

Approche ontologique du jumeau numérique pour la maintenance énergétique des bâtiments

Ontological Approach to Digital Twin for Building Energy Maintenance

Maxence Calixte^{1,*}, Anabelle Rahhal¹, and Pierre Leclercq¹

¹LUCID Lab, Université de Liège, Liège, Belgique

Résumé. La transformation numérique dans le secteur de la construction, axée sur le BIM, suscite un intérêt croissant pour la maintenance des bâtiments. Notre recherche vise à développer et valider une méthode de maintenance prévisionnelle basée sur un jumeau numérique du bâtiment, mettant l'accent sur les équipements énergétiques. Notre méthodologie comprend la création d'une ontologie pour organiser les données et leur intégration à l'aide d'une base de données orientée graphe (GDB). Cette approche améliore l'interopérabilité BIM grâce aux Linked Data et au développement des outils de maintenance prévisionnelle des installations énergétiques, incluant la détection et le diagnostic des anomalies (FDD). Une série de questions de maintenance a été identifiée pour valider l'approche, démontrant la capacité de l'ontologie à répondre à des questions complexes liées à la maintenance. Bien que la recherche présente des limites, notamment dans l'évaluation complète de l'efficacité de l'ontologie, l'implémentation de la GDB et les perspectives des méthodes de FDD laissent entrevoir des avancées prometteuses pour l'amélioration des processus de maintenance et d'exploitation des bâtiments.

Mots clés. BIM, Maintenance Prévisionnelle, Ontologie, Linked Data, FDD.

Abstract. The digital transformation in construction, focusing on BIM, is driving interest in building maintenance. Our study aims to develop and validate a predictive maintenance method using a building's digital twin, emphasizing energy equipment. Our approach involves creating a building ontology and integrating data using a graph-oriented database (GDB) for enhanced BIM interoperability. This enables predictive maintenance tools, including Fault Detection and Diagnosis (FDD), for energy installations. We identify maintenance queries to validate the approach, showing the ontology's capacity to address complex issues. While limitations exist, the GDB implementation and FDD methods suggest promising advancements in building maintenance.

Keywords. BIM, Predictive Maintenance, Ontology, Linked Data, FDD.

* Corresponding author: maxence.calixte@uliege.be

1 Contexte et Problématique

Le secteur de la construction est caractérisé par une mutation lente comparativement aux autres secteurs industriels, mais il bénéficie aujourd'hui d'une accélération par sa transformation numérique centrée sur la notion de BIM - Building Information Model, Modeling & Management. Celle-ci favorise le partage, la gestion et la synchronisation de l'information bâtiment en vue d'intégrer l'articulation conception-construction-exploitation au bénéfice de productions immobilières performantes sur l'ensemble de leur cycle de vie [1].

Représentant un enjeu majeur en construction, cette dynamique de la "Construction 4.0", se focalise essentiellement sur les phases d'émergence du produit : en conception, les agences d'architecture et bureaux d'ingénierie s'y impliquent, tout en cherchant encore leur retour sur investissement; en construction, les entrepreneurs commencent à identifier le bénéfice de l'approche; en exploitation, par contre, les facility managers, gestionnaires de parcs immobiliers et de leurs installations techniques, restent encore peu concernés par la dynamique BIM [2, 3].

En termes de coûts économiques, sociétaux et environnementaux, les charges d'un parc immobilier reposent pourtant sur la qualité de cette troisième phase d'exploitation : selon la qualité de la réalisation, le coût de fonctionnement dépasse rapidement celui de construction après quelques années.

Le secteur de la promotion immobilière l'a compris et, dans sa position d'intégrateur, il cherche à saisir aujourd'hui, sur base des produits hautement spécifiés qui sont les siens mais aussi de processus innovants à maîtriser, l'opportunité d'un nouveau service : ne plus se contenter de concevoir, construire puis vendre des biens immobiliers mais, à l'instar de la garantie assurée par un constructeur automobile, proposer un service de gestion de maintenance intégrée durant les premières années d'utilisation.

2 Question de recherche

L'objectif de notre recherche est de mettre au point et de valider une méthode d'exploitation et de maintenance via le jumeau numérique du bâtiment, focalisé dans un premier temps sur l'optimisation des processus de maintenance des équipements énergétiques (chauffage, ventilation et climatisation). On cherche à prolonger la durée de vie des équipements à un coût optimal, tout en maintenant leur efficacité énergétique. Par jumeau numérique, on entend l'articulation de 4 sources de données :

- 1) les maquettes BIM multi-métiers et leurs données géométriques (architecture, structure et installations techniques) ;
- 2) les données statiques issues des portails documentaires (par exemple, les BD matériaux et l'ERP du promoteur ou les paramètres de la GMAO - gestion de maintenance) ;
- 3) les données dynamiques, issues en temps réel de l'IoT ;
- 4) l'enrichissement de ces données par des modèles prévisionnels obtenus par simulation thermique dynamique.

