



HAL
open science

L'apport du HBIM dans les humanités numériques : pour une synergie entre archéologie, architecture, informatique graphique et gestion patrimoniale

Sandrine Borel-Dubourg, Florian Beguet, Marc Panneau, Romain Raffin,
Guillaume Quéré

► To cite this version:

Sandrine Borel-Dubourg, Florian Beguet, Marc Panneau, Romain Raffin, Guillaume Quéré. L'apport du HBIM dans les humanités numériques : pour une synergie entre archéologie, architecture, informatique graphique et gestion patrimoniale. Journées du Consortium 3D pour les Humanités Numériques (HumaNum), S. Rassat; M. Chayani; L. Voison; A. Zasadzinski; E. Interdonato; C. Delevoie; F. Laroche; X. Granier, Nov 2024, Nancy, France. <hal-05044506v2>

HAL Id: hal-05044506

<https://hal.science/hal-05044506v2>

Submitted on 13 May 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



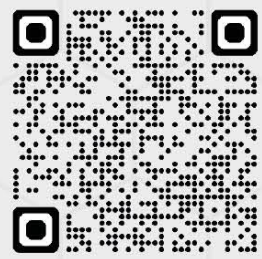
Distributed under a Creative Commons CC BY-ND 4.0 - Attribution - No Derivative Works - International License



Journées du Consortium 3D pour les Humanités Numériques



26-28 nov. 2024
Nancy



crédits iconographiques : archeovision.cnrs.fr

CENTRE DES MONUMENTS NATIONAUX

IFA INSTITUT FRANÇAIS D'ARCHÉOLOGIE ANTIQUE

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES ARCHÉOLOGIQUES ET PATRIMONIALES

IVT

ARCHÉOSCIENCES BORDEAUX

CNRS

CIREVE

citeres

LP2N

LS2N

Inrap

Inria

LAMPA

map

Cerema

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES ARCHÉOLOGIQUES ET PATRIMONIALES

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES ARCHÉOLOGIQUES ET PATRIMONIALES

Trajectoires

xlim

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

SAMA Sciences de l'Antiquité et du Moyen Âge

cnrs Inist

DEPARTEMENT MEURTHE MOSELLE

L'APPORT DU HBIM DANS LES HUMANITES NUMERIQUES : POUR UNE SYNERGIE ENTRE ARCHEOLOGIE, ARCHITECTURE, INFORMATIQUE GRAPHIQUE ET GESTION PATRIMONIALE

S. Borel-Dubourg¹, F. Beguet¹, M. Panneau¹⁻³, R. Raffin², G. Quere³

¹IRAA : Institut de Recherche sur l'Architecture Antique

²LIB : Laboratoire d'Informatique de Bourgogne

³Société A-BIME

sandrine.borel-dubourg@univ-amu.fr

marc.panneau@univ-amu.fr

florian.beguet@gmail.com

romain.raffin@u-bourgogne.fr

RÉSUMÉ : Le projet TAIC2 développe un système de gestion et d'étude du théâtre antique d'Orange basé sur une maquette numérique HBIM liée à une base des informations archéologiques et architecturales du bâtiment permettant une approche interdisciplinaire, évolutive et interopérable pour la recherche archéologique, la conservation patrimoniale et la valorisation de ce monument inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO.

MOTS-CLÉS : Interopérabilité, Archéologie, Architecture, HBIM, Méthodologie, Patrimoine, IFC

1. CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE ET MÉTHODOLOGIQUE DU PROJET TAIC2

De 2016 à 2024, le suivi archéologique des travaux de restauration du théâtre antique d'Orange, monument historique classé patrimoine mondial de l'UNESCO, a constitué une opportunité unique pour les membres de l'Institut de Recherche sur l'Architecture Antique (IRAA) d'étudier cet ensemble monumental dans sa globalité (Fig. 1).

