une incertitude quant à leur valeur démocratique<sup>33</sup>.

Parallèlement, les citoyens ont tendance à s'inquiéter des problèmes de sécurité causés par les fuites de données personnelles, notamment dans le cas de données GPS<sup>41</sup>. La mise en place des jumeaux numériques implique l'enregistrement systématique du monde physique dans son « double » numérique. Cela garantirait une transparence absolue mais pourrait aussi provoquer dans une certaine mesure la panique des citoyens<sup>41</sup>. Cela impliquerait notamment que ces données pourraient être consultées et utilisées par des acteurs dont les objectifs sont contraires à l'objectif initial du projet<sup>3</sup>.

Si elle n'est pas bien gouvernée, avec précaution, la technologie du jumeau numérique peut donc être associée à diverses formes de vulnérabilité et constituer une menace sérieuse pour la vie privée, les libertés civiles et les processus démocratiques<sup>3, 36</sup>.

# 06

## EXEMPLES

A travers le monde, de nombreux territoires déploient des solutions de (quasi) jumeau numérique pour améliorer leur gestion de crise, que ce soit avant (planification, anticipation), pendant (prise de conscience, contrôle des dommages) ou après la crise (apprentissage).

### GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG : RÉSILIENCE NATIONALE<sup>49,50,51</sup>

Le Grand-Duché de Luxembourg (± 640.000 hab.) a pour ambition de créer le premier jumeau numérique à l'échelle d'un pays. Ce projet est porté par le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), l'Université du Luxembourg et le Luxembourg Institute of Socio-Economic Research (LISER).

L'initiative fait suite à trois événements climatiques majeurs, tous survenus le 9 août 2019 : une tornade qui a causé beaucoup de dégâts dans le sud du Luxembourg, une importante panne qui a privé un million de personnes d'électricité au Royaume-Uni et un dysfonctionnement du système de ravitaillement qui a bloqué de nombreux avions à l'aéroport d'Amsterdam-Schiphol. Ces trois événements, bien que tout à fait différents, étaient totalement inattendus et ont eu de graves conséquences pour la société.

Le jumeau numérique est alors apparu pour le LIST comme une opportunité de construire une société numérique plus résiliente, capable d'atténuer ce type d'événements à l'échelle du Luxembourg. L'objectif global de ce jumeau numérique est donc de mieux comprendre le pays en tant que tel et de prédire

le comportement de l'infrastructure et des habitants lors de crises futures.

Les usages envisagés dans un premier temps étaient la planification urbaine, la gestion des ressources ou la mobilité. Cependant, l'apparition de la pandémie COVID 19 a modifié les priorités. Les chercheurs ont rapidement mis en place un tableau de visualisation pour comprendre l'impact des décisions politiques (ex. fermeture des écoles, réouverture des restaurants, maintien des frontières ouvertes) sur le nombre prévu d'infections et d'hospitalisations ainsi que sur différentes variables socio-économiques. Depuis, le modèle numérique s'est étendu à d'autres aspects tels que la manière de rendre le réseau électrique plus sûr et plus résistant.

Le projet est actuellement financé par le programme INITIATE du Fond National de la Recherche. Ce dernier qui soutient le lancement et le développement d'idées de projets stratégiques de recherche et d'innovation contribuent à rendre le Luxembourg compétitif au niveau international.

## BACTON : ANTICIPATION D'ÉROSION CÔTIÈRE<sup>52,53</sup>

Le Digital Beach Twin (DBT) est un miroir virtuel du projet d'aménagement du littoral de Bacton (Royaume-Uni, ± 1.200 hab.) dû à l'érosion de la côte. Dans une logique de planification, ce projet de protection côtière permet d'anticiper les risques et d'assurer la protection future du terminal gazier présent, mais aussi de mettre en place des plans d'adaptation pour les villages avoisinants.

Ce miroir virtuel permet une prise de décision au bon moment :

- ◊ Ni trop tard (ce qui pourrait entraîner des impacts catastrophiques en matière d'érosion et d'inondation) ;
- ◊ Ni trop tôt (ce qui entraînerait des investissements inefficaces, voire inutiles).

Les utilisateurs finaux (les sociétés présentes dans le port et le conseil municipal du comté de North Norfolk) peuvent interagir avec le DBT via l'interface utilisateur en ligne, qui leur permet de prendre des décisions concernant les investissements futurs dans la gestion de ce littoral et ce, en toute connaissance de cause.

En pratique, les acteurs concernés ont accès à une carte avec des données géospatiales (qui représentent l'état passé et présent de la plage), à un graphique avec des profils de plage ainsi qu'aux résultats de la modélisation et du déclenchement de potentielles interventions. Ils ont également accès à un graphique qui localise quand et où une intervention, et donc un réinvestissement, devrait être nécessaire. Les modèles prédictifs sont régulièrement recalibrés à l'aide des dernières données de surveillance.

Royal HaskoningDHV, la société d'ingénieurs en charge de la gestion du projet, a mis en avant les éléments suivants pour garantir le succès d'un jumeau numérique :

- ◊ L'importance d'une collaboration directe et intensive entre les utilisateurs finaux, qui constitue un facteur essentiel du succès ou de l'échec d'un jumeau numérique.
- ◊ Une synergie efficace entre une solution numérique et des connaissances spécialisées des acteurs de terrain.





## KUMAMOTO : PRÉDICTION D'INONDATIONS<sup>54,55</sup>

Le Japon est un pays naturellement propice aux catastrophes climatiques (typhons, tremblements de terre et inondations). En 2016, deux grands tremblements de terre ont frappé la préfecture de Kumamoto, dans le sud du pays, avec moins de 28 heures d'écart. Ces tremblements de terre de magnitude 7+ ont provoqué l'effondrement de plus de 8.000 bâtiments et en ont endommagé 35.000 autres de manière significative.

Depuis 2018, la ville de Kumamoto ( $\pm$  740.000 hab.) collabore avec l'entreprise One Concern sur un jumeau numérique qui a pour objectif de mesurer les débordements des rivières (inondations externes), les précipitations qui dépassent la capacité de drainage des zones urbaines (inondations internes) et les inondations provoquées par les ondes de tempête dans les zones côtières.

Comme le montre le schéma ci-dessous, le modèle de prédiction d'inondation global est basé sur des modèles prédictifs propres à chaque type d'inondation. En pratique, le système se base sur les données des prévisions météorologiques. Le système surveille également les informations

météorologiques fournies périodiquement par Weathernews, une organisation locale, et fixe des seuils pour les niveaux d'eau des rivières, les niveaux des marées côtières et les précipitations. Si les données nécessaires sont disponibles pour les grandes rivières, le système peut également prévoir leur niveau d'eau pour les 72 heures à venir et afficher les lieux où le débordement de l'eau peut se produire.

Les inondations sont aussi fortement influencées par des facteurs locaux spécifiques. Ces modèles sont donc notamment basés sur des données de l'environnement naturel telles que l'altitude et l'utilisation des sols. Cependant, ces données ne sont pas suffisantes pour parvenir à des prévisions précises. Dès lors, l'intelligence artificielle et la technologie d'apprentissage automatique sont couplées aux données publiques disponibles pour extrapoler les informations manquantes. Le modèle est calibré à l'aide des données passées sur les débits et les niveaux d'eau des rivières, des données sur le niveau des marées et des données sur l'étendue et la profondeur de l'inondation lorsqu'elle se produit.

