

Repenser la rétroconception patrimoniale de la numérisation à la modélisation

Niveaux cognitifs, cube de données et jumeau numérique

Zaineb NAIFER¹, Zayneb ABIDI², Damien CLAEYS³

1. LR GADEV/ARMC/ENAU/UCAR, Tunisie + tsa-lab/LAB/UCLouvain, Belgique, zaineb.naifer@uclouvain.be.

2. LR GADEV/ARMC/ENAU/UCAR, Tunisie + tsa-lab/LAB/UCLouvain, Belgique, zayneb.abidi@uclouvain.be.

3. tsa-lab/LAB/UCLouvain, Belgique, damien.claeys@uclouvain.be.

Résumé. En complément des savoir-faire traditionnels, l'utilisation d'outils numériques et d'approches transdisciplinaires permet le développement de méthodes de rétroconception des objets patrimoniaux. Trois phases principales sont identifiées : (1) la collecte des données à partir de la numérisation d'un objet, (2) le traitement et l'analyse des données collectées, (3) la modélisation tridimensionnelle d'une copie de cet objet. Deux techniques sont plus particulièrement explorées ici : le cube de données pour l'analyse des données et le jumeau numérique pour la modélisation 3D en vue de l'obtention d'une archive numérique durable. Cette démarche repose sur l'exploration des relations possibles entre cinq niveaux cognitifs fondamentaux (donnée, information, connaissance, intelligence, conscience) et l'intégration des données qualitatives de l'objet à rétroconcevoir.

Abstract. In addition to traditional know-how, the use of digital tools and transdisciplinary approaches enables the development of methods for reverse engineering heritage objects. Three main phases have been identified: (1) data collection through object scanning, (2) processing and analysis of the collected data, and (3) three-dimensional modeling to create a replica of the object. Two techniques are particularly explored in this context: the data cube for data analysis and the digital twin for 3D modeling to achieve a sustainable digital archive. This approach is based on exploring the possible relationships between five fundamental cognitive levels (data, information, knowledge, intelligence, consciousness) and integrating qualitative data of the object to be reverse engineered.

Keywords : reverse engineering, cognitive levels, digital twin, data cube

Mots clés : rétroconception, niveaux cognitifs, jumeau numérique, cube de données

1. Introduction

Dans l'histoire récente de la technique, les outils numériques ont transformé la société en digitalisant le réel et différentes phases peuvent retracer brièvement cette mutation (Noiret et Clavert 2013) : (1) dans les années 1950, l'informatique naissante a connu un développement remarquable par la création des méthodes quantitatives et statistiques

afin d'acquérir différents types de données ; (2) dès les années 1980, ce domaine se développe grâce à l'apparition quasi-quotidienne de nouvelles technologies de l'information et de la communication, et à la mise en place progressive du champ scientifique multidisciplinaire des nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives (NBIC) ; (3) au début des années 2000, la généralisation de l'usage d'Internet et de nouveaux outils de mise en réseau ont favorisé l'émergence d'un réseau mondialisé de communication et de partage des connaissances ; (4) aujourd'hui, la donnée de l'ère numérique est considérée, par analogie, comme le *pétrole* de l'ère industrielle, et la production exponentielle de données rend possible l'essor de l'intelligence artificielle.

La transition numérique a également impacté le domaine de la conception architecturale. Au-delà du pouvoir de séduction des premiers projets virtuels aux esthétiques molles des années 1990, les architectes utilisent les outils numériques pour concevoir des projets complexes et constructibles dans le réel. Si bien que certains projets d'architecture n'ont pu apparaître que parce que les outils numériques ont été utilisés de plus, une véritable *culture digitale* s'est développée dans ce domaine (Carpo 2013; Oxman et Oxman 2014). Plus précisément, les interventions de préservation, de restauration et de valorisation du patrimoine ont subi une évolution technique et un changement de paradigme. Les nouvelles méthodes numériques enrichissent les méthodes traditionnelles en visant un objectif commun : dégager un maximum de connaissances patrimoniales utiles, les analyser, les traiter et les stocker d'une façon sécurisée. L'objectif du présent article est de préciser, quels sont les moments où des données qualitatives peuvent être prises en compte, lorsqu'une copie digitale est créée, ou lorsqu'un processus de rétroconception architecturale génère un modèle numérique dynamique.

Dans ce but, après avoir défini la rétroconception, plusieurs sujets sont abordés : (1) la dynamique des cinq niveaux cognitifs ; (2) les outils d'acquisition de données patrimoniales ; (3) la localisation et la distinction entre les données quantitatives et qualitatives ; (4) les possibilités de relier ces données à l'aide d'une *data cube* ; (5) les opportunités d'automatisation des mises à jour de ce modèle à l'aide d'un *digital twin*.

2. La rétroconception à l'ère numérique

En tant que méthode issue de la rétro-ingénierie (Claeys et Naifer 2022), la rétroconception architecturale et digitale est l'analyse, la décomposition et la segmentation d'un édifice ou d'un objet architectural(e) à partir d'un modèle de connaissance existant et numérisé sous formes de sous-objets, en vue de révéler les principes et les concepts régissant ce dernier par la création d'un modèle sémantique qui sera associé au modèle géométrique (la maquette numérique), c'est-à-dire ajouter des données *qualitatives*, des informations et de nouvelles connaissances à la maquette 3D. Ce processus consiste à transformer toutes les données, contenus, objets, outils en un *code informatique* lisible par la machine dans le but d'améliorer ses performances qualitatives.

