BSGLg, 85, 2025, 1-5
DOI: 10.25518/0770-7576.7643

JUMEAUX NUMÉRIQUES URBAINS ET TERRITORIAUX : CADRES CONCEPTUELS, TRAJECTOIRES ET ENJEUX

Roland BILLEN, Jean-Paul KASPRZYK

I. DÉFINITIONS, ÉMERGENCE ET LIMITES DU CONCEPT

Ce numéro thématique du Bulletin de la Société géographique de Liège est consacré aux jumeaux numériques urbains et territoriaux. Il vise à en préciser les cadres conceptuels, à analyser leur inscription dans les trajectoires de la géographie et de la géomatique, et à identifier les principaux enjeux scientifiques, techniques et organisationnels associés à leur développement. Les contributions réunies dans ce numéro proposent, à partir de cas et d'analyses complémentaires, un éclairage structuré sur ces différentes dimensions.

Les jumeaux numériques territoriaux et urbains peuvent être définis, dans une acception générale, comme des systèmes numériques visant à construire et faire évoluer une représentation opérationnelle de territoires réels, en articulant des données géographiques multi-sources statiques et dynamiques, des modèles et des capacités d'analyse ou de simulation, et en établissant des relations, plus ou moins étroites, entre ces territoires et leurs représentations numériques. Ils visent ainsi à constituer des environnements numériques capables de structurer, d'actualiser et de mobiliser des informations spatiales complexes dans des contextes opérationnels variés.

Cette définition doit être mise en perspective avec l'origine du concept de jumeau numérique dans le domaine industriel. Dans ce contexte, les jumeaux numériques reposent sur des systèmes fortement maîtrisés, au sein desquels les chaînes de production sont instrumentées, observées de manière continue et couplées étroitement à leur représentation numérique, permettant des boucles de rétroaction et des capacités prédictives avancées. La transposition de ce paradigme aux contextes urbains et territoriaux se heurte à des limites importantes.

Les villes et les territoires constituent en effet des systèmes ouverts, complexes et évolutifs, au sein desquels interagissent une multiplicité de composantes hétérogènes, difficilement observables de manière exhaustive et continue (Batty, 2013). Dans ce cadre, l'idée d'une correspondance complète, synchronisée et opérationnelle entre le système réel et sa représentation numérique demeure largement hors d'atteinte.

Néanmoins, ces limites n'ont pas freiné l'émergence et le développement de dispositifs se revendiquant du concept de jumeau numérique. Cette dynamique s'inscrit dans un contexte de transformations technologiques majeures : développement des techniques d'acquisition de données géospatiales, montée en puissance des infrastructures de données, généralisation des capacités de traitement et de croisement de volumes croissants d'information, ainsi qu'avancées en intelligence artificielle, en internet des objets et robotique. Ces évolutions permettent d'envisager des représentations de plus en plus dynamiques, interconnectées et opérationnelles des systèmes territoriaux, même si celles-ci restent très variables dans leurs principes, leurs finalités et leurs niveaux d'intégration.

Dans cette perspective, il apparaît plus pertinent de considérer les jumeaux numériques urbains et territoriaux comme des systèmes évolutifs, caractérisés par des degrés de maturité variables. Certains dispositifs s'approchent d'une intégration avancée, combinant actualisation dynamique, interconnexion de sources multiples et capacités de simulation, tandis que d'autres relèvent de configurations plus partielles, centrées sur la visualisation, l'agrégation de données ou des usages spécifiques. Cette diversité reflète un continuum de développement, au sein duquel les dispositifs se transforment progressivement.

Dès lors, au-delà des discussions conceptuelles ou des nuances liées aux niveaux de maturité, le terme de jumeau numérique s'est largement imposé dans les pratiques comme dans les discours. La multiplication de projets, notamment à l'échelle

européenne, mobilisant explicitement cette notion pour des villes, des territoires ou des infrastructures, en témoigne. Le jumeau numérique constitue aujourd'hui un cadre de référence structurant pour penser et organiser la connaissance, la représentation et la gestion des territoires, même si les réalités techniques et organisationnelles qu'il recouvre restent profondément hétérogènes.

II. POSITIONNEMENT DISCIPLINAIRE EN GÉOGRAPHIE ET GÉOMATIQUE

Du point de vue de la géographie et de la géomatique, les jumeaux numériques urbains et territoriaux ne constituent pas une rupture radicale, mais s'inscrivent dans une continuité de problématiques et de développements liés à la représentation, à la structuration et à l'analyse des territoires. Ils prolongent des approches déjà bien établies, tout en modifiant la dynamique et les modalités d'intégration.