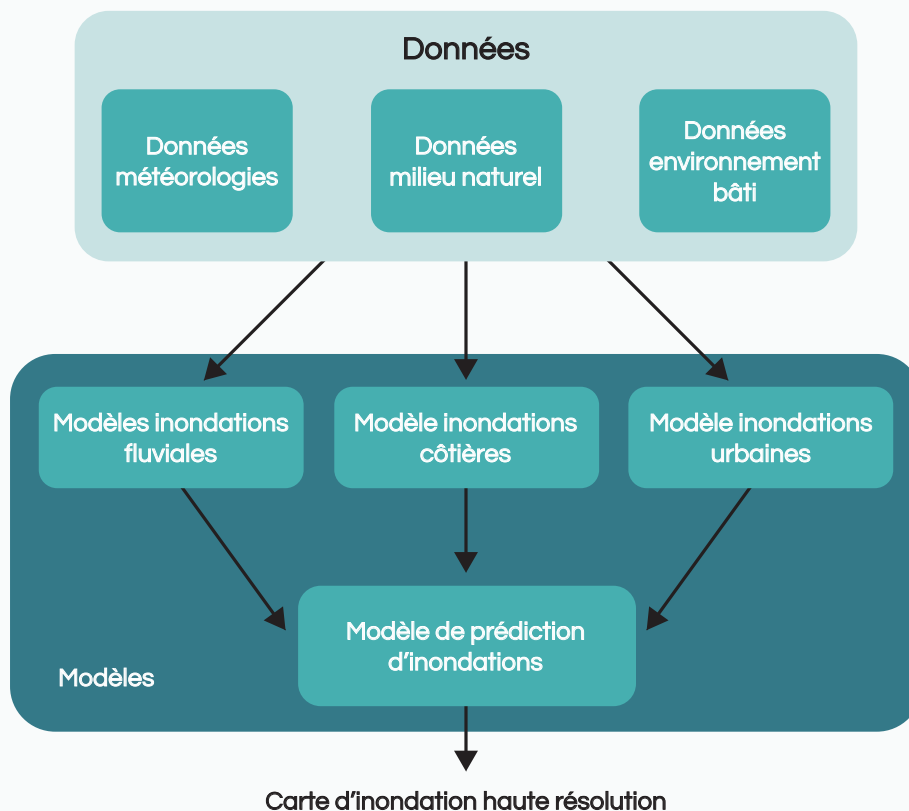


Fig. 6 - Fonctionnement du jumeau numérique de Kumamoto (Adapté depuis OneConcern, 2021)

Les décideurs peuvent envisager les pires scénarios et planifier d'autres mesures d'évacuation et d'intervention d'urgence. En août 2021, lors de précipitations dangereuses, le jumeau numérique a correctement prédit que la rivière ne serait pas en crue et les niveaux observés de la rivière correspondaient étroitement aux prévisions.

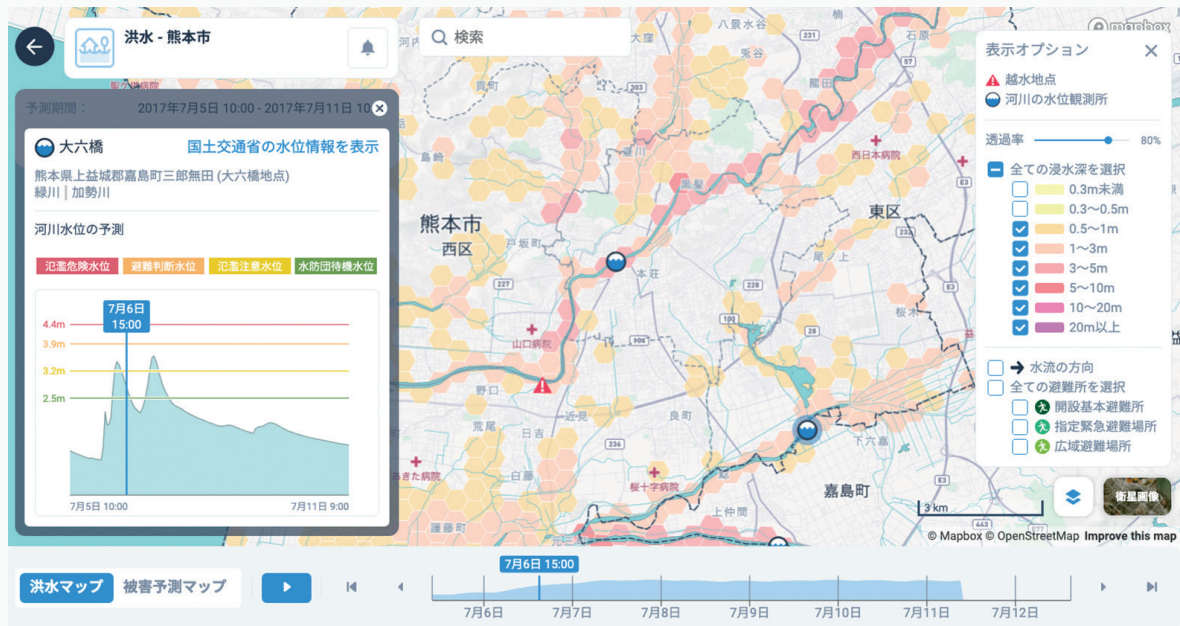


Fig. 7 - Capture d'écran de la plateforme jumeau numérique de Kumamoto (Capturé depuis One Concern, 2021)

## ANGERS : SIMULATIONS ET PRÉVISIONS DE L'IMPACT DES INONDATIONS<sup>56</sup>

Comme de nombreuses villes situées à proximité de grandes étendues d'eau, la ville française d'Angers (environ 151.000 hab.) est confrontée à la menace constante des inondations puisqu'elle est située le long de la Loire.

Pour gérer efficacement ces défis et réduire les risques, les dirigeants de la ville se sont tournés vers l'utilisation des jumeaux numériques, en collaboration avec la société SIRADEL. L'outil permet aux urbanistes et aux services intervenants en cas d'urgence d'obtenir des informations fondées sur des données grâce à :

- Des aperçus historiques : les inondations des 20 dernières années ont été modélisées et visualisées afin de comprendre leur impact sur les infrastructures vitales - telles que l'éclairage public, les routes et les ponts - en particulier dans les zones vulnérables de la ville.
- Des simulations réalistes : en simulant des scénarios d'inondation potentiels (ex. augmentation de 2 cm du niveau de la rivière), la ville a pu identifier les zones à haut risque et les infrastructures essentielles susceptibles d'être impactées.

- Des prévisions : en intégrant des données en temps réel et des prévisions d'inondation, il est possible d'anticiper les incidents, ce qui permet aux dirigeants de la ville et aux services d'urgence de prendre des mesures préventives.
- Une évaluation détaillée de l'impact : au-delà des zones inondables traditionnelles, la solution de SIRADEL a permis à la ville d'évaluer l'impact sur des sites spécifiques, tels que les établissements d'enseignement, les installations médicales, les campings et même les armoires électriques alimentant l'éclairage public.

L'adoption par Angers de la technologie du jumeau numérique a apporté toute une série d'avantages :

- Efficacité : les fonctionnaires de la ville peuvent désormais prendre rapidement des décisions éclairées, optimisant ainsi l'allocation des ressources et les stratégies de réponse lors des inondations.
- Résilience : la ville a renforcé sa résilience aux inondations en identifiant les zones vulnérables et en mettant en œuvre des mesures d'atténuation ciblées.
- Durabilité : en améliorant la gestion des risques d'inondation, Angers contribue à sa durabilité à long terme, en sauvegardant à la fois son patrimoine et ses habitants.

## HOF : IMPACT DES INONDATIONS SUR L'INFRASTRUCTURE<sup>57,58</sup>

Les projets de jumeaux numériques ne s'appliquent pas qu'aux grandes villes. En 2022, le district bavarois de Hof, et plus particulièrement les communes de Hof ( $\pm$  47.000 hab.), de Selbitz ( $\pm$  5.000 hab.) et de Köditz ( $\pm$  3.000 hab.) ont été touchées par de violents orages et des inondations.