Concrètement, il s'agit d'apporter des réponses aux questions de recherche suivantes :

De quoi doit se composer un jumeau numérique en phase d'exploitation ?

Comment l'exploiter pour passer d'une approche traditionnelle de maintenance réactive à une maintenance prévisionnelle ?

Comment exploiter les données multi-sources du BIM au service du facility management énergétique, visant l'identification de défauts, de dérives des installations et de planification d'intervention ?

3 Contexte et problématique

3.1 Le manque d'interopérabilité BIM et l'inclusion du Linked Data

La nécessité d'une démarche collaborative est entravée par le manque d'interopérabilité BIM, ce qui est reconnu dans la pratique professionnelles et dans la littérature [4]. Ce frein à l'interopérabilité s'explique en partie par l'hétérogénéité des données BIM, ainsi selon les métiers les données varient en termes de sémantique, de structure, de logique de modélisation, de granularité et de format. Cette réalité industrielle nous est confirmée sur le terrain par le plus grand constructeur de Wallonie, qui souligne cette hétérogénéité de données et leur dispersion au sein de différents silos. Ce problème est partiellement pris en charge par un format d'échange neutre, l'IFC (*Industry Classes Foundation*, ISO 16739), le standard de facto pour l'industrie du bâtiment. Cependant ni le format neutre du BIM, ni l'utilisation de plateformes BIM collaboratives [4] ne relèvent complètement le défi de l'interopérabilité. Additionnellement, le format IFC a été conçu pour transférer les données du modèle d'un outil à l'autre, mais pas pour être modifié ou utilisé dynamiquement.

À ce jour, la collaboration BIM n'est pas basée sur l'articulation de données à haute granularité, mais elle est encore cantonnée à une concaténation de silos de données. Une nouvelle piste, peu explorée jusque-là, se développe pour aborder le problème collaboratif BIM, celle du Linked Data (LD) [5]. Une étude pilote a étudié les capacités du web sémantique, appliquées à la conception de bâtiments acoustiques étroitement liée aux concepts IFC [6]. Une telle approche permet au processus de vérification des règles d'aller au-delà de la portée du schéma, permettant ainsi des définitions de vues de modèle plus flexibles, qui sont cruciales pour inclure des domaines d'application non traditionnels sous l'égide du BIM. De nombreux développements récents s'appuient sur l'IFC, qui est considéré comme un schéma sous-jacent pour structurer des données, tandis que sa représentation ontologique - IfcOwl [7] offre de meilleures capacités d'interopérabilité et de raisonnement. L'approche ontologique reflète les tendances actuelles de la recherche sur l'utilisation de la connectivité et de la richesse du Web sémantique [8].

3.2 Le développement d'outils numériques pour une gestion de la maintenance des installations énergétiques d'un parc de bâtiments

L'émergence de l'Internet des Objets (IoT) dans les bâtiments a ouvert la voie à une collecte massive de données, favorisant ainsi l'application croissante de techniques de Machine Learning pour la surveillance et la gestion [9, 10]. Différents algorithmes sont utilisés en fonction des applications spécifiques. Par exemple, pour la gestion des systèmes de production d'eau glacée, des algorithmes PCA [11-13], SVM [14-16] ou encore basés sur une classification des réseaux bayésiens [17-18] sont utilisés ; pour les groupes VRV (volume de réfrigérant variable), les algorithmes à base d'arbre de décisions sont privilégiés tandis que la gestion de l'ensemble du système de production/distribution nécessite l'utilisation de réseaux de neurones artificiels [19]. Des méthodes adaptatives sont également développées pour améliorer la gestion du bâtiment [20-23]. Ces approches, regroupées sous le terme de *Fault Detection and Diagnosis* (FDD), permettent une maintenance prévisionnelle en analysant le comportement du bâtiment pour anticiper les pannes, réduisant ainsi le recours à la maintenance corrective [24]. Les méthodes FDD varient selon les connaissances disponibles et les techniques de recherche de défauts, comprenant des approches basées sur une modélisation fine des systèmes ou sur l'historique des données [25, 26].