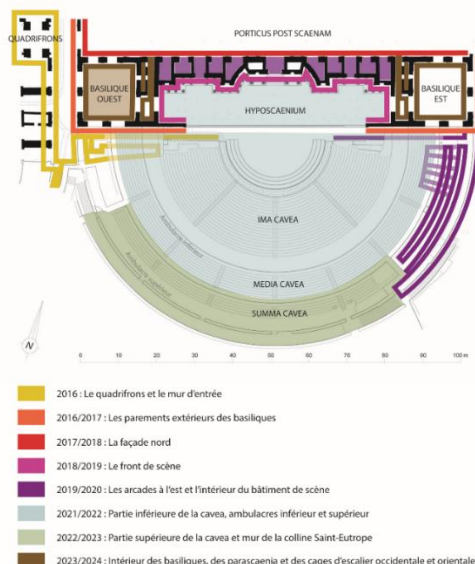


Figure 1 - Les secteurs du théâtre concernés par les tranches de travaux annuelles, entre 2016 et 2024 (A. Papadopoulou, IRAA, 2024)

Les échafaudages ont permis d'atteindre pour la première fois des secteurs généralement inaccessibles en raison des dimensions exceptionnelles de son bâtiment de scène, long de 104 m et haut de 36 m (Fig. 2). Le nombre de données générées, archéologiques et numériques 3D, a grandi exponentiellement durant ces 8 années d'enregistrement archéologique. Cette opération de terrain d'envergure a révélé l'absence d'un outil collaboratif permettant de rassembler et d'accéder à des jeux de données très hétérogènes pour l'ensemble des acteurs de la recherche et issus du monde socio-économique et culturel impliqués dans l'étude et la conservation de ce monument.

C'est dans ce contexte que les projets interdisciplinaires TAIC « Un théâtre antique, intelligent et connecté » (2019-2021) puis TAIC2¹ (2022-2025), soutenus par la Fondation A*Midex (amU), ont été initiés, explorant pour la première fois l'utilisation du processus HBIM (*Historic Building Information Modeling*) sur un monument antique à des fins archéologiques et de gestion patrimoniale.

¹ Les partenaires du projet TAIC2, institutionnels et issus du monde socio-économique et culturel, sont : le Laboratoire d'Informatique de Bourgogne, le Laboratoire de Recherche en Architecture de l'ENSA de Toulouse, les Services Régionaux d'Archéologie Occitanie et PACA, la Conservation Régionale des Monuments Historiques PACA, le Service Patrimoine et le Musée d'Art et d'Histoire d'Orange,

Architecture & Héritage. Le projet TAIC2 a été mené en collaboration avec la Société A-BIME, de 2022 à 2025, dans le cadre de la modélisation du monument.



Figure 2 - Échafaudages du front de scène du théâtre d'Orange (S. Borel-Dubourg, IRAA, 2018)

Le projet TAIC2 s'inscrit dans un contexte archéologique, patrimonial et numérique en profonde mutation. L'évolution des méthodes de recherche en archéologie génère une production de données hétérogènes de plus en plus massive. Cette accumulation, tout à la fois quantitative et qualitative, rend indispensable la mise en œuvre de nouveaux outils de gestion, d'organisation et de transmission de l'information. Ces outils doivent répondre aux exigences de traçabilité, de fiabilité, de conservation, mais aussi de partage et de réutilisation, dans une logique pleinement alignée sur les principes de la science ouverte. C'est à partir de ce constat qu'est née l'ambition du projet TAIC2 : faire du théâtre antique d'Orange un laboratoire méthodologique pour expérimenter un mode de gestion interdisciplinaire, évolutif et collaboratif des données patrimoniales. L'objectif est double : mieux comprendre le monument dans toutes ses dimensions historiques, architecturales et matérielles, et proposer des solutions concrètes pour sa gestion, sa conservation et sa valorisation.