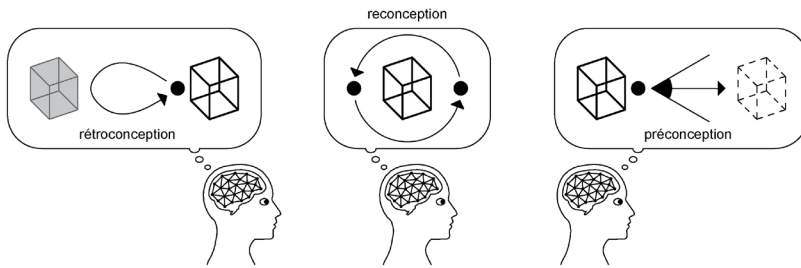


Figure 1. Processus de reconception et deux de ses sous-processus: la rétroconception et la préconception (Claeys et Naifer 2022)

3. Cinq niveaux cognitifs

Les concepts de *donnée*, d'*information* et de *connaissance* font l'objet de nombreuses définitions et distinctions parfois contradictoires. Sachant que de nombreuses analogies sont opérées entre intelligence naturelle et intelligence artificielle, ces trois concepts sont présents dans les modèles théoriques décrivant, à la fois, le système cognitif humain et le fonctionnement des outils numériques (Sowa 1984; Le Deuff 2014) et ils sont nécessaires pour appréhender tout « écosystème numérique, peuplé d'humains, de machines et d'outils interconnectés » (Roobaert et Claeys 2022):

- (1) la donnée [*data*] (D) représente une valeur sans être explicitement exprimées ; elle est un symbole ou une entité *brute*, présente sous diverses formes, dépourvue de signification, en dehors de son existence ; pouvant être exploitée ou non en fonction du contexte (Sowa 1984; Ackoff 1989) ;
- (2) l'information [*information*] (I) est une donnée brute sélectionnée pour sa pertinence à laquelle, après traitement (contextualisation), un sens (ou une interprétation) a été ajouté, ce qui donne une représentation claire et utile de la donnée dans le but de formuler une connaissance (Paquet 2006) ;
- (3) la connaissance [*knowledge*] (K) est « le fruit d'une réflexion sur les informations analysées ». Autrement dit, « la connaissance est une information comprise » et donc assimilée (Paquet 2006).

Du point de vue de la conception architecturale, ces trois concepts peuvent être mis en relation au sein « d'un processus dynamique de traitement de données et de croisement d'informations, initié à partir d'un état de connaissance préalable, orienté en fonction d'une finalité projective et, enfin, producteur de connaissance » (Claeys et Naifer 2022). Ce processus évolutif peut se développer en d'autres niveaux. Pour certains auteurs, les connaissances peuvent conduire à la *sagesse* (Ackoff 1989), bien que cette notion très floue repose sur la construction d'un modèle individualisé. Sachant que d'autres auteurs travaillent différentes mises en relations entre ces concepts (Rowley 2007; Aamodt et Nygård 1995; Gaillard et Mercer 2013), nous préférons nous appuyer sur les cinq niveaux de la « pyramide cognitive » proposée par Georges (2017) en pensant que ce processus peut aboutir à deux concepts :

- (4) l'intelligence [*Intelligence*] (IN) est la « faculté de prospecter et d'abstraire », ainsi que « la capacité de s'adapter et de comprendre » (Georges 2017) et d'accroître l'efficacité (Rowley 2007) ;

(5) la conscience [*consciousness*] (CS) représente la faculté de ressentir et de subjectiver, ainsi que la capacité de penser.

En synthétisant différentes manières de les représenter, les cinq niveaux cognitifs peuvent être figurés en mettant en évidence le processus complexe qui les lie dynamiquement en suivant un cheminement privilégié ($D \rightarrow I \rightarrow K \rightarrow IN \rightarrow CS$) (cf. figure 2) :

(1) $D \rightarrow I$: une structuration des données collectées lors de la numérisation de l'objet patrimonial permet de les rendre compréhensibles et accessibles sous la forme d'informations ;

(2) $I \rightarrow K$: une analyse et une contextualisation des informations spécifiques à l'objet patrimonial étudié et d'autres, plus générales (histoire, architecture, culture...) permet de les relier sous la forme de connaissances ;

(3) $K \rightarrow IN$: une adaptation et une flexibilité mentale permet l'adaptation des connaissances à des situations d'actualités ou à de nouveaux défis. Elle favorise le recours à la prédiction et l'anticipation pour prévoir les tendances, évaluer les risques et envisager des stratégies de préservation appropriées ;

(4) $IN \rightarrow CS$: un engagement éthique assure que les décisions soient alignées sur des valeurs morales et sociales. À ce stade, des connaissances et des décisions sont partagées pour une sensibilisation collective.

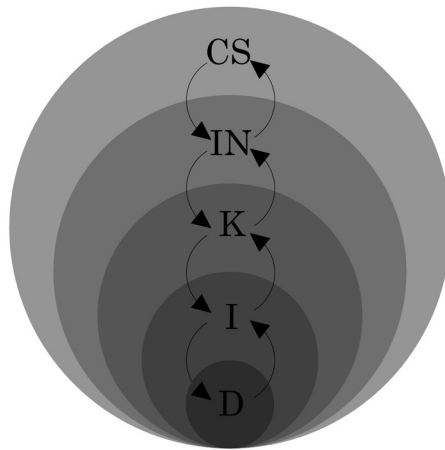


Figure 2. Le dynamisme des niveaux cognitifs

4. La numérisation du patrimoine architectural

La numérisation d'un objet patrimonial est réalisée en plusieurs étapes (cf. figure 3) :

(1) *collecte des données* : extraction de toutes les données nécessaires en associant de nouveaux outils d'acquisition des données tridimensionnelles et des techniques d'acquisition traditionnelles de reproduction graphique des éléments d'un édifice, objet ou site patrimonial existant via le mesurage *in-situ*. Par la suite, ces mesures sont transcrites sur un plan architectural accompagné de description, croquis ou bien des axonométries selon les besoins (Fuchs et Florenzo 2006) ;

(2) *traitement et analyse des données* afin de les transformer en données utiles en se basant sur des logiciels spécifiques et des structures d'organisation comme un *data cube* ;

(3) *modélisation et traduction en 3D* des données traitées dans la précédente étape sous la forme d'une modélisation tridimensionnelle, dont le résultat représente une copie du réel. Cette copie virtuelle correspond à un jumeau numérique paramétrique, le miroir d'un objet réel. Ces données brutes récoltées nécessitent une double conversion entre un format *lisible* par l'utilisateur et un format *compréhensible* pour la machine : un processus d'*encodage* et de *décodage*, dans le but d'améliorer ses performances qualitatives. Ce processus intervient dans toutes les étapes de la rétroconception architecturale d'un objet patrimonial.