Les ruptures apportées par les Linked data et le FDD se confirment sur le marché majoritairement basé sur du *Fail & Fix*. Bien que des projets se développent autour de l'IoT et du BIM (difficile d'en faire une liste complète), une analyse ciblée par mots clés montre qu'aucune plateforme ICT pour la maintenance prévisionnelle des bâtiments ne se base sur :

- l'exploitation des technologies de Linked data, qui améliorera significativement la constitution et l'exploitation augmentée des données multiples du bâtiment (*key enabling technology*) ;
- le diagnostic prévisionnel sur base d'un modèle physique enrichi par ces données, qui facilitera grandement l'identification et l'interprétation des dysfonctionnements par des méthodologies de FDD et l'IA.

4 Méthode et proposition

4.1 Méthode de spécification du jumeau numérique

Pour élaborer une méthode de spécification du jumeau numérique en vue de la maintenance prévisionnelle des équipements énergétiques, plusieurs étapes sont nécessaires. La première étape consiste à maîtriser la gestion des données afin de construire une ontologie capable de répondre à divers scénarios de maintenance énergétique des bâtiments.

Dans cette optique, les données issues des scénarios sont confrontées aux informations disponibles dans différentes bases de données, telles que la base de données des matériaux, les maquettes des métiers concernant l'enveloppe, la structure,

le partitionnement et les réseaux, les ERP d'entreprise ainsi que d'autres schémas de données techniques. Ces données sont ensuite complétées par les éléments spécifiques manquants, les données collectées par l'IoT équipant les bâtiments étudiés, des données simulées, ainsi que les retours des systèmes de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO).

Pour organiser cette multitude de données, une ontologie est élaborée, permettant de gérer les relations entre ces données malgré leurs localisations, formats et disponibilités disparates, selon le principe des données liées appliqué au bâtiment.

La deuxième étape consiste à développer une plateforme composée d'un module opérationnel de base de données orientée graphe (GDB), qui constitue la partie active de l'ontologie. Ce module utilise le vocabulaire des "données liées" pour assurer une interopérabilité sémantique des informations échangées entre les différentes sources.

Enfin, la troisième étape assure la validation du comportement de la plateforme par un processus de sollicitation par alertes, permettant de vérifier la qualité de ses réponses. Cette étape sera étayée par un tableau de bord assurant les interfaces de communication homme-machine, facilitant le pilotage et l'interconnexion des modules mentionnés, en relation avec des vues ciblées dans les maquettes BIM.

4.2 Construction de l'ontologie

4.2.1 Définition d'une ontologie

Dans le domaine de l'informatique, une ontologie est une spécification formelle et explicite d'une conceptualisation partagée [27]. Cette conceptualisation consiste en une vue abstraite et simplifiée du monde, exprimée dans un langage sans ambiguïté et compréhensible par une machine. Concrètement, une ontologie décrit les concepts d'un domaine à travers des classes, des relations entre celles-ci, des propriétés et des restrictions. Lorsqu'elle est associée à des instances individuelles de classes, elle constitue un graphe de connaissances [28].

L'ontologie est développée selon la boucle de développement itératif classique de 6 étapes [29] ; déterminer le domaine et l'application de l'ontologie, énumérer les termes importants de l'ontologie, définir les classes et leurs hiérarchies, définir les propriétés des classes, définir les restrictions sur les propriétés et créer des instances. Nous portons une attention particulière à modéliser les concepts de base nécessaires à la maintenance énergétique, tout en évitant de complexifier inutilement le processus de création de notre ontologie.

4.2.2 Analyse du format IFC pour son intégration de notre ontologie

Au projet s'impose l'utilisation de maquettes au format IFC en tant qu'éléments d'entrée du système. L'IFC est un schéma de données orienté objet et il permet de décrire des objets constructifs ainsi que leurs propriétés dimensionnelles et matérielles et leurs relations. Bien que le schéma IFC ne soit pas défini comme une ontologie à proprement parler, il offre une description conceptuelle des éléments du bâtiment et de leurs interactions.

L'examen du schéma IFC a révélé deux classes d'éléments cruciaux pour la maintenance des équipements énergétiques (CVC). La première classe regroupe les éléments de localisation tels que les sites, les bâtiments, les locaux, qui définissent la structure spatiale d'un projet. La seconde classe englobe les éléments énergétiques tels que les chaudières, les systèmes de ventilation, les tuyaux, les capteurs, qui définissent les principaux éléments techniques de la maintenance énergétique du bâtiment. Ces deux classes revêtent une importance particulière dans l'élaboration de l'ontologie car elles regroupent des notions essentielles de localisation des éléments de maintenance dans l'espace.