2. LE PROCESSUS HBIM AU SERVICE DE L'ARCHEOLOGIE ET DE LA GESTION DES DONNEES HETEROGENES DE LA RECHERCHE

Le projet TAIC2 fait face à un triple défi scientifique : gérer la croissance exponentielle des données hétérogènes de la recherche, les confronter à la documentation archivistique par le biais d'une analyse archéologique spatialisée, et mener une étude architecturale approfondie de l'ensemble monumental dans la perspective de fournir un socle solide aux acteurs en charge de sa gestion patrimoniale. À l'instar des autres théâtres de Narbonnaise, celui d'Orange s'inscrit pleinement dans le réseau viare et le maillage territorial (Moretti, Fellague, 2024, p. 368). Il convient donc d'appréhender le monument dans son contexte urbain et historique. En revanche, on ne peut se contenter d'une analyse parcellaire. Le théâtre antique est au cœur d'un ensemble monumental unitaire dont la compréhension est primordiale pour son étude. En effet, la ville constitue un système spatial complexe où les bâtiments sont intégrés dans des réseaux d'interactions à diverses échelles. En outre, le monument forme un des signes de l'*urbanitas*

(Gros, 1994, p. 285 ; Letellier, 2011, p. 2), il s'inscrit dans un maillage économique, politique et structurel essentiel à prendre en compte dans l'analyse de sa fonction historique et de son importance régionale. Dans le cadre du projet TAIC2, l'adoption d'une approche spatiale novatrice nous a semblé indispensable pour répondre au mieux aux objectifs de recherche et réunir tous les aspects qu'implique l'étude d'un tel monument.

Le premier objectif du projet a été de mettre en place un système de gestion des données, reposant sur un travail de géoréférencement et de caractérisation des relations spatiales entre les éléments étudiés. La grande hétérogénéité de la documentation constituée ces dernières années et son éparpillement dans plusieurs entrepôts de données ont conduit à la création d'une base d'information du bâtiment à deux entrées, interrogeable soit par un système d'information géographique (SIG), soit par une maquette HBIM du bâtiment. Cette approche transversale s'articule autour des critères suivants : un système évolutif interopérable et répétable, une chaîne opératoire ouverte (open source), une maquette numérique évolutive, sémantisée et sourcée, favorisant une méthode collaborative inscrite dans la science ouverte.

Pour cette approche méthodologique, l'infrastructure technique du SIG repose sur l'utilisation de GeoServer, un serveur cartographique open-source spécialement conçu pour la gestion et le partage des données géospatiales. L'architecture mise en place établit une chaîne de traitement entre les données sources, qu'il s'agisse de données vectorielles (*PostGIS*, *shapefile*), raster (*GeoTIFF*) ou de bases de données spatiales, et les services web standardisés (*WMS*, *WFS*, *WCS*). GeoServer assure ici le rôle d'interface entre ces composants, permettant la publication et la stylisation des couches géographiques, ainsi que leur interrogation par requêtes spatiales. En lien avec le projet, plusieurs thématiques de recherches à fort potentiel géographique ont également éclo, c'est le cas notamment du projet ACCTOr² dédié à l'étude de l'approvisionnement en blocs de calcaire pour la construction du théâtre d'Orange qui, en s'appuyant sur des prospections et l'étude des carrières, rayonne sur une trentaine de kilomètres autour du monument. Constitué à partir des données de terrain (pointages géoréférencés, notes et photos in situ), des cartes géologiques anciennes, des données lidar HD de l'IGN, et des données vectorielles (cadastre, voirie, hydrologie, etc.), cette étude alimente un SIG thématique aligné sur les critères énoncés *supra* et enrichit les bases de données du projet TAIC2 (Fig. 3). Outre la cartographie des carrières, l'objectif ici est de suivre, par la spatialisation des données, le chemin des matériaux d'approvisionnement depuis leur extraction jusqu'à leur position finale dans le monument, d'identifier les volumes extraits, les voies empruntées et les pratiques de mise en œuvre.

² Le projet ACCTOr — Approvisionnement en calcaire pour la construction du théâtre d'Orange est porté par Alain Badie (Architecte, IRAA) et Gilles Conesa (Géologue, CEREGE). Il s'agit d'un projet

AMORCE de l'Institut d'Archéologie Méditerranéenne (ARKAIA, amU).