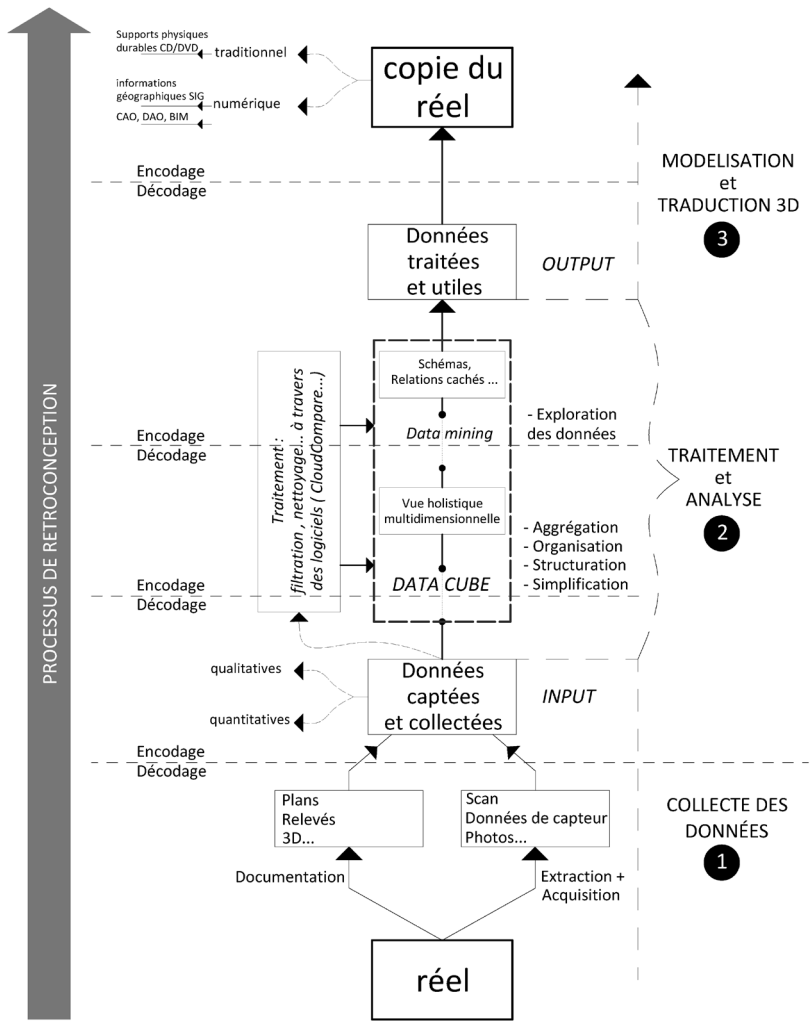


Figure 3. Processus complet de rétroconception pour modéliser un objet patrimonial

5. La collecte des données

Parallèlement à la digitalisation croissante du réel, la technologie des outils de mesure et d’acquisition de données se développe en facilitant l’acquisition de données à partir de tout objet réel, en assurant un rendu détaillé fidèle à cet objet par le passage du relevé traditionnel en 2D dessiné à la main ou aux instruments à un relevé 3D sous la forme d’une maquette numérique, en rendant accessible des outils de modification de ce modèle pour tous les intervenants.

Différentes classifications des outils d’acquisition des données existent dans le but de mieux comprendre l’utilité et l’intérêt de chacun (Jacquot 2014) : « À l’heure actuelle, le relevé du bâtiment ne se limite plus uniquement à prendre des mesures géométriques ponctuelles, mais vise à transcrire la réalité de manière extrêmement complète » (Dubois, Vanhellemont, et Bouw 2018).

Les dispositifs d’acquisitions peuvent d’abord être classés selon qu’ils sont utilisés *avec contact* ou *sans contact* avec l’objet patrimonial (cf. figure 4). S’ils sont utilisés sans contact, ils peuvent être classés selon deux sous catégories : (1) selon les différentes familles technologiques (palpage - triangulation - télémétrie) ; (2) selon les approches : (a) *actif* : donnée mesurée à partir d’un rayonnement émis par l’appareil où sa réflexion permet de déduire les coordonnées X, Y et Z ; (b) *passif* : mesuré à partir du rayonnement naturel émis par la lumière comme dans le cas de la photogrammétrie, le calcul des cordonnées se fait par l’étude des photographies et des algorithmes de corrélation.

