

Exploitation du « Historic Building Information Modeling » pour la conservation du patrimoine architectural colonial et post-colonial : cas des barrages en République Démocratique du Congo

Application of Historic Building Information Modeling for the conservation of Colonial and Post-Colonial Architectural Heritage: Case study of Dams in the Democratic Republic of Congo

David Kisalu Nzundu¹, David Mwila Bwalya¹

¹ Département de Génie Civil, Faculté de Sciences Technologiques, Université Nouveaux Horizons, Lubumbashi, République Démocratique du Congo, davidkisalu@outlook.fr, david.mwila@unhorizons.org

RÉSUMÉ. Cette étude examine le rôle du Historic Building Information Modeling (HBIM) dans la préservation des barrages coloniaux et post-coloniaux, en soulignant son potentiel pour la conservation et la gestion. En adoptant une approche intégrative, la recherche explore l'importance historique de ces barrages, évalue les méthodologies existantes et propose un workflow HBIM adapté à la République Démocratique du Congo (RDC). Ce workflow insiste sur l'intégration des données issues des technologies géomatiques, des attributs du patrimoine culturel et de la modélisation numérique. Des études de cas portant sur des barrages emblématiques, associées à des éléments historiques, démontrent la faisabilité et l'adaptabilité du HBIM dans ce contexte particulier. Le cadre proposé offre aux acteurs un outil robuste pour préserver efficacement les infrastructures patrimoniales congolaises tout en favorisant un développement durable.

ABSTRACT. This study investigates the role of Historic Building Information Modeling (HBIM) in preserving colonial and post-colonial dams, highlighting its potential for conservation and management. Using an integrative approach, the research explores the historical significance of these dams, evaluates existing methodologies, and proposes a tailored HBIM workflow for the Democratic Republic of Congo (DRC). The workflow emphasizes data integration from geomatics technologies, cultural heritage attributes, and digital modeling. Case studies of iconic dams, paired with historical insights, showcase the feasibility and adaptability of HBIM in this unique context. The proposed framework offers a robust tool for stakeholders to preserve Congolese heritage infrastructure efficiently while fostering sustainable development.

MOTS-CLÉS. HBIM, barrages coloniaux et post-coloniaux, patrimoine culturel, géomatique, workflow, préservation des infrastructures, RDC.

KEYWORDS. HBIM, colonial and post-colonial dams, cultural heritage, geomatics, workflow, infrastructure preservation, DRC.

1. Introduction

La République Démocratique du Congo (RDC) possède un riche patrimoine architectural façonné par son passé colonial, particulièrement visible dans ses anciens barrages. Ces infrastructures ont non seulement facilité la croissance économique, mais elles se présentent également comme des prouesses d'ingénierie de leur époque. La préservation de ces biens est primordiale, bien que leur état actuel témoigne d'un certain abandon dû aux contraintes de ressources et à une documentation insuffisante. Le Historic Building Information Modeling (HBIM) offre une solution prometteuse en alliant outils numériques avancés et pratiques de conservation du patrimoine culturel.

Le HBIM est une méthode numérique de modélisation patrimoniale récente centrée sur la création des représentations tridimensionnelles riches en données d'ouvrages historiques, en combinant des relevés géométriques (par laser scanner, photogrammétrie, etc.) avec des informations historiques, matérielles et structurelles. À la différence du Building Information Modeling (BIM) classique utilisé pour les bâtiments neufs, le HBIM est spécifiquement focalisé sur les anciennes constructions dont la documentation originale est souvent absente ou incomplète. Il permet ainsi la reconstruction virtuelle de l'existant facilitant ainsi la documentation, la gestion et la restauration du patrimoine architecturale en y intégrant des métadonnées sur les matériaux, l'état de conservation, les techniques de construction, et les interventions passées. Il offre ainsi la possibilité d'avoir une conservation préventive, d'analyser les éléments structuraux, de gérer le cycle de vie des bâtiments patrimoniaux, et de transmettre le savoir architectural à travers une base de données accessible et collaborative.

Pour un pays comme la RDC, où de nombreuses infrastructures patrimoniales souffrent de dégradation et de documentation lacunaire, le HBIM représente un outil essentiel pour relier mémoire historique, restauration physique et développement durable.