On peut noter que si les caractéristiques des éléments physiques de la construction (matériaux, dimensions, etc.) sont nécessaires aux méthodes de simulation et FDD, elles n'ont pas besoin d'être intégrées dans l'ontologie en tant que telle qui se concentre sur les équipements énergétiques. De plus ces caractéristiques sont présentes dans la maquette IFC et seront ainsi à disposition des utilisateurs de la plateforme finale.

4.2.3 Élaboration de l'ontologie

Les termes essentiels de l'ontologie émergent principalement des discussions tenues entre les partenaires du projet, ainsi que des expériences individuelles et de l'analyse des données disponibles (telles que les maquettes, les documents techniques, les rapports d'entretiens, etc.). Ces éléments, de diverses natures, se sont naturellement regroupés en cinq catégories distinctes :

- Les acteurs, incluant les installateurs, les réparateurs, les chauffagistes, etc.
- Les éléments de localisation, couvrant les sites, les bâtiments, les étages, les zones thermiques, les appartements, les adresses, etc.
- Les systèmes énergétiques, comprenant les chaudières, les systèmes de ventilation mécanique contrôlée (VMC), les capteurs, les tuyaux, les conduites, les rendements, les modèles/marques, les régulateurs, etc.
- Les événements, tels que les opérations de maintenance, les alertes, les pannes, les entretiens, les dérives, etc.
- Les sources de données, comme les maquettes, les documents, les bases de données, etc.

Ensuite, nous définissons des classes et leur organisation hiérarchique à partir de ces termes. Certains de ces termes ne correspondent pas à des classes à proprement parler ; plusieurs d'entre eux sont des propriétés, comme l'adresse d'un bâtiment ou le rendement d'une chaudière. Les cinq catégories sont représentées dans la hiérarchie sous forme de classes abstraites. Pour ce qui est des éléments de localisation et les composants énergétiques, notre classification reflète une version simplifiée du schéma IFC. Cette organisation nous permet d'assurer une correspondance entre les éléments modélisés de la maquette numérique et les données les concernant. Les propriétés des classes sont ensuite établies. On les divise en deux catégories : les attributs reliant un littéral à une classe et les relations reliant deux classes entres-elles. Les restrictions sur les propriétés sont établies au fur et à mesure du développement de l'ontologie.

La **Fig. 1** représente le schéma de l'ontologie. Il reprend les différentes classes et leur hiérarchie ainsi que leurs relations. Certains attributs sont annotés en dessous de leurs classes mais la plupart ne sont pas spécifiés afin de garder le schéma lisible.