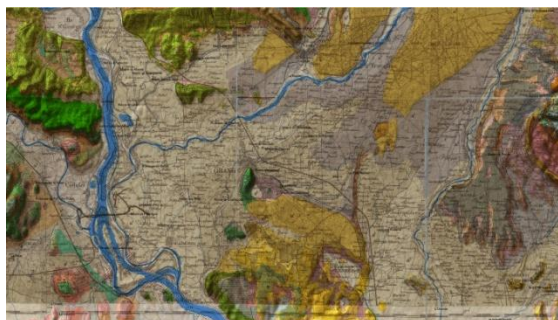


Figure 3 - Cartographie du SIG géologique du territoire d'Orange (Vaucluse) rassemblant des données raster anciennes, des données vecteurs (hydrologie, cadastre, voirie...). (IRAA, 2024)

La seconde entrée du projet TAIC s'établit autour de la maquette numérique de l'ensemble monumental. Issu des processus de modélisation des données du bâtiment, le BIM (*Building information modeling*) se développe dans le domaine de l'architecture autour des années 1990. Il implique la création et la gestion de modèles numériques 3D complets qui rassemblent les aspects physiques et fonctionnels d'un bâtiment, facilitant la collaboration, l'efficacité et la prise de décision tout au long du cycle de vie du bâtiment (Celnik, Lebègue, 2015).

À partir des années 2010-2012, suite à la publication de la thèse de M. Murphy, le « *HBIM for recording and documenting classical architecture in Dublin 1700 to 1830* » (Murphy, 2012), le HBIM rencontre un écho favorable auprès de la communauté scientifique qui s'empare du processus de modélisation (Lopez et al., 2018, p. 2). Toutefois, son application au patrimoine bâti présente des particularités distinctes de son utilisation dans la construction contemporaine. En effet, contrairement au cycle dynamique d'un projet architectural neuf, l'approche HBIM s'attache à documenter un état du bâtiment, capturé à un moment précis de son histoire. Ce processus de numérisation est encore exploratoire, notamment dans la modélisation d'éléments architecturaux non standardisés. La documentation numérique d'un monument historique impose la prise en compte de géométries complexes (Fig. 4), caractérisées par des déformations structurelles, des irrégularités et des altérations dues au temps et à l'homme. Ces pathologies et dégradations, témoins de l'histoire du bâtiment, constituent des données essentielles qui doivent être intégrées au modèle numérique.

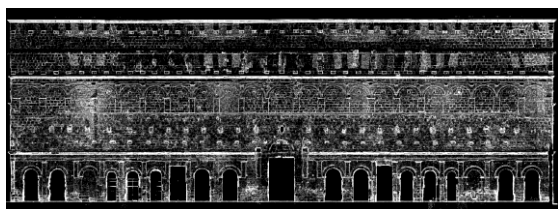


Figure 4 - Vue de levé lasergrammétrique de la façade septentrionale du bâtiment de scène du théâtre antique d'Orange (Vaucluse). (M. Panneau, IRRA/A-BIME, 2024)

Mais l'adoption du processus HBIM en archéologie, c'est-à-dire, un modèle sémantisé et alimenté par des données issues des recherches archéologiques, très

peu explorée au cours de la décennie 2010-2020 (Jacquot, 2021), connaît aujourd'hui une expansion significative, comme en témoigne la croissance des études et projets sur les sites archéologiques européens (Ávila et al., 2024). Alors qu'une large portion des publications portant sur le HBIM fait encore la part belle à la seule modélisation volumétrique des monuments anciens (Stoleru, Jacquot, 2020), c'est bien l'enrichissement des éléments modélisés par des informations (via les jeux de propriétés) qui introduit une nouvelle approche méthodologique dans la documentation archéologique.

Le BIM comme le HBIM ne sont pas des logiciels, mais bien un ensemble de processus de modélisation volumétrique et sémantique, fondé sur une approche « orientée objet ». L'intérêt majeur du HBIM réside dans sa polyvalence et son adaptabilité aux spécificités des données spatiales en 3D (notamment architecturales), puisque l'orientation objet du HBIM permet une organisation des données, facilitant les requêtes multicritères au sein des bases de données associées. Cette méthode, par ses particularités et ses protocoles, constitue un support de travail et d'analyse pertinent en archéologie.