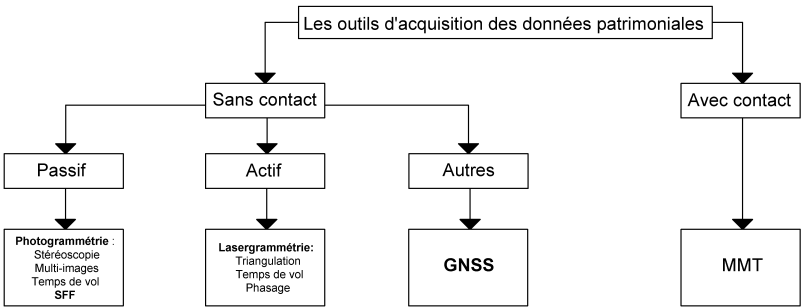


Figure 4. Les outils d’acquisition de données patrimoniales et leurs classifications

Sachant que la lasergrammétrie et la photogrammétrie sont les techniques d’acquisition les plus employées en rétroconception (Dubois, Vanhellemont, et Bouw 2018), différents types d’outils peuvent être définis par leurs classifications, leurs caractéristiques et la nature des données qu’ils permettent d’acquérir :

(1) la photogrammétrie s’appuie sur les principes de la photographie avec de nouvelles techniques d’enregistrement des objets sur un support fixe, en passant de la stéréoscopie qui consiste à créer un effet spatial de profondeur de l’objet étudié via deux images prises par deux points de vue parallèles. Actuellement, la photogrammétrie numérique multi-images permet l’acquisition rapide d’un grand nombre d’images d’un objet précis depuis plusieurs points de vue et nécessite un post-traitement afin de déterminer les points

homologues entre les différentes vues de l'objet d'étude (Dubois, Vanhellemont, et Bouw 2018) ;

(2) la méthode « *Shape From Focus* » (SFF) est une technique qui permet la reconstruction tridimensionnelle par déplacements successifs d'un plan focal et la détermination des zones *nettes* à chaque position. Sur des microscopes, elle permet, par exemple, de reconstruire la microstructure d'un échantillon de matériau (Dubois, Vanhellemont, et Bouw 2018) ;

(3) la *lasergrammétrie* (ou « *scan laser* ») est un dispositif de mesure des données tridimensionnelles d'un objet réel (Fuchs et Florenzo 2006) ;

(4) les méthodes de positionnement « *global navigation satellite system* » (GNSS) sont utilisées « soit pour l'acquisition de données ponctuelles, soit pour les opérations de contrôles (monitoring, auscultation), de consolidation géométrique ou de géoréférencement » (Billen et al. 2018) ;

(5) la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) est une machine de mesure en 3D, elle permet d'obtenir les coordonnées des points mesurés sur une pièce mécanique.

6. Le résultat des données collectées

Les nouvelles méthodes de collecte de données offrent la possibilité de passer du niveau bidimensionnel au niveau tridimensionnel, mais également d'augmenter la précision des mesures, directement avec la *lasergrammétrie* ou indirectement avec la *photogrammétrie*. Le résultat obtenu par ces nouveaux dispositifs peut être distingué par deux natures de données différentes : (1) une *donnée quantitative* : qui peuvent être comptées ou mesurées, (2) une *donnée qualitative* sous forme d'observations, photos, images satellites, vidéos, des descriptions... Cette qualité va être traitée par la suite par des logiciels de post-traitement pour tirer des mesures exactes et fidèles à l'objet réel, donc ce processus est réduit à quantifier la dimension qualitative.

Il convient de souligner que le principe de quantification reste le même pour toutes les méthodes, qui consiste à associer une valeur numérique à un objet d'étude (Espeland et Stevens 2008), via la mesure ou le comptage (Royer, Garreau, et Roulet 2019), en tenant compte de la cohérence de l'attribution de ces valeurs par rapport au réel. Citons des techniques permettant la quantification des données qualitatives : « analyse qualitative comparée (QCA), l'analyse des réseaux sociaux, l'analyse textuelle, ainsi que l'utilisation accrue de nouvelles données qualitatives quantifiées issues d'internet » (Royer, Garreau, et Roulet 2019). En architecture, cette quantification permet, par exemple, « la description des contraintes sur les espaces en phase de programmation architecturale », afin de vérifier la conformité de la conception en fonction à travers l'Exigences Spatiales Qualitatives (ESQL) (Siala Chakroun 2019).

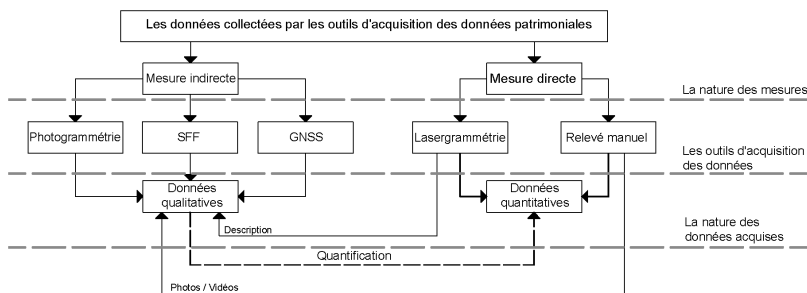


Figure 5. La nature des données collectées par les outils d'acquisition des données

7. Traitement et analyse

La phase d'interprétation des données succède à celle de l'acquisition de données et elle nécessite le recours à des différents processus : d'un côté, le traitement graphique des données (par exemple, avec *Cloud compare*) et, de l'autre, la gestion des données numériques (par exemple, avec un *data cube*).

Le *data cube* est un concept considéré comme étant un opérateur d'agrégation relationnel généralisant les opérations de regroupement, de tableau croisé dynamique et de calcul de sous-totaux (Gray et al. 1997), ainsi que d'autres opérations permettant d'explorer des relations entre les variables.

Le concept du *data cube* (DC) a été popularisé par le modèle multidimensionnel *Online Analytical Processing* (OLAP) (Harinarayan, Rajaraman, et Ullman 1996; Chen et al. 2008) qui permet de représenter les données selon des dimensions multiples et des mesures associées. Cette approche facilite l'analyse des données en permettant de les organiser dans une structure multidimensionnelle, où chaque dimension représente une caractéristique spécifique des données et où chaque cellule contient une valeur correspondante. Dans de nombreux cas, un DC limité à trois dimensions offre déjà une représentation gérable et significative des données patrimoniales.