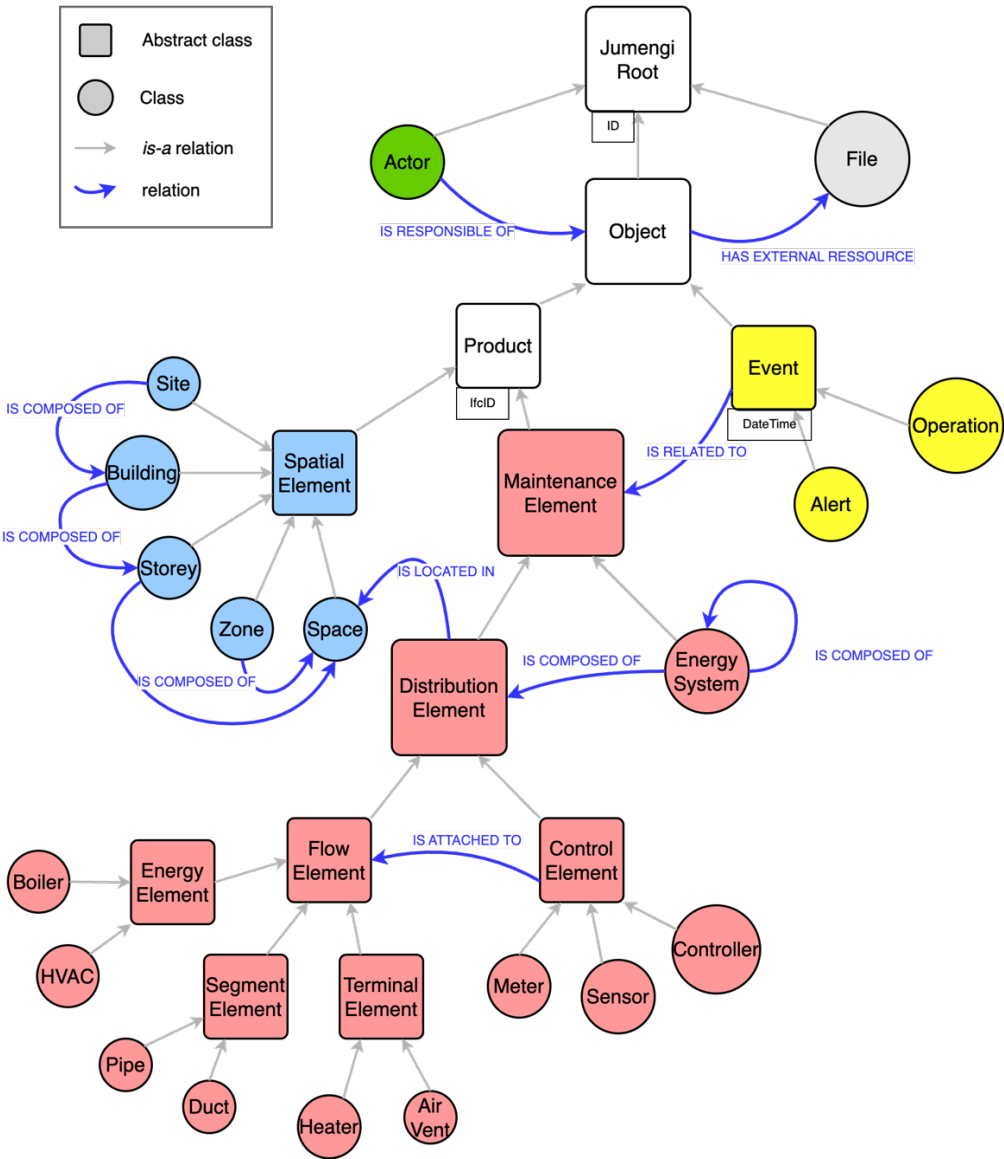


Fig. 1. Schéma de l'ontologie

4.2.4 *Instanciation par la technologie de base de données orientée graphe (GDB)*

L'ontologie établie est mise en œuvre par le biais d'une technologie de base de données graphes (GDB) afin d'instancier les données et de tester les requêtes qui y sont associées. La force principale de cette technologie est la modélisation des données. Celle-ci est

bien plus proche du monde réel sous forme d'un graphe qu'une modélisation classique en tables normalisées dans une base de données relationnelle. Elle assure aussi une grande flexibilité des requêtes et permet un développement incrémental sans imposition d'un schéma rigide, ce qui correspond davantage à la réalité du terrain d'un projet de recherche.

Une application concrète de la GDB réside dans l'exploitation d'un graphe de connaissances virtuel (Virtual Knowledge Graph), qui agit comme une couche d'intégration des données (data integration layer), en provenance de divers silos d'informations tels que les maquettes, les capteurs, les documents techniques, etc. (Fig. 2.). Cette approche s'appuie sur l'ontologie préalablement établie. La technologie GDB choisie est Neo4J (Fig. 3.), en raison de sa grande compatibilité avec d'autres systèmes, de sa documentation étendue, de sa communauté active, de sa facilité de prise en main et de son modèle open-source.

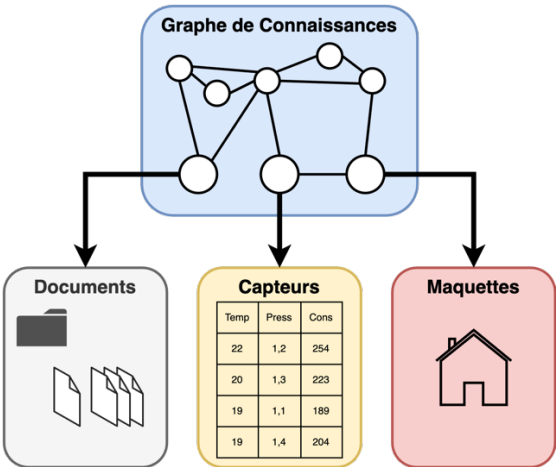


Fig. 2. Schéma de la couche d'intégration des données.