La hiérarchisation des informations du modèle se fonde sur le schéma IFC (*Industry Foundation Classes*) qui est un modèle standardisé et ouvert de structuration des données du bâtiment. Chaque élément du bâtiment (sol, mur, porte, fenêtre, plafond, etc.) est défini par des caractéristiques précises et des liens de « parentés » structurels, physiques et spatiaux. Le format de fichier [.ifc] structure ses données de manière standardisée. Cela permet de décrire l'ensemble des éléments d'un bâtiment, leurs propriétés et leurs relations de façon précise et interopérable dans un format textuel. Cette approche s'aligne sur les principes de la science ouverte et les critères FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable et Réutilisable) (Wilkinson et al., 2016; Lamprecht et al., 2020). Cette standardisation, reconnue par la norme internationale ISO 16739³, fait partie de l'approche *Open BIM* qui vise à faciliter la collaboration dans le secteur du bâtiment grâce à des formats ouverts et s'avère précieuse dans le domaine du patrimoine bâti (Oostwegel et al., 2022). Deux niveaux d'information sont associés aux objets, le premier niveau est détenu dans la structuration des données du schéma IFC, le second niveau porte sur les données attributaires associées aux objets (métadonnées et paradonnées).

Au sujet de l'organisation des données à partir du schéma IFC, elle prend la forme d'un graphe relationnel, dans lequel les objets (en bleu) sont liés par des objets relationnels (en jaune) (Fig. 5). Prenons l'exemple d'un modèle issu de la documentation de la spécification de l'IFC (4.3.2)⁴, qui illustre la structure des données d'un mur rideau (*curtain wall*) constitutif d'un bâtiment à trois niveaux (rez-de-chaussée, premier et deuxième étages) et de ses relations avec les différents objets.

On peut observer plusieurs éléments clés structurés suivant une organisation spatiale, avec au sommet, « *IfcSite* » (le site), puis « *IfcBuilding* » (le

³ Dernière révision de la norme publiée en mars 2024 : <https://www.iso.org/fr/standard/84123.html>

⁴ <https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>

bâtiment), « *IfcBuildingStorey* » (les étages) et d'un élément physique *IfcCurtainWall* (le mur rideau). En jaune sont représentées les relations entre ces objets, qui peuvent être physiques ou spatiales suivant leur nature (*IfcRelAggregates* ou *IfcRelContainedIn*). Le mur rideau (objet géométrique) est ainsi situé dans les trois étages (objets spatiaux) constitutifs du bâtiment (objet spatial) appartenant à un site (objet spatial). C'est un exemple concret de la façon dont l'IFC structure l'information pour assurer une description complète et cohérente du bâtiment.

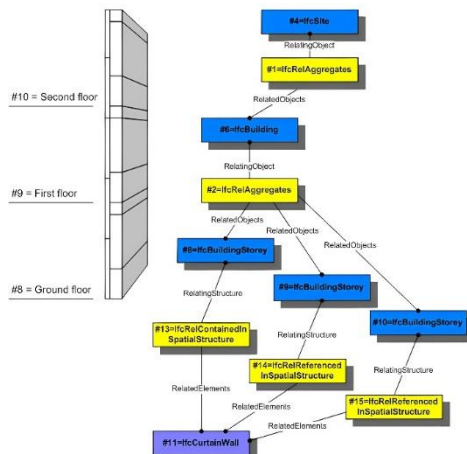


Figure 5 - Schéma de représentation de la structuration des relations spatiales dans l'IFC 4.3.2 (IFC4X3_ADD2) (<https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/>)