Les fondements techniques et conceptuels des jumeaux numériques reposent largement sur des acquis développés en géomatique, notamment en matière d'acquisition multi-source de données géospatiales, de modélisation de l'information géographique, de gestion de l'hétérogénéité des données et d'interopérabilité, ainsi que dans le développement de systèmes d'information géographique. Ils s'inscrivent également dans des apports issus de la géographie, en particulier dans l'analyse des systèmes territoriaux, la prise en compte des relations spatiales entre objets et processus, l'articulation des échelles, ainsi que dans la compréhension des dynamiques territoriales et des formes de territorialité.

Les jumeaux numériques peuvent ainsi être compris comme une extension de ces cadres, intégrant plus explicitement la dimension tridimensionnelle, la temporalité et le couplage avec des modèles de simulation, en lien avec l'évolution des standards de modélisation urbaine (Kolbe, 2019). Les difficultés rencontrées dans leur mise en œuvre, qualité et disponibilité des données, structuration, interopérabilité, gouvernance, prolongent des enjeux déjà bien identifiés dans le développement des infrastructures de données géospatiales. En ce sens, les jumeaux numériques apparaissent moins comme une rupture que comme une intensification de problématiques existantes, dans des contextes plus exigeants.

Cette filiation apparaît de manière particulièrement nette lorsque l'on considère l'évolution des travaux menés au sein de l'unité de géomatique de l'Université de Liège, et plus spécifiquement au sein du laboratoire GeoScITY. Les recherches se sont d'abord concentrées sur l'acquisition de données géospatiales, le traitement de nuages de points et la reconstruction d'objets tridimensionnels. Elles ont ensuite intégré des questions de structuration sémantique, d'enrichissement des modèles et d'interopérabilité, notamment à travers l'usage et l'évolution de standards. Plus récemment, ces travaux ont évolué vers des problématiques directement liées aux jumeaux numériques, avec l'intégration de données en temps réel (internet des objets), le couplage avec des modèles de simulation et la gestion de flux d'information hétérogènes. Cette trajectoire illustre un déplacement progressif, depuis la production et la structuration de données géospatiales vers la conception de systèmes intégrés capables de supporter des usages analytiques et décisionnels plus complexes.

Cette montée en complexité s'accompagne d'une transformation importante des conditions de production et d'usage de ces systèmes. Les jumeaux numériques impliquent l'intégration de données de nature variée, souvent dynamiques, ainsi que le recours à des modèles et à des outils issus de champs disciplinaires multiples. Leur développement dépasse ainsi le seul cadre de la géomatique et requiert des approches fondamentalement interdisciplinaires.

Dans ce contexte, les évolutions technologiques associées au développement des jumeaux numériques, ainsi que le renforcement des approches interdisciplinaires qu'elles impliquent, ouvrent des perspectives nouvelles pour la géographie et la géomatique. La mise à disposition d'outils et d'infrastructures permettant d'intégrer des données en temps réel, d'interconnecter des modèles issus de domaines variés ou encore de déployer des chaînes d'analyse complexes dans des environnements opérationnels élargit significativement le champ des investigations possibles.

Ces dispositifs contribuent ainsi à abaisser certaines barrières techniques et organisationnelles et offrent la possibilité de mobiliser, dans des contextes d'étude spécifiques, des approches jusqu'alors difficiles à intégrer. Ils favorisent en particulier

l'articulation entre données géospatiales, modèles thématiques et dynamiques temporelles, renforçant la capacité des géographes à explorer, analyser et représenter des phénomènes territoriaux complexes. Dans ce cadre, la géographie et la géomatique apparaissent non seulement comme des disciplines mobilisées, mais comme des composantes structurantes dans la compréhension et la mise en œuvre de ces systèmes.

Dans le même temps, ces évolutions impliquent un approfondissement des démarches interdisciplinaires. Le développement des jumeaux numériques repose en effet sur l'intégration de compétences, de modèles et de cadres d'analyse issus de champs disciplinaires multiples, ce qui suppose des formes de collaboration plus étroites et plus structurées. Cette évolution constitue moins une option qu'une condition de développement de ces dispositifs.