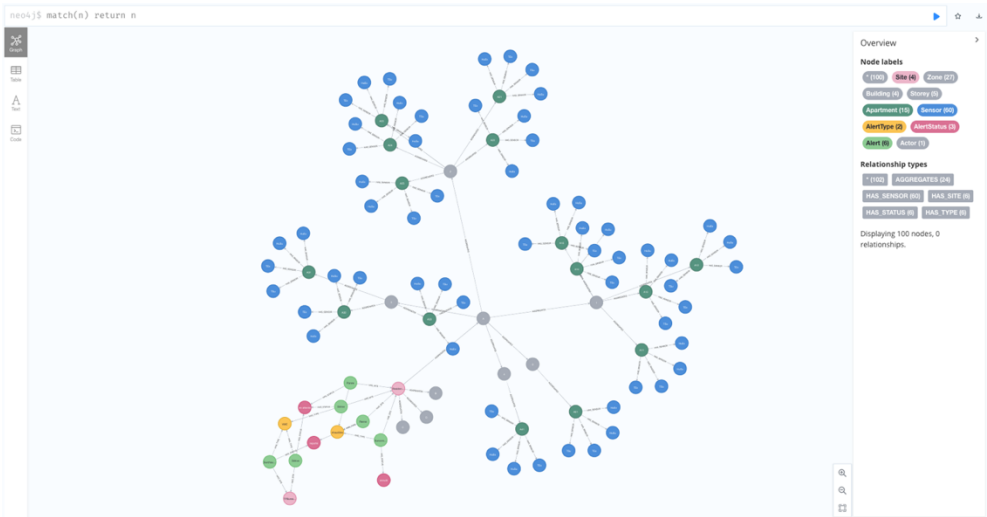


Fig. 3. Capture d'écran de l'outil Neo4j Browser.

5 Validation

Pour valider notre approche, nous avons utilisés deux *use-cases*, regroupant un bâtiment résidentiel de 42 logements et des bureaux d’une superficie de 3140 m² en Belgique. Ces *use-cases* ont été choisis pour le développement de la plate-forme, tandis que deux autres cas seront utilisés pour des tests de validation. Cette démarche s’inscrit dans le cadre de l’intégration globale du projet visant à élaborer un outil de type « *dashboard* » permettant la surveillance d’un bâtiment via son jumeau numérique. Ce tableau de bord sera principalement utilisé pour la gestion des alertes de maintenance prévisionnelle, générées par simulation et méthodes FDD, alimentées par la GDB reposant sur l’ontologie.

En guise de démonstration, une liste non exhaustive de questions (une vingtaine) auxquelles l’ontologie devrait permettre de répondre est dressée. Elles proviennent d’un retour d’expérience de nos partenaires industriels et de l’analyse de différents rapports d’interventions et de maintenance. En voici quelques-unes :

- *Quelle est la chaudière qui alimente l’appartement A ? Quelle est sa puissance ? Quelle est sa fiche technique ?* (Fig. 4 gauche)
- *Quel est le taux d’humidité relevé par les capteurs lors des 3 derniers mois sur le système de ventilation du site ? Y’a-t-il eu une intervention durant cette période ? Si oui, quel technicien est intervenu ?* (Fig. 4 droite)

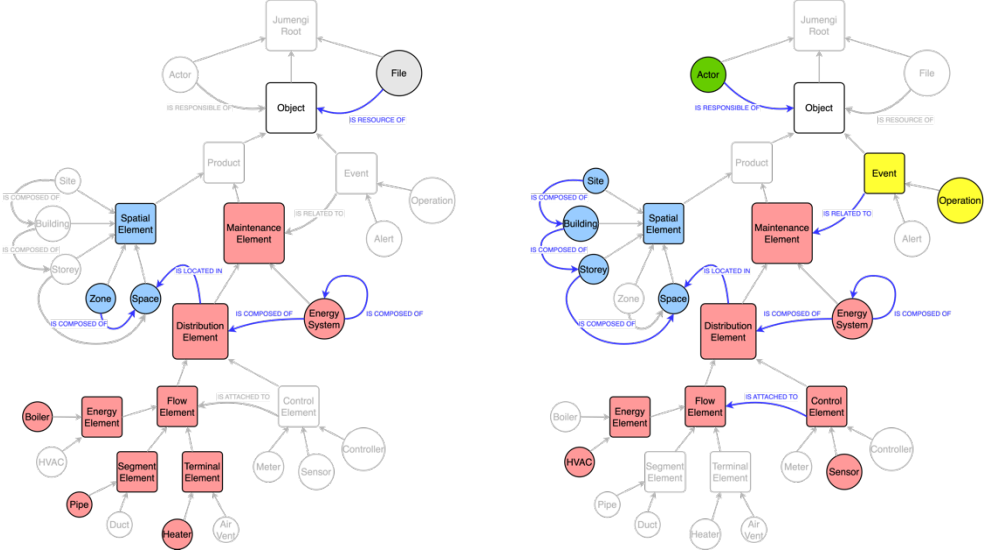


Fig. 4. Chemin de mobilisation des données liées pour répondre aux questions formulées plus haut.