Du point de vue de la structuration des données, la confrontation entre la modélisation de l'information et les relations stratigraphiques initiées par E. Harris depuis la fin des années 1970 (Harris, 1979), offrant un cadre méthodologique toujours pertinent grâce aux relations d'antériorité postérieures adaptées à l'archéologie du bâti (Paron-Kontis, Reveyron, 2005 ; Desachy, 2008, p. 58), est pour la première fois explorée et mise en œuvre dans le projet TAIC2. L'unité de base, l'unité stratigraphique notée US (ou unité construite UC) pourrait être comparable à l'« objet » (*buildingelement*) et les relations stratigraphiques qui lient les unités entre elles pour former des faits archéologiques pourraient être illustrées par les relations spatiales de l'IFC, évoqués *supra*. Dans cette perspective, l'un des objectifs du projet porte sur la mise en place d'une méthode d'adaptation de l'IFC pour lever les verrous techniques qui rendent le HBIM encore peu praticable à l'étude archéologique ou pour le moins inadapté aux cas de stratigraphie inversée (reprise en sous-œuvre, restaurations, etc.) et aux interprétations chronologiques.

Enfin, le second niveau d'information concerne les métadonnées et les paradonnées⁵ (Bentkowska-Kafel, Denard, 2016) qui sont associées à chaque « volume objet ». Ces informations, rassemblées dans une base de données, couvrent tous les secteurs d'étude du monument et sont associées à chaque « objet » : les propriétés architecturales (matériaux, structure, mécanique), les propriétés scientifiques (archéologique, historiques, géologiques, etc.) auxquelles peuvent

également être ajoutées des propriétés spécifiques (thermique, acoustique, résistance au feu, etc.), (Fig. 6).

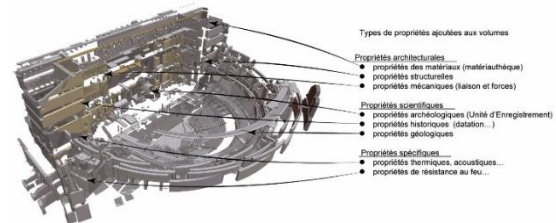


Figure 6 - Vue éclatée de la maquette numérique (objet physique) du théâtre antique (IRAA-A-BIME)

3. L'INTEROPERABILITE AU CŒUR DU PROJET TAIC2

En s'appuyant sur ces deux modes de représentation et d'analyse des données patrimoniales, le projet TAIC2 fait face à des questionnements méthodologiques liés à leur intégration et à leur interopérabilité. Alors que le SIG permet d'appréhender les relations spatiales aux échelles urbaines et territoriales, le HBIM offre une documentation détaillée de l'information architecturale à l'échelle du bâtiment. L'association de ces approches complémentaires se confronte à plusieurs verrous techniques : la gestion des systèmes de coordonnées et des références spatiales, les différences dans les niveaux de détail, la structuration des modèles sémantiques et la conversion des géométries tridimensionnelles. La problématique s'articule ainsi autour de l'élaboration d'une méthodologie permettant d'assurer l'interopérabilité des données entre ces deux systèmes, tout en garantissant des formats ouverts et accessibles, adaptés aux pratiques des différents acteurs travaillant sur le théâtre antique.

Pour répondre à ces enjeux d'interopérabilité, nous proposons une base de données unifiée PostgreSQL qui constitue le socle central du système d'information. La Figure 7 illustre l'architecture de cette base de données. Elle est décomposée en deux parties : la première stocke le schéma IFC, modélisé en EXPRESS, un langage de modélisation de données standardisé (ISO 10303-11). Ce choix, en plus d'éviter une maintenance lourde de la base de données en évitant la création manuelle des nombreuses tables présentes dans le schéma, permet également d'intégrer les évolutions passées et futures du format. La seconde partie conserve les instances et leurs valeurs, c'est-à-dire les données architecturales réelles qui respectent ce schéma. Pour les instances qui disposent d'une représentation géométrique telle que les *IfcElements*, une géométrie PostGIS leur est associée, comprenant un polygone pour la représentation 2D et une boîte englobante pour la 3D. La géométrie complexe des modèles IFC n'est pas stockée directement dans la base, car elle nécessiterait une reconstruction complexe avec de nombreuses jointures. Le format STEP, qui partage avec l'IFC la formalisation EXPRESS, permet de sauvegarder ces modèles de manière native sur le serveur. Ils sont ensuite liés aux éléments qu'ils représentent par la relation

⁵ On entend par « paradonnées » (*paradata*) l'ensemble de sources qui documentent et décrivent les processus intellectuels d'interprétation des données (volumétrie, relation, restitution, chronologie, etc.).