Elle s'accompagne néanmoins d'un point d'attention. Dans des environnements où les chaînes de production et les architectures techniques tendent à se structurer rapidement, il existe un risque que les dimensions géographiques et géospatiales soient considérées comme un simple socle technique mobilisable en amont, et que les contributions des géographes et des géomaticiens soient partiellement marginalisées. Dans ce contexte, l'enjeu ne réside pas seulement dans la participation à des démarches interdisciplinaires, mais dans la capacité à y affirmer un rôle structurant, en lien avec la compréhension des systèmes territoriaux, des relations spatiales et des dynamiques multi-échelles.

III. ENJEUX ET PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT

L'évolution décrite précédemment — qui conduit d'une maîtrise des données et des modèles vers des systèmes intégrés, dynamiques et multi-acteurs — s'accompagne d'une montée en complexité, d'une intégration croissante des données et des modèles, et d'une ouverture à des approches interdisciplinaires. Elle met en lumière un ensemble de tensions structurantes qui dépassent largement le seul registre technique. Les jumeaux numériques urbains et territoriaux apparaissent ainsi comme des objets en construction, à l'interface de problématiques scientifiques, organisationnelles et sociétales étroitement imbriquées.

Un premier niveau d'enjeux concerne les cadres de gouvernance, de production des savoirs et de confiance associés à ces dispositifs. Les jumeaux numériques ne sont pas de simples instruments techniques : ils participent à une redéfinition des modalités de production, de validation et de mobilisation des connaissances territoriales. Les questions de qualité de l'information, de structuration des métadonnées, de pertinence des données ou encore de transparence des processus deviennent dès lors centrales. Elles s'accompagnent d'interrogations plus larges sur les rapports de pouvoir, les formes de régulation, et les conditions de légitimation des décisions appuyées sur ces dispositifs. Les jumeaux numériques contribuent ainsi, au moins potentiellement, à recomposer les relations entre acteurs publics, opérateurs techniques, producteurs de données et usagers des territoires.

Un deuxième niveau d'enjeux porte sur la structuration technique et la mise en œuvre opérationnelle des jumeaux numériques. Il concerne à la fois la conception des architectures modulaires, interopérables et évolutives et la production du socle géospatial sur lequel reposent ces systèmes. Les avancées en acquisition de données, en modélisation tridimensionnelle et en intelligence artificielle permettent d'envisager des représentations plus riches et plus dynamiques du territoire. Elles s'accompagnent néanmoins de défis persistants en matière de qualité, d'incertitude, de reproductibilité et de mise à jour, tout en posant la question de l'intégration progressive de sources de données et de modèles hétérogènes dans des systèmes cohérents. À ce niveau, les difficultés ne relèvent pas seulement de la performance technique, mais aussi de la capacité à stabiliser des chaînes de production, des cadres d'échange et des dispositifs de maintenance suffisamment robustes pour soutenir des usages dans la durée.

Un troisième niveau d'enjeux concerne l'intégration de dynamiques et l'élargissement du périmètre des jumeaux numériques. Le passage de représentations statiques à des systèmes capables d'intégrer des flux, des temporalités multiples et des interactions complexes constitue un changement majeur. Il s'accompagne d'une ouverture vers des dimensions moins directement ou facilement mesurables, telles que les usages ou encore les perceptions et expériences des individus. Ces évolutions posent des défis importants en termes de formalisation,

de structuration et d'articulation avec les modèles existants, tout en invitant à repenser le rôle des jumeaux numériques dans la compréhension des territoires. Elles déplacent aussi les frontières de ce qui peut être représenté, mis en relation et rendu opératoire dans de tels systèmes.

C'est dans ce cadre général que s'inscrivent les contributions réunies dans ce numéro spécial. Sans prétendre épuiser la diversité des approches possibles, elles proposent un parcours qui conduit des fondements critiques et des conditions de confiance vers les questions d'architecture et de production, avant de s'ouvrir à des formes plus dynamiques et intégratives de jumeaux numériques.