La réalisation d'un DC comprend quatre étapes (Han et Kamber 2012) :

(1) *formuler une requête* à partir d'une *collecte de données* pertinentes pour le patrimoine bâti (incluant des informations sur les bâtiments, leur historique, leur état de conservation, les restaurations antérieures, les données géographiques, démographiques ainsi qu'environnementales...) et d'une *organisation des données* pour établir des analyses multidimensionnelles, ce qui nécessite l'identification de *dimensions* clés sur lesquelles sera faite l'analyse des *données* (temps, emplacement géographique, type de bâtiment...). Enfin, les données sont structurées en hiérarchies et en niveaux pour chaque dimension ;

(2) *extraire les données agrégées* en agréant des mesures (données quantitatives) en fonction des différentes combinaisons de dimensions (par exemple : agréger les données de conservation des bâtiments par année, par emplacement géographique, par type de bâtiment...). Cela permet de créer des *agrégats* de données prêts à être utilisés dans un DC. Dans notre contexte, ces agrégats pourraient inclure la surface totale des bâtiments par type de bâtiment et par année, le nombre de bâtiments par zone géographique et par

état de conservation, la valeur patrimoniale moyenne par lieu et par période... L'objectif principal de cette *réduction* de dimension (Gray et al. 1997) est de simplifier la complexité des données, d'améliorer la visualisation, de faciliter l'interprétation et d'accélérer les calculs d'interrogation lors de l'analyse des données dans un DC ;

(3) *visualiser des résultats* en construisant un DC comprenant les *dimensions* sélectionnées (temps, emplacement, type de bâtiment...) et les *mesures* agrégées correspondantes. Chaque cellule contiendra une valeur représentant la *mesure* spécifique pour une combinaison *donnée de dimensions* (Harinarayan, Rajaraman, et Ullman 1996) ; (4) *analyser les résultats* en tirant parti de leur multidimensionnalité, et créer des visualisations interactives du DC pour faciliter la compréhension des résultats et prendre des décisions pour la prédiction et la planification du patrimoine bâti.

Différentes techniques d'analyse des données peuvent être utilisées. Parmi elles l'exploration des données (*data mining*) est le processus de découverte de modèles et de connaissances pertinents à partir de grandes quantités de données (Han et Kamber 2012). Elle utilise des techniques statistiques, mathématiques et d'apprentissage automatique pour extraire des relations cachées à partir de données. Elle peut être effectuée sur tout type de données, à condition qu'elles soient utiles à l'application visée (Han et Kamber 2012).

Une étape supplémentaire, peut être dédiée à : (5) *la mise à jour et à la maintenance* rendues nécessaires par l'évolution des données ou de la disponibilité de nouvelles informations, ceci garantit la précision et la pertinence des analyses et des prédictions.

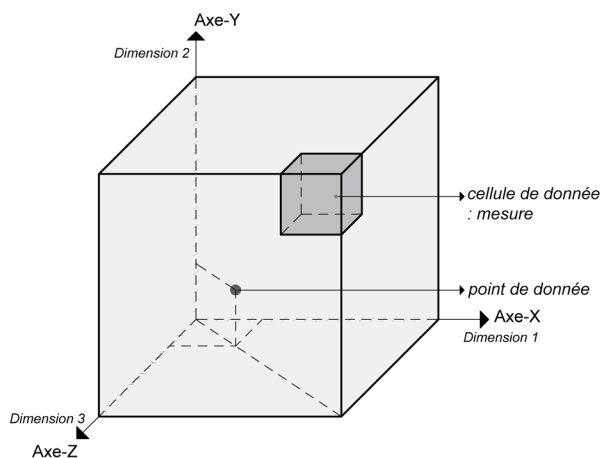


Figure 6. Une représentation schématique du *data cube*

En analysant les données du patrimoine bâti, un DC peut également être utilisé pour faire des *prédictions* sur les différents types d'interventions possibles : chaque dimension représente un aspect spécifique d'un groupe d'ensembles de données patrimoniales. Certaines combinaisons sont possibles entre les dimensions proposées (d) pour produire des connaissances [*knowledge*] (K) (cf. figure 7) :

- K1 : détecter les typologies spécifiques à certaines régions ou à certains types de bâtiment ;

- K2 : repérer les zones géographiques présentant des besoins de conservation particulier ;
- K3 : identifier les types de bâtiment sur le plan patrimonial nécessite une attention particulière en termes de conservation ;
- K4 : optimiser les ressources pour les travaux de conservation ;
- K5 : guider les décisions de préservation du patrimoine envers les constructions de plus d'intérêt.