Répondre à ces questions implique de regrouper des données provenant de diverses sources : la maquette (position dans l’espace, propriétés des objets), les fiches techniques et rapports d’intervention, ainsi que les bases de données des capteurs. Ces données ne sont initialement pas liées, rendant leur recherche manuelle fastidieuse. L’ontologie proposée permet de réunir ces différents silos de données grâce à ses liens. La GDB qui

instancie l'ontologie utilise un langage de requête graphique (*graph query language*) pour répondre efficacement à ce genre de questions.

Cette ontologie démontre ainsi sa capacité à relier ces données jusqu'alors séparées et disjointes, permettant ainsi de générer des réponses complètes et de proposer des ensembles de données cohérents et pertinents dans la résolution des problèmes de maintenance.

6 Conclusion

Alors que la dynamique de la "Construction 4.0" progresse principalement dans les phases de conception et de construction, la phase d'exploitation des bâtiments reste largement en retrait, malgré son impact significatif sur les coûts économiques, sociétaux et environnementaux à long terme. Dans ce contexte, notre projet développe et valide une méthode de maintenance prévisionnelle à l'aide d'un jumeau numérique du bâtiment, en se concentrant initialement sur les équipements énergétiques. Cette approche repose sur l'intégration de données provenant de diverses sources, telles que les maquettes BIM, les données dynamiques, ainsi que les modèles prévisionnels. Nous proposons une méthodologie de construction d'une ontologie afin d'organiser les données et l'instanciation de celle-ci à l'aide d'une technologie de base de données orientée graphe (GDB). En outre, nous avons utilisé deux *use-cases* ainsi qu'une vingtaine de questions-scénario pour valider notre approche, démontrant ainsi la capacité de notre ontologie à répondre à des questions complexes liées à la maintenance.

6.1 Limites et Perspectives

La recherche présente certaines limites et ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de l'ontologie et son intégration dans la plateforme de maintenance prévisionnelle.

Bien que les questions de maintenance identifiées permettent de valider les liens entre les données dans l'ontologie, elles ne permettent pas encore d'évaluer pleinement son efficacité et ses performances dans la plateforme. L'approche adoptée pour concevoir l'ontologie se veut initialement minimaliste, mais elle pourra être complexifiée au besoin pour répondre aux exigences qui seront rencontrées lors de la suite du projet.

Cependant, l'implémentation de la GDB montre des perspectives prometteuses. Les méthodes de FDD sont appelées à être développées, notamment la notion d'alerte et de dérive, qui constitueront une étape importante pour la mise en œuvre de la maintenance prévisionnelle. Ce module sera également connecté à des simulateurs et des optimiseurs existants, visant à établir un modèle "*baseline*" du bâtiment, ouvrant ainsi la voie à une amélioration continue des processus de maintenance et d'exploitation des bâtiments.

6.2 Remerciements

Ce travail de recherche est financé par le Service public de Wallonie dans le cadre du projet Jumengi (Jumeau numérique et modèle énergétique pour la gestion immobilière), qui se développe en partenariat avec le centre de recherche en aéronautique agréé Cenaero et l'entreprise de construction belge Thomas & Piron Bâtiment.

References

1. N. Hoyet, F. Duchene, M. De Fouquet, *BIM et architecture : programmation, conception, construction, exploitation*, 3 (2016)
2. D.K Abideen, A. Yunusa-Kaltungo, P. Manu, C. Cheung, Sustainability, *A Systematic Review of the Extent to Which BIM Is Integrated into Operation and Maintenance*, **14** (2022)
3. R. Kreider, J. Messner, C. Dubler, Proceedings of the 6th International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC), *Determining The Frequency And Impact of Applying BIM For Different Purposes On Projects*, 9-11 (2010).
4. Z. Z. Hu, X. Y. Zhang, H. W. Wang, M. Kassem, Automation in Construction, *Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools*, **66**, 29-42 (2016).
5. A. M. Roxin, *Vocabulaires de données liées pour le BIM. Le BIM entre recherche et industrialisation : Ingénierie et architecture, enseignement et recherche*, 55 (2019).
6. P. Pauwels, D. Van Deursen, R. Verstraeten, J. De Roo, R. De Meyer, R. Van de Walle, J. Van Campenhout, Autom. Constr., *A semantic rule checking environment for building performance checking*, **20**, 506-5018 (2011).
7. P. Pauwels, W. Terkaj, Autom. Constr., *EXPRESS to OWL for construction industry: towards a recommendable and usable ifcOWL ontology*, **63**, 100-133 (2016).
8. P. Pauwels, S. Zhang, Y.-C. Lee, Autom. Constr., *Semantic web technologies in AEC industry: a literature overview*, **73**, 145-165 (2017).
9. R. Khan, S. U. Khan, R. Zaheer and S. Khan, 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, *Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges*, 257-260 (2012).
10. Z. Yu, F. Haghighat, B.C.M. Fung, Sus- tain. Cities Soc., *Advances and challenges in building engineering and data mining applications for energy-efficient communities*, **25**, 33-38 (2016).
11. N. Cotrufo, R. Zmeureanu, Energy Build., *PCA-based method of soft fault detection and identification for the ongoing commissioning of chillers*, **130**, 443-452 (2016).
12. A. Beghi, R. Brignoli, L. Cecchinato, G. Menegazzo, M. Rampazzo, F. Simmini, Control Eng. Pract., *Data-driven fault detection and diagnosis for HVAC water chillers*, **53**, 79-91 (2016).
13. G. Li, Y. Hu, H. Chen, L. Shen, H. Li, M. Hu, J. Liu, K. Sun, Energy Build., *An improved fault detection method for incipient centrifugal chiller faults using the PCA-R-SVDD algorithm*, **116**, 104-113 (2016).
14. K. Yan, W. Shen, T. Mulumba, A. Afshari, Energy Build., *ARX model based fault detection and diagnosis for chillers using support vector machines*, **81**, 287-295 (2014) 287–295.
15. K. Yan, Z. Ji, W. Shen, Neurocomputing, *Online fault detection methods for chillers combining extended kalman filter and recursive one-class SVM*, **228**, 205– 212 (2017).