Pour améliorer la résilience du territoire, les autorités du district de Hof, en partenariat avec le bureau d'étude hollandais Nelen & Schuurmans et la société Virtual City Systems, développent un jumeau numérique capable de simuler une inondation émergente et son impact sur les bâtiments et les infrastructures telles que les routes, les ponts et le réseau électrique. Le développement de ce jumeau numérique est financé par la banque KfW et par le ministère fédéral de l'intérieur au travers de son programme Smart Cities.

Le jumeau numérique est composé de deux composantes principales :

1. La modélisation numérique de l'environnement physique : les données sont collectées à l'aide d'un avion et de systèmes de caméra avancés capables de capturer les bâtiments sous plusieurs angles. Le jeu de données récoltées reflète les étages et la hauteur des bâtiments et des textures photoréalistes des bâtiments y sont ajoutés.
2. La modélisation numérique des potentielles inondations : l'entreprise Nelen & Schuurmans a développé une plateforme de simulation hydrodynamique capable de simuler le mouvement de l'eau dans des processus tels que le ruissellement des précipitations, l'infiltration, l'écoulement de surface, l'écoulement des eaux usées, l'écoulement dans les rivières et autour d'obstacles pour finalement simuler des inondations. Les données pluviométriques du modèle proviennent des prévisions de précipitations du modèle du service météorologique allemand. Pour simuler correctement les inondations, les jeux de données sont édités pour incorporer les obstacles dans le modèle de terrain, tels que l'empreinte des bâtiments, les ponts et le lit de la rivière.



Fig. 8 - Capture d'écran du projet de jumeau numérique du district de Hof (Capturé depuis Nelen & Schuurmans, 2022)



## AUSTIN : IMPACT DES INCENDIES SUR LA SANTÉ PUBLIQUE<sup>59,60</sup>

L'Université du Texas à Austin, en collaboration avec la ville d'Austin, a récemment développé FireCOM, un jumeau numérique conçu pour la surveillance et la prévision en temps réel des incendies actifs et l'impact de la retombée des fumées sur l'environnement urbain.

Lors d'un incendie, 80 à 90 % des décès qui surviennent peuvent être attribués à l'inhalation de fumée. En effet, au-delà des risques liés aux flammes et à la chaleur des feux, les effets de leurs fumées ont des conséquences dangereuses sur la santé en raison des polluants atmosphériques qui en résultent, comme l'amiante, les pesticides et le cyanure. Ceux-ci se retrouvent en suspension dans l'air et sont transportés aux alentours.

En servant de système d'alerte précoce, FireCOM vise à améliorer les conditions sanitaires et à amener une réponse plus efficace aux incendies urbains. Ses utilisateurs principaux sont les habitants des villes, les services d'urgence et les décideurs impliqués dans la gestion des incendies et de la santé publique.

En pratique, FireCOM recueille et combine en temps réel différentes sources de données pour prédire avec précision la dispersion des fumées dans les une, deux et trois heures qui suivent un incendie. Les données en temps réel sont principalement constituées de :

- La localisation des incendies : les données en temps réel sur les emplacements sont obtenues auprès du service des incendies d'Austin ;

- La météo : les données météorologiques sont obtenues auprès du National Weather Service, l'agence nationale qui fournit des prévisions et des alertes météorologiques, hydrologiques et climatiques pour les États-Unis. Les données des services météorologiques sont extrêmement importantes car la direction et la force du vent déterminent majoritairement la région d'impact. Les conditions météorologiques constituent peut-être le facteur le plus important qui détermine la progression spatiale des fumées ;
- La qualité de l'air : les données sur la qualité de l'air proviennent des capteurs de qualité de l'air extérieur situés à proximité et fournis par des capteurs de particules laser à faible coût connectés au WiFi.

Ces données en temps réel sont combinées à des données statiques telles que l'infrastructure, y compris la classification des bâtiments et des rues comme les écoles, les hôpitaux et les limitations de vitesse. Ces données topographiques d'Austin proviennent quant à elles d'OpenTopography<sup>61</sup>, une plateforme de données topographiques haute résolution en accès libre. Les structures urbaines en 3D sont issues d'OpenStreetMap<sup>62</sup> pour créer la carte de base du jumeau numérique.

En outre, pour que les simulations soient utiles en dehors d'un public scientifique, la visualisation est essentielle. Les chercheurs ont donc combiné la visualisation des flux liés aux informations en temps réel à une ville en 3D au travers d'une suite de créations 3D open source. Plus d'informations sur le fonctionnement et la combinaison de ces différents éléments sont disponibles dans le schéma ci-dessous.

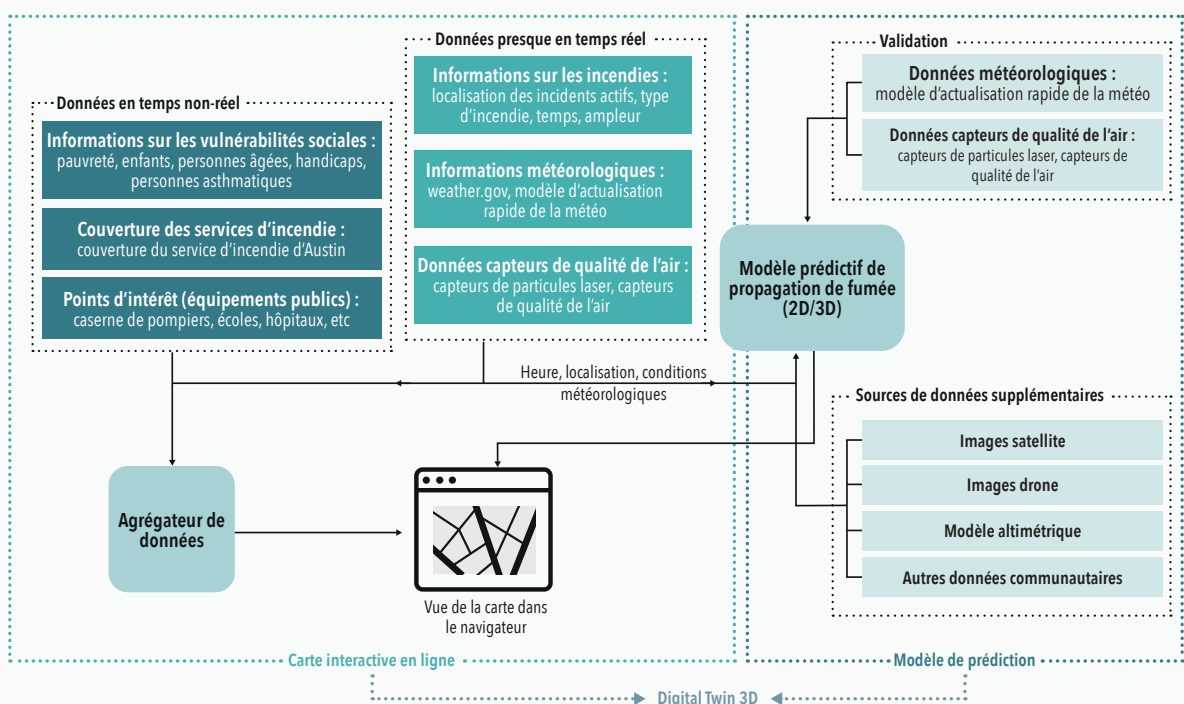


Fig. 9 - Éléments constitutifs du projet FireCOM (Adapté depuis Jiao & al, 2023)

Les simulations à la demande de trajectoires de fumées d'incendies urbains n'avaient jamais été tentées jusque-là en raison de la complexité de ces mesures. Sans jumeau numérique, la détection et le suivi des incendies sont généralement effectués à l'aide de données satellitaires (c.à.d. à partir de signatures thermiques anormales et de points lumineux à la surface de la Terre). Ces signaux pour les incendies en milieu urbain sont cependant faibles et souvent impossibles à distinguer d'autres signatures thermiques (ex. reflets du soleil), ce qui rend la détection difficile. Le jumeau numérique constitue donc un réel atout de planification et d'anticipation pour les autorités locales.