Cet article se développe sur plusieurs parties complémentaires allant de la revue de littérature sur l'évolution du HBIM, ses méthodes de mise en œuvre, ses outils (logiciels, capteurs, LoD) et ses limites, tout en mettant en évidence son rôle dans la conservation du patrimoine. Une étude de cas, basée sur un exemple européen, illustre la précision et la pertinence des technologies géomatiques appliquées au HBIM. Ensuite, l'analyse se recentre sur le contexte congolais à travers l'histoire, la situation actuelle des barrages, et l'enjeu de leur conservation. Un workflow est proposé, combinant acquisition de données, modélisation, analyse structurelle, documentation collaborative et formation locale. Enfin, la discussion évalue les apports méthodologiques de cette recherche, ses perspectives concrètes pour la RDC, ainsi que les contraintes techniques, économiques et politiques. L'objectif global est d'établir un lien fort entre patrimoine, technologie et développement durable, en adaptant des outils innovants à un contexte historiquement et économiquement spécifique.

2. Revue de Littérature : Historic Building Information Modeling (HBIM)

2.1. Évolution des Méthodologies HBIM

Le concept de HBIM a été initialement proposé pour améliorer la documentation et la gestion des bâtiments historiques en intégrant les données de relevé dans des modèles paramétriques. Par exemple, Murphy et al. [MUR 09] ont décrit une méthode de capture de données à distance utilisant la numérisation laser et la photogrammétrie, permettant ainsi de créer des modèles orthographiques et 3D précis qui documentent les caractéristiques structurelles et matérielles. L'intégration de la numérisation laser avec la modélisation photo-numérique génère des nuages de points servant de base à la construction de modèles 3D paramétriques, encodant à la fois la surface visible et des informations sur les méthodes de construction et les matériaux.

Des avancées ultérieures dans le HBIM ont cherché à relever la complexité des structures historiques. Yang et al. [YAN 20] ont notamment mis en avant l'intégration du HBIM avec d'autres technologies de l'information, comme les systèmes d'information géographique (SIG) et les cadres ontologiques, afin d'améliorer la connaissance sémantique et l'analyse structurelle. Cependant, des défis demeurent quant à l'automatisation du processus de conversion des relevés en modèles HBIM, surtout pour des géométries irrégulières et complexes.

2.2. Enrichissement Sémantique et Ontologie dans le HBIM

Un aspect clé du HBIM est sa capacité à incorporer des informations sémantiques, enrichissant le modèle avec des contextes historiques, sociaux et environnementaux. Selon Yang et al. [YAN 20], les cadres basés sur l'ontologie facilitent cette intégration sémantique en permettant des requêtes avancées

et une interopérabilité entre les plateformes BIM et SIG. Des outils tels qu'Autodesk Revit, associés à des éditeurs d'ontologies comme Protégé, permettent le développement de modèles HBIM riches en connaissances.

2.3. Automatisation et Solutions Open Source

La nature laborieuse de la modélisation HBIM a encouragé le développement de solutions visant à automatiser le processus. Bien que des outils commerciaux tels que ClearEdge3D Edgewise et Leica CloudWorx aient été créés pour faciliter la conversion des nuages de points en modèles BIM, ces solutions restent souvent limitées aux géométries régulières. L'automatisation, notamment par l'utilisation d'algorithmes développés en interne, montre des progrès pour reconstruire des structures planes et cylindriques, mais peine face aux formes irrégulières [YAN 20].

Des solutions open source, telles que FreeCAD, représentent une voie prometteuse pour démocratiser le HBIM. Diara [DIA 22] souligne les avantages de FreeCAD en termes de flexibilité, d'accessibilité et de compatibilité avec divers formats (comme l'IFC). Les plugins et bibliothèques de FreeCAD permettent la modélisation paramétrique et l'intégration des données de relevé, bien que l'utilisation de ces solutions demande une expertise en personnalisation logicielle et en Scripting.

2.4. Niveaux de Développement (LoD) dans le HBIM

La finesse des modèles HBIM est souvent définie par des Niveaux de Développement (LoD), allant de modèles simplifiés (LoD 200) à des modèles très détaillés (LoD 400) capturant les irrégularités géométriques et les compositions matérielles. Brusaporci et al. [BRU 18] proposent un cadre de sémantisation HBIM qui adapte le LoD aux caractéristiques du bâtiment et aux objectifs de l'étude. Par exemple, un LoD 200 peut être utilisé pour la planification préliminaire de la conservation, tandis qu'un LoD 400 sera réservé aux projets de restauration détaillée.

2.5. Intégration avec les Pratiques de Conservation

Le HBIM ne se contente pas de documenter le patrimoine ; il facilite également la planification des activités de conservation et de restauration. Bruno et al. [BRU 19] ont démontré l'intégration du BIM avec des bases de données relationnelles pour gérer l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment. En liant des modèles 3D à des métadonnées, ces systèmes permettent des mises à jour et des requêtes efficaces, favorisant la collaboration interdisciplinaire entre architectes, historiens et conservateurs. Les métadonnées issues des relevés, qui documentent la précision et le processus de collecte, renforcent la fiabilité des modèles HBIM.