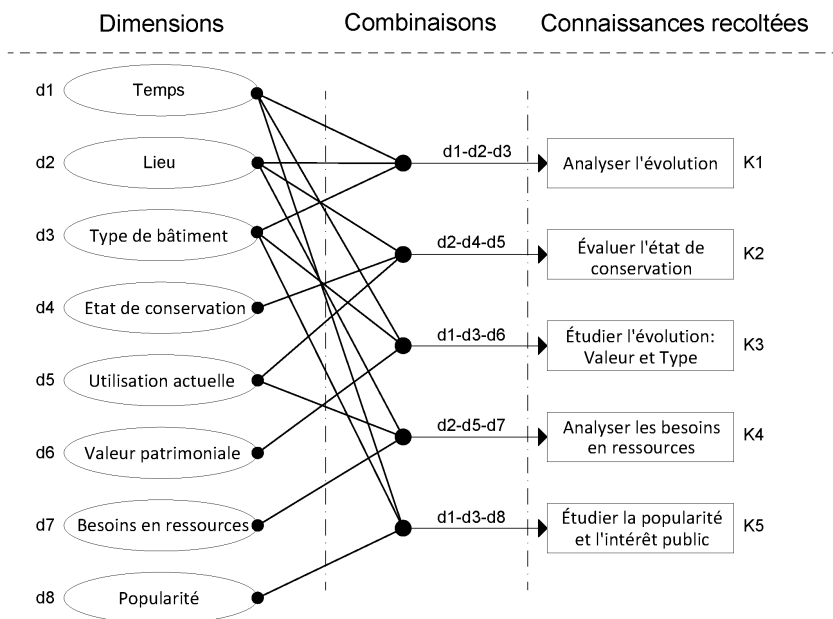


Figure 7. Agencement possible des dimensions proposées

8. Modélisation et Traduction 3D

À l'origine, l'idée du *digital twin* [jumeau numérique] (DT) a été introduite depuis le monde de l'industrie lors d'une présentation à l'université de Michigan en 2002, intitulée « *Conceptual ideal for PLM* », parlant du *Product Lifecycle Management* (PLM) [gestion du cycle de vie des produits]. Cette présentation définit les composantes d'un jumeau numérique ainsi que ses interactions, les liens et le flux des données échangeables entre ces derniers. En 2003, le concept a été adopté et redéfini par Michael Grieves comme un modèle virtuel, construit à partir d'informations, et incluant toutes les informations pertinentes d'un système physique. En 2012, le NASA définit un DT comme étant une simulation virtuelle d'un système qui est relié par son jumeau physique à travers des capteurs, fournissant un historique actualisé de son fonctionnement (Grieves et Vickers 2017; Glaessgen et Stargel 2012).

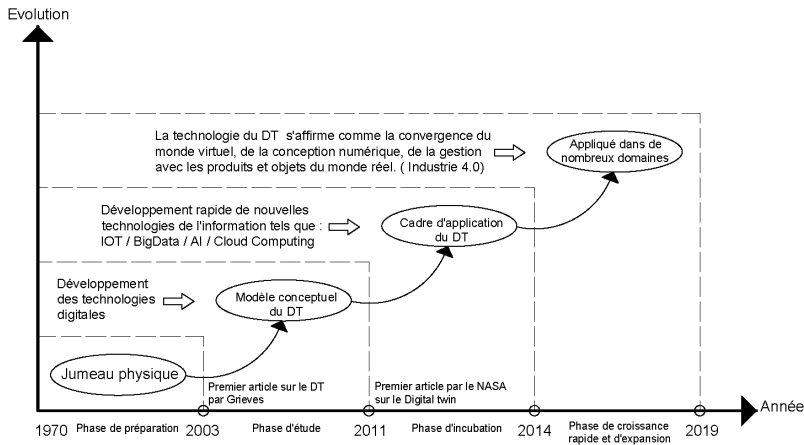


Figure 8. L'évolution du Digital twin traduit d'après (Zhuang et al. 2021)

Le *digital twin* comprend deux composantes : un modèle virtuel similaire et analogue à un modèle physique existant, ces deux modèles sont reliés par des données de nature différentes. En effet, il existe un flux de données qui va et vient entre les deux entités : d'une part, les données émises par le modèle physique sont des données brutes nécessitant un traitement afin de les utiliser d'une manière utile dans le modèle virtuel et, d'autre part, le modèle virtuel produit des données traitées assurant la gestion et le contrôle du modèle physique (Grieves and Vickers 2017).

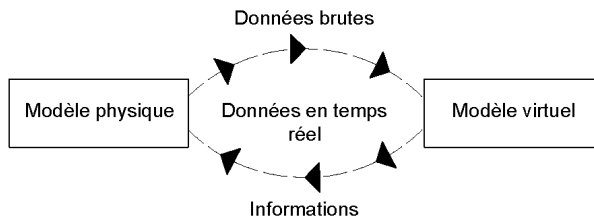


Figure 9. Le paradigme du Digital Twin

Le développement rapide du DT dans divers domaines tels que la fabrication, l'ingénierie mécanique et l'architecture a offert aux modélisateurs différents modèles. Différentes classifications ont donc été établies en fonction de plusieurs paramètres : (1) niveaux d'intégrations des données (Kritzinger et al. 2018) ; (2) niveaux de sophistication (Madni, Madni, et Lucero 2019) ; (3) phases d'analyse numérique d'après un rapport de Gartner (Agrawal, Fischer, et Singh 2022) ; (4) niveaux de développement des données (Grieves et Vickers 2017) ; (5) niveaux de maturité (Autodesk 2021). Ces classifications permettent de mieux appréhender les différentes dimensions du DT et d'organiser les approches et les pratiques dans ces domaines variés.