En 2022, plus de 20.000 incendies se sont déclarés dans la seule ville d'Austin. L'analyse de ces données a révélé plusieurs tendances, notamment que la plupart des incendies se produisent l'après-midi, généralement entre 17 et 22 heures. En croisant les données reçues pour chaque incendie avec une carte d'Austin, les chercheurs ont créé une carte d'analyse du « risque d'incendie » où l'orange représente un risque d'incendie normal, tandis que le jaune et le rouge représentent respectivement un risque inférieur et supérieur à la moyenne.

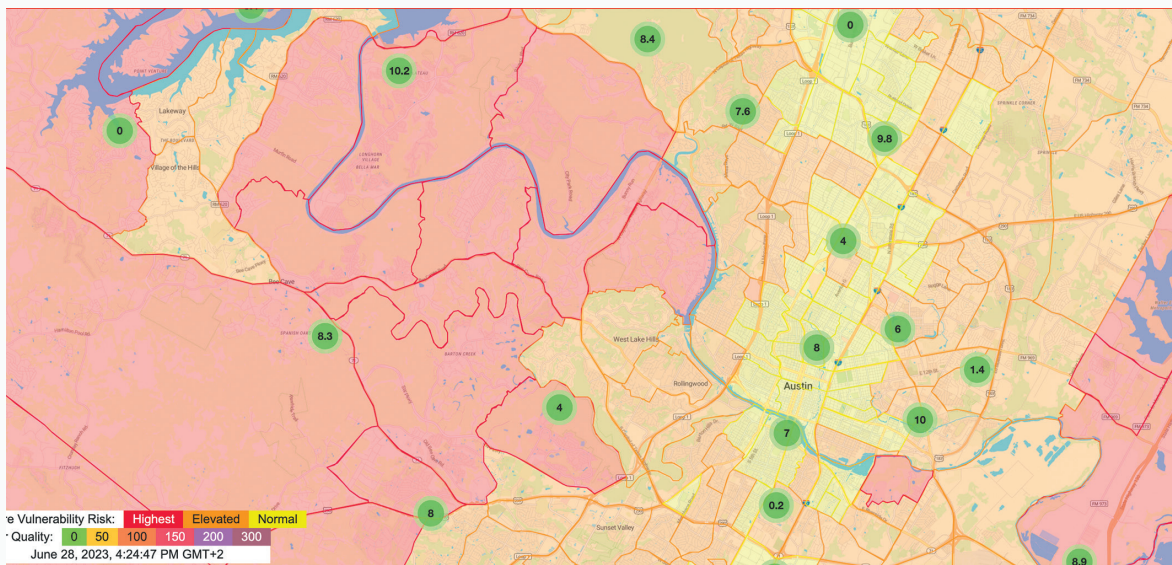


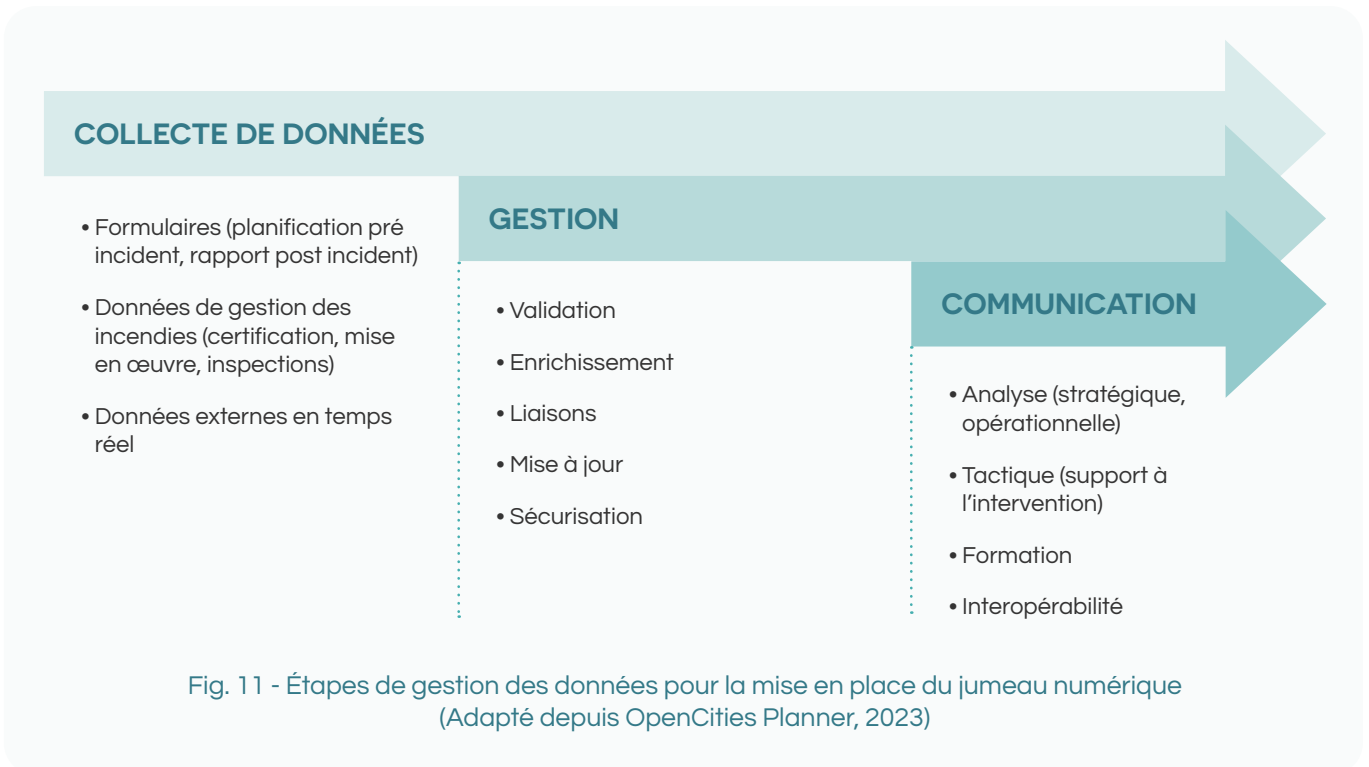
Fig. 10 - Capture d'écran de la plateforme en temps réel (Capturé depuis UT Austin, n.d.)

Bien que le projet soit prometteur, ses concepteurs ont rencontré ou rencontrent certaines limites :

- ◊ Bien qu'elles donnent des résultats très réalistes, les simulations de dynamiques des fluides d'air sont coûteuses.
- ◊ La ville manque de capteurs de qualité de l'air. Le territoire d'Austin étant très étendu, les capteurs de qualité de l'air sont généralement positionnés à au moins un kilomètre de l'incendie.
- ◊ Au-delà de l'accès aux données, les gestionnaires du projet ont été impactés par le manque d'uniformité au niveau des données des incendies. Ils ont donc créé un schéma unifié contenant uniquement les informations nécessaires, c.à.d. le nom de l'incident, la date, les coordonnées de longitude et de latitude, l'adresse et le service de déclaration.
- ◊ Dans le cadre d'un modèle de jumeau numérique urbain complet, les données actuelles ne constitueraient qu'une liste marginale des informations nécessaires. Dans un jumeau exhaustif, on pourrait tirer parti des conditions de circulation sur une voie de droite ou de gauche pour indiquer de quel côté de la route se trouve une voiture en feu, ou même faire des estimations basées sur l'agrégation totale des signaux téléphoniques dans une zone pour déterminer le nombre de personnes potentiellement touchées par une retombée de fumées.