16. K. Yan, L. Ma, Y. Dai, W. Shen, Z. Ji, D. Xie, *Int. J. Refrig.*, *Cost-sensitive and sequential feature selection for chiller fault detection and diagnosis*, **86**, 401–409 (2018).
17. M. Bonvini, M.D. Sohn, J. Granderson, M. Wetter, M.A. Piette, *Appl. Energy*, *Robust on-line fault detection diagnosis for HVAC components based on nonlinear state estimation techniques*, **124**, 156–166 (2014).
18. S. He, Z. Wang, X. Gu, Z. Yan, *Appl. Therm. Eng.*, *Fault detection and diagnosis of chiller using Bayesian network classifier with probabilistic boundary*, **107**, 37–47 (2016).
19. Z. Du, B. Fan, X. Jin, J. Chi, *Build. Environ.*, *Fault detection and diagnosis for buildings and HVAC systems using combined neural networks and subtractive clustering analysis*, **73**, 1–11 (2014).
20. R. May, *The reinforcement learning method : A feasible and sustainable control strategy for efficient occupant-centred building operation in smart cities*, (2019).
21. J.Y. Park, T. Dougherty, H. Fritz, Z. Nagy, *Build. Environ.*, *LightLearn: An adaptive and occupant centered controller for lighting based on reinforcement learning*, **147**, 397–414 (2019).
22. Z. Wang, T. Hong, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, *Learning occupants' indoor comfort temperature through a Bayesian inference approach for office buildings in United States*, (2019).
23. S. Lee, P. Karava, A. Tzempelikos, I. Bilonis, *Build. Environ.*, *Inference of thermal preference profiles for personalized thermal environments with actual building occupants*, **148**, 714–729 (2019).
24. G. Li, H. Chen, Y. Hu, J. Wang, Y. Guo, J. Liu, H. Li, R. Huang, H. Lv, J. Li, *Appl. Therm. Eng.*, *An improved decision tree-based fault diagnosis method for practical variable refrigerant flow system using virtual sensor-based fault indicators*, **129**, 1292–1303 (2018).
25. S. Wu, J.Q. Sun, *Energy Build.*, *A top-down strategy with temporal and spatial partition for fault detection and diagnosis of building HVAC systems*, **43**, 2134–2139 (2011).
26. B. Fan, Z. Du, X. Jin, X. Yang, Y. Guo, *Build. Environ.*, *A hybrid FDD strategy for local system of AHU based on artificial neural network and wavelet analysis*, **45**, 2698–2708 (2010).
27. R. Studer, R. Benjamins, D. Fensel, *Data & Knowledge Engineering*, *Knowledge engineering: Principles and methods*, **25**, 161-198 (1998).
28. N. Noy, D. McGuinness, *Knowledge Systems Laboratory*, *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*, **32**, (2001).
29. A. Hogan, E. Blomqvist, C. Cochez, G. Melo, S. Gutierrez, J. Labra Gayo, S. Navigli, A. C. Ngonga Ngomo, S. Polleres, A. Rula, J. Schmelzeisen, S. Staab, A. Zimmermann, *ACM Comput. Surv.*, *Knowledge Graphs*, **54**, (2021).