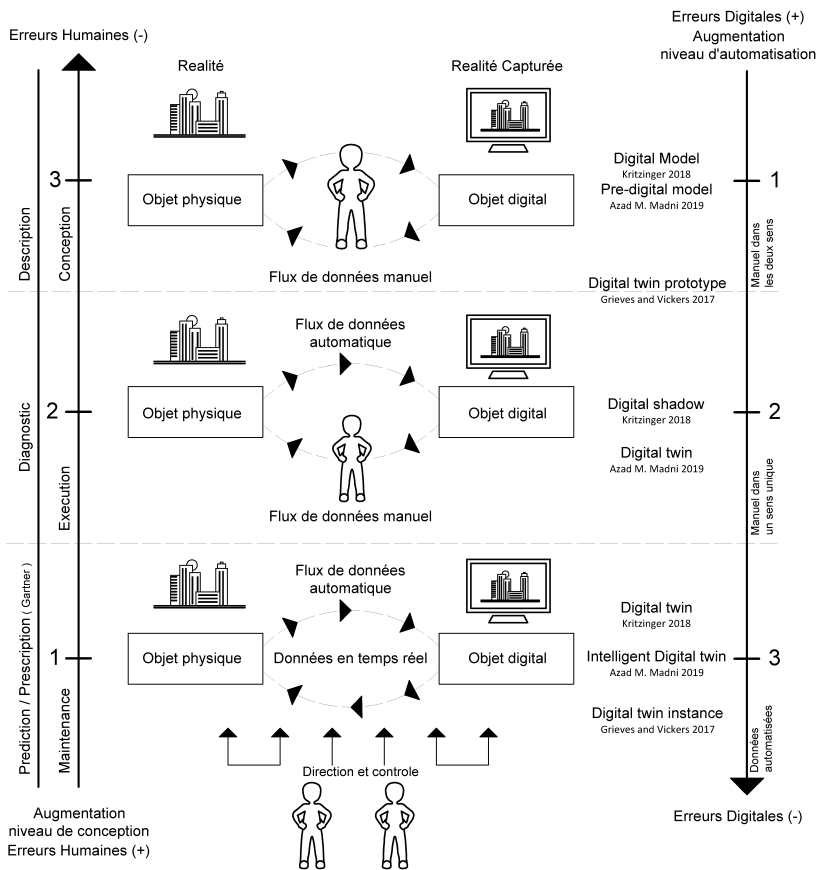


Figure 10. Les modèles du jumeau numérique

Généralement, le DT intervient dans le domaine de l'architecture en combinant les deux concepts de *Building Information Modeling* (BIM) et de *Wireless Sensor Network* (WSN). De ce fait, il joue un rôle important dans l'élaboration d'un projet architectural en partant du modèle virtuel jusqu'à son exécution sur le terrain pour donner naissance à son jumeau physique, ceci permet aux professionnels de travailler plus efficacement et en temps réel pendant les phases d'élaboration d'un projet à travers un flux de données automatisé permettant sa gestion durant la phase de maintenance.

Dans le cadre d'une rétroconception patrimoniale, l'emploi d'un DT est un outil permettant la réalisation d'une maquette numérique dynamique analogue à l'objet physique à rétroconcevoir. Pour comprendre la plus-value potentielle de l'usage d'un jumeau numérique par rapport à une maquette paramétrique, il faut les distinguer :

- d'une part, le DT peut être considéré comme une version améliorée de la maquette paramétrique. La connexion physique-virtuelle continue entre les deux entités, permet le contrôle continu du fonctionnement des jumeaux, alors que dans les

simulations paramétriques, seule la modélisation tridimensionnelle virtuelle est contrôlée ;

- d'autre part, le DT propose une démarche analytique intelligente basée sur cette relation bidirectionnelle entre le virtuel et le physique permettant ainsi de produire des hypothèses, puis de les réaliser, de les tester et de les ajuster pour prendre une décision finale sous forme d'un cycle continu d'adaptation et d'amélioration.

9. Conclusion

Cet article propose l'intégration de nouveaux concepts numériques tels que le *data cube* (DC) et le *digital twin* (DT) dans le cadre de processus de rétroconception patrimoniale. En effet, ce type de processus repose essentiellement sur la complémentarité des méthodes traditionnelles et modernes pour obtenir des résultats fidèles au modèle physique étudié, offrant la possibilité d'acquérir à la fois des données qualitatives et quantitatives, en fonction des besoins et des objectifs du modélisateur. La méthode de rétroconception détaillée ici devrait permettre : (1) une représentation plus fine des objets à rétroconcevoir ; (2) l'automatisation partielle du flux de données entre l'objet réel et le modèle virtuel, à l'aide d'un *jumeau numérique* synchronisé en temps réel ; (3) la création d'une archive numérique actualisée dans le but de collecter et préserver les données d'une manière durable ; (4) une meilleure planification des interventions archéologiques (coûts, délais, localisation...) ; (5) une promotion du tourisme culturel et historique en garantissant l'accès public, via le modèle numérique, à des expériences augmentées dans des sites archéologiques ou des monuments historiques.

Cependant, plusieurs limites à l'usage de cette méthode existent : (1) tout processus de traduction digitale, depuis un ensemble de données captées du réel à une représentation numérique, entraîne des altérations ou des pertes d'informations ; (2) la digitalisation du patrimoine « semble minimiser l'importance de l'usage ou de la matière au profit de celle de l'image » (Bos et al. 2023), ce qui nécessite l'étude prioritaire des données qualitatives pour rencontrer les grilles de valeurs patrimoniales traditionnelles ; (3) pousser la logique du DT jusqu'au bout en reliant, en continu et à vie, un jumeau numérique à son homologue physique n'est pas souhaitable puisque les décisions prises par l'intelligence artificielle doivent être modérées par un concepteur humain.

Références

- Aamodt, Agnar, et Mads Nygård. 1995. « Different roles and mutual dependencies of data, information, and knowledge — An AI perspective on their integration ». *Data & Knowledge Engineering* 16 (3): 191-222.
[https://doi.org/10.1016/0169-023X\(95\)00017-M](https://doi.org/10.1016/0169-023X(95)00017-M).
- Ackoff, Russell L. 1989. « From data to wisdom ». *Journal of Applied Systems Analysis* 16: 3-9.
- Agrawal, Ashwin, Martin Fischer, et Vishal Singh. 2022. « Digital Twin: From Concept to Practice ». *Journal of Management in Engineering* 38 (3): 06022001.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0001034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001034).
- Autodesk. 2021. « Digital Twins in Construction, Engineering & Architecture ». 2021.
<https://www.autodesk.com/solutions/digital-twin/architecture-engineering-construction>.