## DUBLIN : PRISE DE DÉCISION DANS L'URGENCE<sup>63</sup>

La ville de Dublin (± 550.000 hab.) utilise un projet de jumeau numérique pour les interventions d'urgence menées par les pompiers de la ville. Le projet est piloté par un consortium composé des pompiers, de l'Université de Dublin, de Smart Dublin<sup>vi</sup> et de Bentley Solutions en tant que fournisseur de solutions. Le schéma ci-dessous reprend les étapes clés dans la gestion des données pour les aspects de planification et le développement de ce jumeau numérique.



L'aspect communication sur les résultats des données disponibles est particulièrement utile. Le jumeau numérique est disponible depuis un navigateur internet, ce qui permet un accès rapide via une tablette lors d'une intervention. En cas d'incendie, les pompiers ont notamment accès :

- ◊ Au lieu de l'incendie : un visuel à 360° basé sur les capteurs disponibles et des informations en temps réel par drones ;
- ◊ Aux constructions : aperçu de la disposition, de la forme, de la hauteur et de l'agencement des bâtiments, tant d'un point de vue aérien (ex. détails de la toiture) que depuis la rue (données historiques fréquemment mises à jour) ;
- ◊ A la quantité d'eau disponible dans le système à disposition à proximité de l'incendie ;
- ◊ A l'exposition aux flammes des bâtiments et des rues environnants ;
- ◊ A des informations en temps réel sur l'emplacement du matériel de lutte contre l'incendie (ex. camions de pompiers).

<sup>vi</sup> Smart Dublin est une plateforme fondée par les autorités locales de Dublin pour préparer l'avenir de la région de Dublin en testant et en développant des solutions innovantes pour un large éventail de défis locaux. La plateforme réunit des fournisseurs de technologies, des universités et des citoyens pour transformer les services publics et améliorer la qualité de vie (Smart Dublin, n.d.).



L'accès rapide à ces informations permet de gagner de précieuses minutes, notamment pour sauver des vies ou éviter l'effondrement d'un bâtiment.

Dans le futur, les gestionnaires souhaiteraient améliorer le jumeau numérique en :

- ◊ Améliorant l'expérience utilisateur de la plateforme en ligne ;
- ◊ L'incorporant à un jumeau numérique global de la ville qui rassemblerait d'autres fonctions telles que le transport ;
- ◊ Incluant plus de données sur l'intérieur des bâtiments (ex. systèmes d'alarme, taux d'occupation en temps réel).

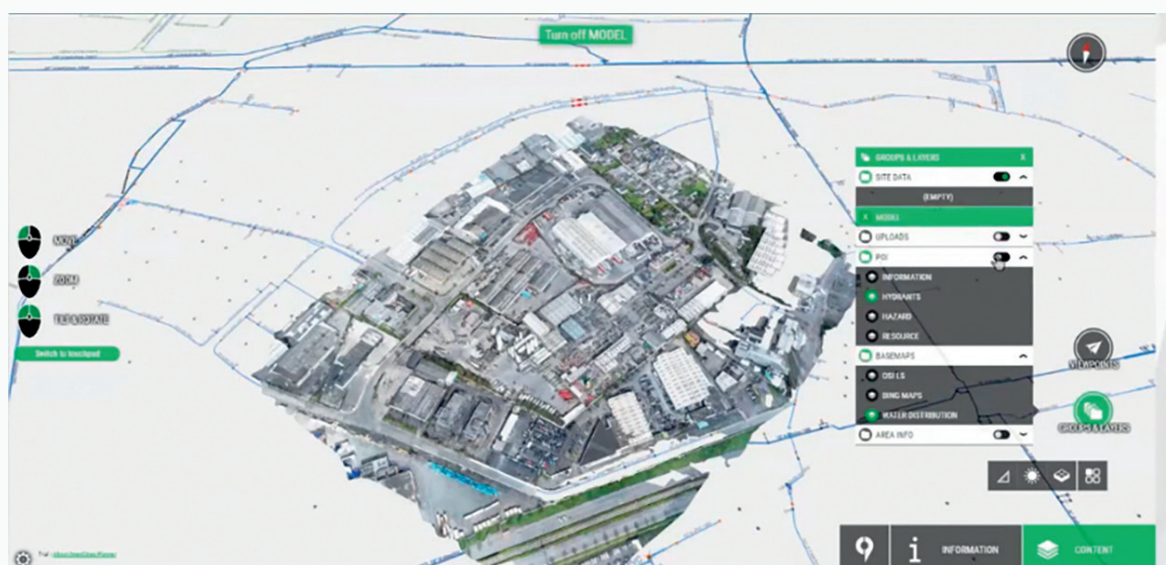


Fig. 12 - Capture d'écran de la plateforme jumeau numérique des pompiers de Dublin (Capturé depuis OpenCities Planner, 2023)

## CAUAYAN : RÉPONSE À L'IMPACT DE TYPHONS<sup>64,65,66</sup>

Depuis 2020, la ville philippine de Cauayan (± 144.00 hab.) utilise un jumeau numérique pour améliorer sa résistance aux typhons et aux inondations qui y sont liées. Elle collabore dans ce cadre avec la société Graffiquo.

En pratique, la plateforme du jumeau numérique convertit des images de drones et des images présentes sur le Cloud en un modèle 3D de la ville, puis utilise l'IA pour calculer l'ampleur des dégâts subis par les maisons, les cultures et le bétail en cas de typhon. Il est intéressant de noter que les équipes de gestion des catastrophes de la ville ont été formées à distance, par le biais d'appels Zoom, à la capture d'images à l'aide de drones.

En novembre 2020, l'outil a particulièrement été utile après le passage du typhon Ulysse qui a causé les pires inondations du territoire en 40 ans. Avant cette technologie, il aurait fallu des jours, voire des mois, pour évaluer les dégâts causés aux propriétés et aux cultures. Or, ici, le logiciel a rapidement calculé que le typhon avait détruit des récoltes pour une valeur estimée à 22 millions de pesos (environ 360.000 euros). Les dommages causés aux infrastructures se sont élevés à 550 millions de pesos (environ 9 millions d'euros).

Les algorithmes ont également permis d'identifier 7.724 familles devant être évacuées, ainsi que le nombre de quartiers entièrement ou partiellement submergés. Grâce aux données récoltées, les autorités ont pu distribuer immédiatement un total de 36.844 colis de secours.

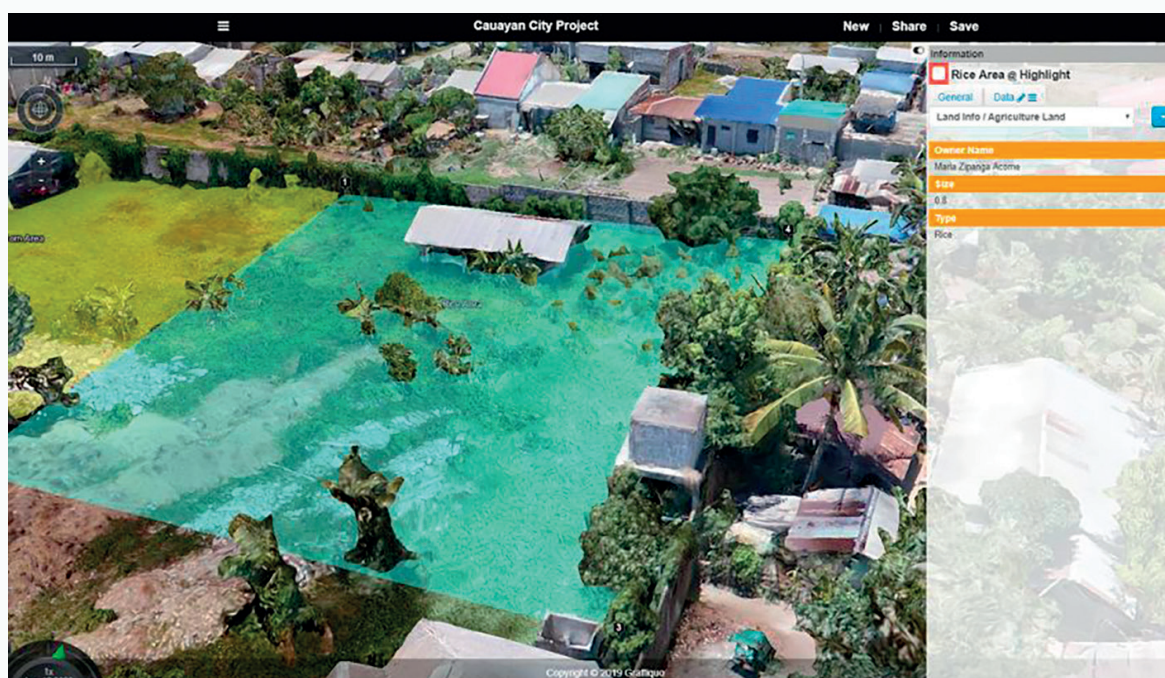


Fig. 13 - Capture d'écran du jumeau numérique de Cauayan (Govinsider, 2021)