IfcDocumentReference. Cette approche présente deux avantages : elle permet d'effectuer des requêtes spatiales avec PostGIS pour récupérer les données dans un format compatible avec les SIG via GeoServer, tout en conservant l'accès aux versions des modèles 3D pour chaque élément modélisé.

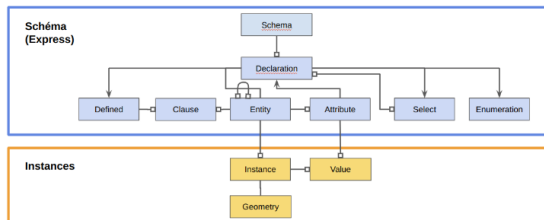


Figure 7 - Structure de la base de données, décomposée en deux parties : le schéma EXPRESS de l'IFC avec ses composants (en bleu) et les instances avec leurs géométries associées (en jaune)

Le système d'information, illustré dans la Figure 8, s'articule autour d'un serveur *backend* qui assure la validation et l'intégration des données dans la base de données centrale. Ce *backend* vérifie la conformité des données avant de les intégrer dans la base et dispose d'une API (Interface de Programmation d'Application) qui permet l'import et l'export dans des formats interopérables tels que les fichiers *shapefile*, pour une représentation spatiale des données, et les fichiers IFC, pour une représentation architecturale. Cette API permet également d'intégrer des données ou d'effectuer des requêtes de manière unitaire. GeoServer se connecte directement à la base de données et publie des vues prédéfinies pour chaque type d'élément IFC disposant d'une géométrie 2D. Ces vues contiennent directement toutes les propriétés associées aux éléments, permettant leur exploitation par les outils SIG traditionnels. Deux serveurs dédiés aux données 3D sont également mis en place. Le premier serveur publie les modèles STEP sous un format 3D-Tiles optimisé pour la visualisation. Les identifiants uniques des éléments qu'ils représentent (GUID) sont intégrés afin de les rendre interactifs et de permettre des requêtes via l'API du backend pour extraire les données liées à ces éléments.

Le second serveur utilise Potree pour publier les nuages de points issus des levés lasergramétriques, photogrammétriques et LIDAR. Cette architecture distribuée évite le stockage de données volumineuses dans la base centrale tout en optimisant leur visualisation et leur interaction (Schutz, 2016 ; Schütz et al., 2020). À l'aide des formats ouverts de GeoServer et du format IFC, les données sont accessibles via les différents logiciels métiers tels que QGIS, ARCGIS, REVIT et CADWORK. Une interface développée spécifiquement pour les besoins du projet avec iTowns permet aussi d'accéder à l'ensemble de ces ressources de manière unifiée. Enfin, la sécurité du système est assurée par une authentification partagée de type JWT (JSON Web Token) qui contrôle l'accès aux différents services, permettant de définir des degrés de confidentialité pour l'accès aux données sensibles et des droits d'écriture spécifiques à certains acteurs pour l'intégration de nouvelles données.

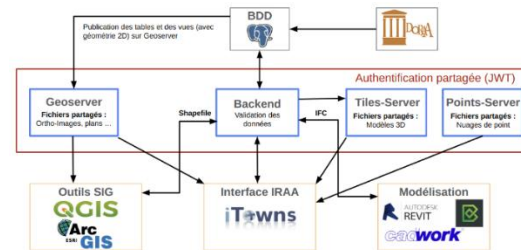


Figure 8 - Architecture du système d'information du projet TAIC2, présentant l'articulation entre la base de données centrale, les différents serveurs spécialisés (encadrés en bleu) et les outils utilisateurs (encadrés en orange), le tout sécurisé par une authentification JWT.