- Billen, Roland, Benoît Jonlet, Andrea Luczfalvy Jancsó, Romain Neuville, Gilles-Antoine Nys, Florent Poux, Muriel Van Ruymbeke, Mathieu Piavaux, et Pierre Hallot. 2018. « La transition numérique dans le domaine du patrimoine bâti : un retour d'expériences ». In *Bulletin de la commission royale des monuments, sites et fouilles - Tome 30*. Commission royale des Monuments, Sites et Fouilles de la Région wallonne.
- Bos, Morgane, Damien Claeys, David Vandenbroucke, et Dorothee Stiennon. 2023. « Vers une dynamique d'objectivation de l'évaluation patrimoniale ». *lieuxdits*, n° 23: 32-44. <https://doi.org/10.14428/ld.vi23.76853>.
- Carpo, Mario, ed. 2013. *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*. AD reader. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Chen, Chen, Xifeng Yan, Feida Zhu, Jiawei Han, et Philip S. Yu. 2008. « Graph OLAP: Towards Online Analytical Processing on Graphs ». In *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining*, 103-12. Pisa, Italy: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.30>.
- Claeys, Damien, et Zaineb Naifer. 2022. « Méthodes de reconception architecturale : imitation, modularité, typologie et paramétrisme ». *DNArchi*, n°2, 16pp. <https://doi.org/10.48568/1DHB-SG50>.
- Dubois, Samuel, Yves Vanhellemont, et Michael De Bouw. 2018. « Le relevé 3D à l'heure du BIM. Capturer la réalité en haute définition ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30838.04163>.
- Espeland, Wendy Nelson, et Mitchell L. Stevens. 2008. « A Sociology of Quantification ». *European Journal of Sociology / Archives Européennes de Sociologie / Europäisches Archiv für Soziologie* 49 (3): 401-36.
- Fuchs, Alain, et Michel Florenzo. 2006. « Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique ». Université Henri Poincaré - Nancy I. <https://theses.hal.science/tel-00145277>.
- Gaillard, J.C., et Jessica Mercer. 2013. « From Knowledge to Action: Bridging Gaps in Disaster Risk Reduction ». *Progress in Human Geography* 37 (1): 93-114. <https://doi.org/10.1177/0309132512446717>.
- Georges, Bernard. 2017. « La vie augmentée ». *Faire aimer l'avenir* (blog). 2017. <https://bernardgeorges.fr/thematiques/la-vie-augmentee>.
- Glaessgen, Edward, et David Stargel. 2012. « The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles ». In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Honolulu, Hawaii: American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>.
- Gray, Jim, Surajit Chaudhuri, Adam Bosworth, Andrew Layman, Don Reichart, Murali Venkatrao, Frank Pellow, et Hamid Pirahesh. 1997. « Data Cube: A Relational Aggregation Operator Generalizing Group-By, Cross-Tab, and Sub-Totals ». *Data Mining and Knowledge Discovery* 1 (1): 29-53. <https://doi.org/10.1023/A:1009726021843>.
- Grieves, Michael, et John Vickers. 2017. « Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems ». In *Transdisciplinary*

- Perspectives on Complex Systems*, édité par Franz-Josef Kahlen, Shannon Flumerfelt, et Anabela Alves, 85-113. Cham: Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- Han, Jiawei, et Micheline Kamber. 2012. *Data mining: concepts and techniques*. 3rd ed. Burlington, MA: Elsevier.
- Harinarayan, Venky, Anand Rajaraman, et Jeffrey D. Ullman. 1996. « Implementing data cubes efficiently ». *ACM SIGMOD Record* 25 (2): 205-16.
<https://doi.org/10.1145/235968.233333>.
- Jacquot, Kévin. 2014. « Numérisation et restitution virtuelle des maquettes de la collection de Louis XIV : le cas des fortifications bastionnées ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.
- Kritzinger, Werner, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, et Wilfried Sihm. 2018. « Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification ». *IFAC-PapersOnLine* 51 (11): 1016-22.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
- Le Deuff, Olivier. 2014. *La documentation dans le numérique*. Villeurbanne : Presses de l'enssib.
<https://doi.org/10.4000/books.pressesenssib.2373>.
- Madni, Azad, Carla Madni, et Scott Lucero. 2019. « Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering ». *Systems* 7 (1): 7.
<https://doi.org/10.3390/systems7010007>.
- Noiret, Serge, et Frédéric Clavert. 2013. *L'histoire Contemporaine à l'ère Numérique Contemporary History in the Digital Age*. Brüssel: P.I.E.-Peter Lang S.A.
- Oxman, Rivka E., et Robert M. Oxman, éd. 2014. *Theories of the Digital in Architecture*. London ; New York: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Paquet, Philippe. 2006. « De l'information à la connaissance ». <https://shs.hal.science/halshs-02097061>.
- Roobaert, Louis, et Damien Claeys. 2022. « Trois modalités conversationnelles en conception architecturale : apports de la théorie de la conversation de Gordon S. Pask ». *SHS Web of Conferences* 147: 04002.
<https://doi.org/10.1051/shsconf/202214704002>.
- Rowley, Jennifer. 2007. « The Wisdom Hierarchy: Representations of the DIKW Hierarchy ». *Journal of Information Science* 33 (2): 163-80.
<https://doi.org/10.1177/0165551506070706>.
- Royer, Isabelle, Lionel Garreau, et Thomas Roulet. 2019. « La quantification des données qualitatives : intérêts et difficultés en sciences de gestion ». *Finance Contrôle Stratégie*, n° NS-6 (mai). <https://doi.org/10.4000/fcs.3312>.
- Siala Chakroun, Aida. 2019. « Modélisation et représentation des exigences spatiales qualitatives ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy + Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU).
- Sowa, John F. 1984. *Conceptual Structures : Information Processing in Mind and Machine*. Addison-Wesley Systems Programming Series. Reading: Addison-Wesley.
<https://ils.bib.uclouvain.be/global/documents/163205>.

Zhuang, Cunbo, Tian Miao, Jianhua Liu, et Hui Xiong. 2021. « The Connotation of Digital Twin, and the Construction and Application Method of Shop-Floor Digital Twin ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 68 (avril): 102075.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102075>.