## CHERNIHIV : RECONSTRUCTION APRÈS-GUERRE<sup>67,68</sup>

La ville ukrainienne de Chernihiv ( $\pm$  280.000 hab.), située à 100 km au nord de Kiev, a été visée par de nombreuses attaques terrestres et aériennes depuis février 2022. La ville travaille actuellement sur un jumeau numérique pour sa reconstruction.

Le projet est composé de deux phases :

1. Une analyse collaborative des coûts de reconstruction : cette analyse des données satellitaires a pour objectif de détecter et de mettre en évidence les zones impactées de manière automatique. Celle-ci sera complétée par des inspections sur le terrain afin de valider les calculs et la stratégie de priorisation.
2. La reconstruction virtuelle de la ville de Chernihiv pour la planification stratégique : une réplique numérique détaillée et précise de Chernihiv sera développée pour l'optimisation de la reconstruction de la ville, y compris la conception de nouveaux bâtiments et l'organisation des transports urbains, de l'infrastructure et d'autres services. Les planificateurs pourront simuler toutes sortes de scénarios dans la ville avant qu'elle ne soit physiquement reconstruite.

L'objectif de ce jumeau numérique n'est pas de reconstruire la ville à l'identique, mais de construire une ville plus résiliente et durable au service de ses habitants. Par conséquent, différents acteurs seront amenés à collaborer pour tester le jumeau numérique dans différents contextes tels que :

- ◊> L'évaluation des infrastructures existantes, telles que les systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées ;
- ◊> Les exigences en matière de transport et d'accessibilité ;
- ◊> Les nouvelles mesures d'atténuation des risques d'inondation et d'adaptation au changement climatique.

Pour réaliser ce travail, le gouvernement ukrainien a désigné trois entreprises françaises : Dassault Systèmes, Egis et B4, respectivement spécialisées dans les technologies virtuelles 3D, la construction et l'ingénierie.





# 07

## CONCLUSION

---

Bien que les crises existent depuis toujours, les crises actuelles sont plus complexes et variables que dans le passé. Leur gestion requiert dès lors une plus grande flexibilité de la part des décideurs, tant en amont que pendant et après les crises.

Le développement du concept de Smart City, et notamment l'utilisation de l'IoT et de l'IA, a permis de renforcer cette flexibilité et d'atténuer la complexité de ces situations d'urgence. Une approche basée sur la récolte et le partage de données contribue à la planification/préparation, au contrôle des dommages et à l'adaptation d'un territoire face à ces crises.

Dans ce contexte, le jumeau numérique a gagné en popularité au cours de la dernière décennie. Initialement apparu dans un environnement industriel, cette technologie s'est étendue au contexte de la gestion des territoires. Le flux de données continu entre un jumeau physique et son jumeau numérique offre des avantages tant prédictifs (planification) que réactifs (interventions plus pertinentes). Cependant, la popularité du terme a aussi amené une certaine confusion avec d'autres concepts tels que le modèle ou l'ombre numériques.

La technologie des jumeaux numériques a le potentiel d'améliorer la gestion des crises au sein des territoires en fournissant aux responsables territoriaux des capacités de simulation et des données en temps réel, ce qui leur permet de réagir rapidement et efficacement, mais aussi de renforcer la collaborations des acteurs.

Cependant, certaines limites persistent. Tout d'abord, une gestion de crise pertinente et utile au sein d'un territoire nécessite une quantité gigantesque de données pour assurer son fonctionnement en temps réel. Or, un territoire est un écosystème complexe, composé de certains éléments socio-culturels difficiles à quantifier. Ensuite, la technologie des jumeaux numériques territoriaux en est toujours à ses prémices. Il faut donc continuer à la développer pour qu'elle soit opérationnelle, notamment au niveau de l'intégration et de l'interopérabilité des données disponibles. Enfin, il existe aussi un réel enjeu de gouvernance. Dans le futur, il faudra notamment trouver un subtil équilibre entre le besoin de transparence dans une logique démocratique et les craintes liées à la protection des données.

En conclusion, les jumeaux numériques ont assurément un potentiel intéressant dans la gestion de crise, et plus globalement, dans la gouvernance d'un territoire. Cependant, ils ne doivent pas être envisagés comme une quête ultime, mais plutôt comme une option parmi d'autres, peut-être moins consommatrice de données, pour atteindre des objectifs de résilience territoriale.







**SMART CITY INSTITUTE**

# LE SMART CITY INSTITUTE

Le Smart City Institute est un institut académique dédié à la thématique des territoires durables et intelligents. Il repose sur un partenariat original entre une Université (ULiège) et son École de Gestion (HEC Liège), des entreprises et la Wallonie dans le cadre du Plan Marshall 4.0 et de Digital Wallonia.

Cet institut académique se compose :

- De professeurs, chercheurs et chargés de projet universitaires ;
- De partenaires:
  - La Wallonie supporte activement l'institut dans le cadre de son programme Smart Région, partie intégrante de sa stratégie Digital Wallonia ;
  - L'institut est une des parties prenantes du projet Wal-e-Cities/REACT (financement européen FEDER) qui vise à soutenir le développement d'initiatives Smart City sur le territoire wallon ;
  - Des entreprises, qui s'engagent aux côtés des villes, des centres de recherche et des start-ups technologiques pour développer des solutions innovantes répondant aux besoins des générations futures ;
  - L'institut participe au projet BOLSTER (financement Horizon Europe), qui se concentre sur la transition juste et sur la manière d'inclure les communautés marginalisées dans ce processus.
- D'experts (en technologie, immobilier, infrastructures, services financiers, énergie, gestion de projet,...) dans le développement des territoires durables et intelligents.

Le Smart City Institute aborde la thématique des territoires durables et intelligents sous un angle managérial (et pas uniquement technique et technologique). Par ailleurs, ses activités s'articulent autour de trois piliers complémentaires : la recherche, l'enseignement et le soutien à l'innovation. Ces derniers sont soutenus par des activités transversales de sensibilisation.

De façon concrète, le Smart City Institute :

- Publie des articles scientifiques ainsi que des rapports de recherche sur la thématique des territoires durables et intelligents ;
- Étudie la dynamique Smart City en Belgique et en Wallonie ainsi que son évolution au travers de baromètres ;
- Développe des outils didactiques afin de motiver les communes (belges) à prendre part à la dynamique Smart

City. Parmi ces outils : une collection de Guides Pratiques et de Carnets, des modèles ou encore des capsules vidéo didactiques pour les guider pas à pas dans leurs démarches ;

- Organise des activités de formation (ex. ateliers thématiques, formation continue) qui abordent les enjeux managériaux essentiels de la Smart City ;
- Organise un évènement annuel lors duquel des académiques et des praticiens sont amenés à discuter et à échanger au sujet de la transition durable et intelligente des territoires ;
- Organise un séminaire à destination des étudiants de 2<sup>e</sup> Master à HEC Liège, en «Sustainability and Smart Territories» ;
- Soutient l'innovation dans le domaine des Smart Cities.