Les deux premières contributions se situent clairement dans le registre des conditions de possibilité, de légitimation et de gouvernance de ces dispositifs. L'article de **Macq** propose une analyse socio-technique des jumeaux numériques urbains à travers le prisme du constitutionnalisme numérique. En mettant en évidence les enjeux de pouvoir, de gouvernance et de production des savoirs associés à ces dispositifs, cette contribution montre que les jumeaux numériques ne se limitent pas à améliorer les capacités de représentation ou de gestion du territoire, mais participent aussi à une reconfiguration des cadres de décision et des formes de régulation. Cette approche est prolongée par l'article de **Bucher et Chachoua**, qui interroge les conditions de construction de jumeaux numériques territoriaux dignes de confiance. En mettant l'accent sur la qualité de l'information, le rôle des métadonnées et la notion de pertinence, les auteurs soulignent les conditions nécessaires à la production de représentations territoriales effectivement mobilisables. Ensemble, ces deux contributions rappellent que la question du jumeau numérique ne peut être réduite à celle de ses performances techniques : elle engage aussi des choix de cadrage, des critères de validité et des formes de responsabilité.

Les contributions suivantes se situent davantage sur le plan des architectures et de la production des systèmes. L'article de **Jeddoub, Kasprzyk et Billen** met en évidence la nécessité de concevoir des architectures flexibles, modulaires et interopérables, capables d'évoluer dans des environnements numériques distribués. Il insiste sur la manière dont les principes d'organisation technique conditionnent, en amont, la capacité des jumeaux numériques à intégrer des composants multiples, à évoluer dans le temps et à s'inscrire dans des écosystèmes plus larges. Dans cette continuité, l'article de **Kharroubi, Ballouch, Yarroudh, Jeddoub et Billen** se concentre sur le rôle central du modèle 3D sémantique dans les jumeaux numériques urbains, en montrant comment des chaînes automatisées de production et de mise à jour fondées sur des données d'observation permettent aujourd'hui de structurer, enrichir et maintenir ces modèles. Ces deux contributions mettent en évidence un point essentiel : la robustesse et l'évolutivité des jumeaux numériques reposent non seulement sur la richesse des données ou la sophistication des outils, mais aussi sur la capacité à concevoir des infrastructures cohérentes, maintenables et interopérables.

Enfin, les deux dernières contributions illustrent l'ouverture des jumeaux numériques vers des systèmes dynamiques et élargis. L'article de **Nath, Marchand, Mörch et Canter** aborde l'intégration de données de mobilité en temps réel et met en évidence les défis liés à la gestion de flux, à la synchronisation de sources hétérogènes et à la représentation de dynamiques temporelles complexes. Il souligne combien l'intégration du temps réel transforme la nature même des systèmes considérés, en les éloignant d'une logique principalement descriptive pour les inscrire dans des régimes d'actualisation continue et d'interaction avec des données mouvantes. L'article de **Tetou, Jeddoub, Hajji et Billen**, quant à lui, propose d'intégrer la perception humaine dans les jumeaux numériques urbains, ouvrant ainsi la voie à une prise en compte de dimensions sensibles et subjectives dans la modélisation territoriale. Cette contribution élargit le champ des objets susceptibles d'être intégrés dans ces dispositifs et invite à réfléchir aux conditions dans lesquelles des dimensions qualitatives, situées et parfois difficiles à formaliser peuvent néanmoins trouver place dans des environnements numériques orientés vers l'analyse et l'action.

Ainsi regroupées, les contributions de ce numéro ne forment pas une simple juxtaposition d'études de cas ou de développements spécialisés. Elles donnent à voir plusieurs lignes de tension qui traversent aujourd'hui le champ des jumeaux numériques urbains et territoriaux : entre critique et opérationnalisation, entre structuration technique et gouvernance, entre stabilisation des socles et ouverture à de nouvelles dimensions du territoire.

Elles montrent aussi que les jumeaux numériques ne se définissent pas seulement par un niveau de sophistication technologique, mais par la manière dont ils articulent des données, des modèles, des acteurs, des cadres d'interprétation et des finalités d'usage.

Dans leur ensemble, ces contributions mettent ainsi en évidence une tension structurante entre, d'une part, une ambition intégrative — visant à articuler des dimensions toujours plus nombreuses du territoire — et, d'autre part, les limites techniques, organisationnelles et épistémologiques qui en conditionnent la mise en œuvre. C'est précisément dans cet écart, entre promesse d'intégration et conditions effectives de réalisation, que se joue aujourd'hui une part essentielle de la réflexion sur les jumeaux numériques urbains et territoriaux.

BIBLIOGRAPHIE

Batty, M. (2013). The New Science of Cities. Cambridge, MA: MIT Press.

Kitchin, R. (2014). The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infrastructures and Their Consequences. London: Sage.

Kolbe, T. H. (2019). CityGML 3.0: New functionalities for the next generation of 3D city models.