4. CONCLUSION

L'approche méthodologique développée dans le cadre du projet TAIC2, au service de l'étude archéologique et de la gestion du patrimoine bâti, propose une réponse concrète aux enjeux d'interopérabilité entre les systèmes BIM et SIG. La base de données unifiée, structurée selon le schéma EXPRESS de l'IFC, offre une solution technique permettant d'intégrer aussi bien les données architecturales que spatiales, tout en garantissant leur accessibilité via des formats ouverts. L'architecture distribuée du système d'information, articulée autour de serveurs spécialisés, permet une gestion optimisée des différents types de données, qu'il s'agisse de géométries 2D, de modèles 3D ou de nuages de points. Cette infrastructure, développée sur le cas d'étude du théâtre antique d'Orange, constitue un cadre méthodologique reproductible pour d'autres sites ou monuments historiques.

5. BIBLIOGRAPHIE

ÁVILA F. et al., 2024, « HBIM: Background, Current Trends, and Future Prospects », Applied Sciences, p. 23.

BENTKOWSKA-KAFEL A. et DENARD H. (éd.), 2016, Paradata and Transparency in Virtual Heritage, London, Routledge, 344 p.

CELNİK O. et LEBEGUE E., 2015, BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction, 2e édition., Paris, Eyrolles, coll. « CSTB », 763 p.

DESACHY B., 2008, De la formalisation du traitement des données stratigraphiques en archéologie de terrain, Thèse de doctorat, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.

GROS P., 1994, « Les théâtres en Italie au Ier siècle de notre ère : situation et fonctions dans l'urbanisme impérial », Publications de l'École Française de Rome, 198, 1, p. 285-307.

HARRIS E.C., 1979, Principes de la Stratigraphie Archéologique, traduit par Anne-Sophie MURRAY, 2e édition 1989., London & New York, coll. « Academic Press », 136 p.

JACQUOT K., 2021, « Regards croisés sur la maturité des pratiques BIM et HBIM », dans Le théâtre antique d'Orange SIG et HBIM, Aix-en-Provence, France, Institut de Recherche sur l'Architecture Antique.

LAMPRECHT A.-L. et al., 2020, « Towards FAIR principles for research software », *Data Science*, 3, 1, p. 37-59.

LETELLIER É., 2011, « Théâtres et monumentalité urbaine dans le monde romain », dans *La Monumentalité urbaine*. Journée d'étude du 4 novembre 2011, Christiane Prigent; François Villeneuve; Florence Journot, Paris, p. 17 p.

LOPEZ F. et al., 2018, « Linking HBIM graphical and semantic information through the Getty AAT: Practical application to the Castle of Torrelobatón », *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 364, p. 012100.

MORETTI J.-C. et FELLAGUE D., 2024, *Les théâtres antiques et leurs entrées parodos et aditus.*, MOM éditions., 300 p.

MURPHY M., 2012, *Historic building information modelling (HBIM) for recording and documenting classical architecture in Dublin 1700 to 1830*, These of Philosophy, Trinity College, Dublin, 150 p.

OOSTWEGEL L.J.N. et al., 2022, « Digitalization of culturally significant buildings: ensuring high-quality data exchanges in the heritage domain using OpenBIM », *Heritage Science*, 10, 1, p. 10.

PARON-KONTIS I. et REVEYRON N., 2005, *Archéologie du bâti. Pour une harmonisation des méthodes*, Errance., coll. « Archéologie aujourd'hui », 159 p.

SCHUTZ M., 2016, *Potree: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers* | TU Wien – Research Unit of Computer Graphics, Ingénierie, Vienna University of Technology, Vienne, 92 p.

SCHÜTZ M. et al., 2020, « Fast Out-of-Core Octree Generation for Massive Point Clouds », *Computer Graphics Forum*, 39, 7, p. 155-167.

STOLERU A. et JACQUOT K., 2020, « HBIM: une analyse de la littérature scientifique », *SHS Web of Conferences*, vol.82, p.1-10.

WILKINSON M.D. et al., 2016, « The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship », *Scientific Data*, 3, 1, p. 9.