Concernant sa portée géographique, en tant que référent académique, le Smart City Institute contribue activement à la dynamique Smart City et Smart Région en Wallonie, mais il mène aussi régulièrement des projets à vocations nationale et internationale.



official partner | digital wallonia .be



BOLSTER







- <sup>1</sup> Assaf, H. (2010). A Framework for Modeling Mass Disasters. *Natural Hazards Review*. 12. 10.1061
- <sup>2</sup> Costa, D., Peixoto, J. P., Jesus, T., Portugal, P., Vasques, F., Rangel, E. & Peixoto, M.. (2022). A Survey of Emergencies Management Systems in Smart Cities. *IEEE Access*. 10. 1-1. 10.1109/ACCESS.2022.3180033.
- <sup>3</sup> OECD (2015), *The Changing Face of Strategic Crisis Management*, OECD Reviews of Risk Management Policies, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264249127-en>
- <sup>4</sup> Dogan, Ö., Sahin, O. & Karaarslan, E.. (2021). Digital Twin Based Disaster Management System Proposal: DT-DMS.
- <sup>5</sup> Caprari, G., Castelli, G., Montuori, M., Camardelli, M. & Malvezzi, R. (2022). Digital Twin for Urban Planning in the Green Deal Era: A State of the Art and Future Perspectives. *Sustainability*. 14. 14893. 10.3390/su142214893.
- <sup>6</sup> Jiao, J., Hardesty Lewis, R., Seong, K., Farahi, A., Navratil, P., Casebeer, N. & Niyogi, Dev. (2023). Fire and Smoke Digital Twin -- A computational framework for modeling fire incident outcomes.
- <sup>7</sup> Papyshv, G. & Yarime, M. (2021). Exploring city digital twins as policy tools: A task-based approach to generating synthetic data on urban mobility. *Data & Policy*.
- <sup>8</sup> Shahat, E., Hyun, C. & Yeom, C.(2021). City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. *Sustainability*. 13. 3386. 10.3390/su13063386.
- <sup>9</sup> Fan, C., Zhang, C., Yahja, A. & Mostafavi, A. (2021). Disaster City Digital Twin: A vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management. *International Journal of Information Management*. 102049. 10.1016/j.ijinfomgt.2019.102049.
- <sup>10</sup> Charitonidou, M. (2022). Urban scale digital twins in data-driven society: Challenging digital universalism in urban planning decision-making. *International Journal of Architectural Computing*.
- <sup>11</sup> Crisis, Cambridge definition (n.d). Disponible via <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/learner-english/crisis>
- <sup>12</sup> Xue, L., Zhang, Q. & Zhong, K.(2022). Crisis management in China: challenges of the transition. Chapter 2.
- <sup>13</sup> United Nation (n.d.). Disaster. Disponible via <https://www.undrr.org/terminology/disaster>
- <sup>14</sup> Sun, H., Wang, C., & Ahmad, B. I. (2017). *From Internet of Things to Smart Cities: Enabling Technologies*. Chapman and Hall/CRC.
- <sup>15</sup> Below, R., Wirtz, A., Guha-Sapir, D. (2009). Disaster Category Classification and Peril Terminology for Operational Purposes.
- <sup>16</sup> Directorate General of Geographic Information Systems of the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change of the Republic of Turkey. (2020). *Disaster and Emergency Management in Smart Cities: Smart Cities Capacity Building and Guidance Project*. Disponible via: [www.akillisehirler.gov.tr](http://www.akillisehirler.gov.tr)
- <sup>17</sup> Elvas, L., Mataloto, B., Martins, A. & Ferreira, J. (2021). Disaster Management in Smart Cities. *Smart Cities*. 4. 819-839. 10.3390/smartcities4020042.
- <sup>18</sup> Shearer, A.W. (2021). *Smart Cities and Resilience*. Disponible via <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/STO-EN-SAS-149/EN-SAS-149-10.pdf>
- <sup>19</sup> Riguelle, S. (2023, Juillet 13). Communication personnelle (échanges email)
- <sup>20</sup> Gouvernement de Wallonie du 8 juin 2023. (2023). Disponible via <https://www.wallonie.be/fr/acteurs-et-institutions/wallonie/gouvernement-de-wallonie/communiqués-presse/2023-06-08>
- <sup>21</sup> Nguyen, C. T.L., Bleus, H., Van Bockhaven, J., & Crutzen, N. (2017). *Smart City : Le Guide Pratique*. Liège, Belgique : Smart City Institute. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/214406>
- <sup>22</sup> Wolf, K., Dawson, R., Mills, J., Blythe, P. & Morley, J. (2022). Towards a digital twin for supporting multi-agency incident management in a smart city. *Scientific Reports*. 12. 10.1038/s41598-022-20178-8.
- <sup>23</sup> Rosen, R., Wichert, G., Lo, G. & Bettenhausen, K.. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*. 48. 567-572. 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
- <sup>24</sup> Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E., Qiao, Y., Murray, N. & Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*. 4. 36. 10.3390/asi4020036.
- <sup>25</sup> Guo, J. & Lyu, Z. (2022). Application of Digital Twins in multiple fields. *Multimedia Tools and Applications*. 81. 10.1007/s11042-022-12536-5.
- <sup>26</sup> Grieves, M. & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In Kahlen F.J., Shannon, F. & Alves, A.. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: new findings and approaches*.
- <sup>27</sup> Deren, L. & Wenbo, Y. & Shao, Z.. (2021). Smart city based on digital twins. *Computational Urban Science*. 1. 4. 10.1007/s43762-021-00005-y.
- <sup>28</sup> Shahzad, M., Shafiq, M., Douglas, D. & Kassem, M. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. *Buildings*. 12. 120. 10.3390/buildings12020120.
- <sup>29</sup> Andrade, A.. (2022). The 3 Levels of the Digital Twin Technology – 2023. Disponible via <https://vidyatec.com/blog/the-3-levels-of-the-digital-twin-technology-2/>
- <sup>30</sup> Shahat,E., Hyun,C.T., Yeom, C., (2021). City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. *Sustainability*, 13, 3386. <https://doi.org/10.3390/su13063386>





<sup>31</sup> Masoumi, H., Shirowzhan, S., Eskandarpour, P. & Pettit, C.J. (2023) City Digital Twins: their maturity level and differentiation from 3D city models, *Big Earth Data*, 7:1, 1-36, DOI: 10.1080/20964471.2022.2160156

<sup>32</sup> Corrado, C.R., DeLong, S.M., Holt, E.G., Hua, E.Y.; Tolk, A. Combining Green Metrics and Digital Twins for Sustainability Planning and Governance of Smart Buildings and Cities. *Sustainability* 2022, 14, 12988. <https://doi.org/10.3390/su142012988>

<sup>33</sup> Nochta, T.; Wan, L.; Schooling, J.M.; Parlikad, A.K. (2020). A Socio-Technical Perspective on Urban Analytics: The Case of City-Scale Digital Twins. *J. Urban Technol.* 2020, 28, 263–287.

<sup>34</sup> White, G., & Zink, A., Codecà, L. & Clarke, S.. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*. 110. 10.1016/j.cities.2020.103064.

<sup>35</sup> McCausland, T. (2022) Digital Twins, *Research-Technology Management*, 65:1, 69-71, DOI: 10.1080/08956308.2022.1999637

<sup>36</sup> Lei, B. Janssen, P., Stoter, J. & Biljecki, F.. (2023). Challenges of urban digital twins: A systematic review and a Delphi expert survey. *Automation in Construction*. 147. 104716. 10.1016/j.autcon.2022.104716.

<sup>37</sup> Evans, S., Savian, C., Burns, A., & Cooper, C. (2019). Digital twins for the built environment: An introduction to the opportunities, benefits, challenges and risks. *Built Environmental News*. Accessible via <https://www.theiet.org/media/8762/digital-twins-for-the-built-environment.pdf>

<sup>38</sup> Tonka, J. & Schyns, M. (2021). The Digital twin concept: a definition attempt. Disponible via: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/265031>

<sup>39</sup> Marcucci, E., Gatta, V., Le Pira, M., Hansson, L. & Bråthen, S. (2020). Digital Twins: A Critical Discussion on Their Potential for Supporting Policy-Making and Planning in Urban Logistics. *Sustainability*, 12, 10623. <https://doi.org/10.3390/su122410623>

<sup>40</sup> Langenheim, N., Sabri, S., Chen, Y. Kesmanis, A., Felson, A., Mueller, A., Rajabifard, A. & Zhang, Y.. (2022). Adapting A Digital Twin To Enable Real-Time Water Sensitive Urban Design Decision-Making. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLVIII-4/W4-2022. 95-100. 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-95-2022.

<sup>41</sup> Zhihong, T., Shirui, P. & Xianrong, Z. (2020). Research on the Construction of Smart City Emergency Management System Under Digital Twin Technology: Taking the Practice of New Coronary Pneumonia Joint Prevention and Control as an Example.

<sup>42</sup> Dignan, J. (2020). Smart cities in the time of climate change and Covid-19 need digital twins. *IET Smart Cities*. 2. 109-110. 10.1049/iet-smc.2020.0071.

<sup>43</sup> Ford, D & Wolf, C. (2020). Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management. *Journal of Management in Engineering*. 36. 04020027. 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000779.



- <sup>44</sup> Ham, Y. & Kim, J.. (2020). Participatory Sensing and Digital Twin City: Updating Virtual City Models for Enhanced Risk-Informed Decision-Making. *Journal of Management in Engineering*. 36. 04020005. 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000748.
- <sup>45</sup> Yu, D., He, Z. (2022). Digital twin-driven intelligence disaster prevention and mitigation for infrastructure: advances, challenges, and opportunities.
- <sup>46</sup> Shahzad, M., Shafiq, M., Douglas, D. & Kassem, M.. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. *Buildings*.
- <sup>47</sup> Bacton Digital Beach Twin. (n.d). Disponible via <https://digitaltwinhub.co.uk/case-studies/bacton-digital-beach-twin-r52/>
- <sup>48</sup> Grieves, M. (2006). *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*. New York, McGraw-Hill.
- <sup>49</sup> Meet Luxembourg digital twin. (2021). Disponible via <https://www.researchluxembourg.org/en/meet-luxembourg-digital-twin/>
- <sup>50</sup> Le digital twin dopé par la première SORA. (2021). Disponible via <https://paperjam.lu/article/digital-twin-luxembourg-dope-p>
- <sup>51</sup> A nation-wide digital twin. (2021). <https://www.tradeandinvest.lu/news/a-nation-wide-digital-twin/>
- <sup>52</sup> Gemini Call Feature Focus. Ruben Borsje, Royal HaskoningDHV. (Aout 2022). Disponible via <https://www.youtube.com/watch?v=sHURyk6gaGU>
- <sup>53</sup> Bacton Digital Beach Twin. (n.d).Disponible via: <https://digitaltwinhub.co.uk/case-studies/bacton-digital-beach-twin-r52/>
- <sup>54</sup> Simulating Disaster with a Digital Twin: Kumamoto City. (2021). Disponible via <https://oneconcerninc.medium.com/simulating-disaster-with-a-digital-twin-kumamoto-city-2bc6de6d4345>
- <sup>55</sup> Increasing Resilience in Japan with One Concern Ready. (2022). <https://oneconcern.com/en/news/increasing-resilience-in-japan-with-one-concern-ready/>
- <sup>56</sup> Espinel, R. (Siradel) (2023, septembre 7) communication personnelle (échanges email)
- <sup>57</sup> Flood early warning in a 3D Digital Twin. (2022). Disponible via <https://nelen-schuurmans.nl/en/case/flood-early-warning-in-a-3d-digital-twin/>
- <sup>58</sup> Flood early warning with 3Di in a 3D Digital Twin. (n.d.). Disponible via <https://3diwatermanagement.com/case/flood-early-warning-with-3di-in-a-3d-digital-twin/>
- <sup>59</sup> Jiao, J., Hardesty Lewis, R., Seong, K., Farahi, A., Navratil, P., Casebeer, N. & Niyogi, Dev. (2023). Fire and Smoke Digital Twin -- A computational framework for modeling fire incident outcomes. Poster. Disponible via: <https://bridgingbarriers.utexas.edu/sites/default/files/documents/good-systems-poster-fire-dt.pdf>
- <sup>60</sup> UT Austin (n.d.). Fire Incident Map. Disponible via <https://smartcity.tacc.utexas.edu/FireIncident/FireIncidentMap.html>
- <sup>61</sup> Open Topography. (n.d). Disponible via <https://opentopography.org/>
- <sup>62</sup> Open Street Map. (n.d). Disponible via <https://www.openstreetmap.org/>
- <sup>63</sup> OpenCities Planner User Webinar. (June 2023). Disponible via <https://www.youtube.com/watch?v=thP6tHpGw0k>
- <sup>64</sup> How a Philippines city uses digital twins for disaster recovery. (2021). Disponible via <https://govinsider.asia/intl-en/article/cauayan-graffiquo-how-a-philippines-city-uses-digital-twins-for-disaster-recovery>
- <sup>65</sup> Cauayan City implements 3D digital map for disaster responsiveness. (2021). Disponible via <https://www.bworldonline.com/technology/2021/04/22/362800/cauayan-city-implements-3d-digital-map-for-disaster-responsiveness/#:~:text=Cauayan%20City%20is%20implementing%20Graffiquo,the%20infrastructure%20and%20building%20sectors>
- <sup>66</sup> Philippines Typhoon Warning. (n.d.). Disponible via <https://graffiquo.com/2022/08/02/philippines-typhoon-warning/>
- <sup>67</sup> French team to use virtual twin to rebuild Ukraine's Chernihiv (2020). Disponible via <https://www.globalconstructionreview.com/french-team-to-use-virtual-twin-to-rebuild-ukraines-chernihiv/>
- <sup>68</sup> Rebuilding Ukraine's cities using virtual twins. (2023). <https://blog.3ds.com/industries/cities-public-services/rebuilding-ukraines-cities-using-virtual-twins/>



## PHOTOS - SOURCES :

Couverture : Pok Rie sur Pexels

Page 4 : Adam Wilson sur Unsplash

Pages 6-7 : Jens Aber sur Unsplash

Page 8 : Isaac Quesada sur Unsplash

Page 11 : Scott Graham sur Unsplash

Page 13 : Vidar Nordli Mathisen sur Unsplash

Pages 16-17 : Marc Olivier Jodoin sur Unsplash

Page 23 : Kelly Sikkema sur Unsplash

Page 24 : Jonathan Kemper sur Unsplash

Page 27 : Stephen Dawson sur Unsplash

Page 37 : Nikolas Noonan sur Unsplash

Page 39 : Markus Spiske sur Unsplash

Page 42 : Shefali Lincoln sur Unsplash



## Smart City Institute

Rue Louvrex, 14  
4000 Liège

+32 4 232 73 55

sci@uliege.be

www.smartcityinstitute.be



Publication gratuite - Ne peut être vendue ou utilisée à des fins commerciales.

Merci à tous les acteurs qui ont nourri la réflexion de ce rapport. Remerciements particuliers à Laetitia Ory (SPW Economie Emploi Recherche), Simon Riguelle (Centre Régional de Crise), Michael Schyns (HEC ULiège), Roland Billen (GEOMATICS ULiège), Sisi Zlatanova (UNSW Sydney), Jufeng Jiao (UT Austin), et German Castignan (LIST).