2.6. Défis et Perspectives Futures

Malgré ses avantages, le HBIM doit surmonter plusieurs limites. L'absence de normalisation dans la modélisation des structures historiques complique l'interopérabilité entre différentes plateformes logicielles. Par ailleurs, la dimension manuelle du processus de conversion (scan-to-HBIM) limite la scalabilité, surtout pour des projets de grande envergure. L'automatisation et l'apprentissage automatique sont perçus comme essentiels pour relever ces défis, notamment pour l'identification et la modélisation des éléments architecturaux à partir des nuages de points.

L'intégration du HBIM avec des technologies avancées, telles que la réalité augmentée (AR) et la réalité virtuelle (VR), offre des perspectives prometteuses pour impliquer les parties prenantes en proposant des expériences immersives des sites patrimoniaux. Par ailleurs, les plateformes web et le cloud-computing devraient contribuer à élargir l'accès aux outils HBIM et à réduire les dépendances matérielles.

3. HBIM du Patrimoine : Analyse d'une Étude de Cas

3.1. Introduction

Le Historic Building Information Modeling (HBIM) représente un domaine en pleine expansion dans la préservation numérique, la conservation architecturale et la modélisation 3D avancée. L'intégration de technologies géomatiques, telles que la numérisation laser terrestre (TLS) et la numérisation laser portable (PLS), avec les méthodologies HBIM permet une re-présentation précise des structures patrimoniales complexes. L'objectif est non seulement de préserver numériquement ces monuments historiques, mais aussi de les rendre accessibles pour la restauration, la recherche et l'enseignement.

La démarche « Scan-to-BIM » exploite des technologies telles que le LiDAR, la photogrammétrie et la Structure from Motion (SfM) pour produire des représentations 3D précises des bâtiments. Ces méthodes répondent aux défis posés par des bâtiments historiques aux géométries complexes, aux matériaux hétérogènes et à une documentation souvent insuffisante.

3.2. Travaux Connexes

L'application des technologies TLS et PLS dans le HBIM a fait l'objet de nombreuses études. Parmi celles-ci, Moyano et al. [MOY 22] ont analysé l'église San Miguel, soulignant la précision des données de nuages de points, tandis que Landes et al. [LAN 15] ont modélisé en 3D la chapelle Saint-Laurent de la cathédrale de Strasbourg. Quattrini et al. [QUA 15] ont démontré une modélisation sémantique de haute qualité en HBIM via le TLS, et Dlesk et al. [DLE 22] ont comparé les scanners Leica BLK360 et BLK2GO pour leur aptitude à capturer des éléments architecturaux détaillés.

3.3. Étude de Cas : L'Église de l'Annonciation à Séville

Cette étude de cas explore l'utilisation des technologies TLS et PLS dans l'Église de l'Annonciation, un monument de la Renaissance situé à Séville, en Espagne. Deux scanners ont été utilisés : le BLK360 et le RIEGL VZ400i. L'étude s'est concentrée sur deux niveaux d'analyse :

- Une analyse détaillée de l'autel de San Juan Bautista, structure complexe et d'une grande importance artistique.
- Une analyse plus large du nave centrale de l'église, s'étendant sur 45 mètres.

3.4. Méthodologie

Acquisition des Données : Le scanner BLK360 a été déployé avec le logiciel Cyclone REGISTER 360, tandis que le RIEGL VZ400i a utilisé SisCAN PRO. Des points de contrôle au sol ont été mesurés à l'aide d'une station totale Leica Flexline TS02 et d'un télémètre laser DISTO S910. Les données ont ensuite été traitées pour produire des nuages de points interopérables, alignés et analysés à l'aide du logiciel CloudCompare.

Comparaison des Nuages de Points : La méthode de l'algorithme Iterative Closest Point (ICP) a été utilisée pour comparer les nuages de points, afin d'évaluer les écarts et la précision de leur alignement. Un filtrage des bruits et des valeurs aberrantes a été réalisé pour améliorer la précision.

Indicateurs d'Évaluation : Les indicateurs utilisés incluent :

- L'écart moyen entre les nuages de points.
- L'écart-type et l'erreur quadratique moyenne (RMS).
- La densité de points par millimètre carré.

Résultats et Discussion : L'étude a révélé que l'écart moyen entre le BLK360 et le RIEGL VZ400i était de 16 mm pour des longueurs allant jusqu'à 50 mètres. De plus, le BLK360 présentait une

répartition plus dispersée des points par rapport à la distribution uniforme et coplanaire observée avec le RIEGL VZ400i. Pour des géométries complexes, le RIEGL VZ400i offrait une densité de points supérieure (1 point par 41 mm²) contre 1 point par 17 mm² pour le BLK360, bien que les performances des deux scanners se rapprochent pour les surfaces planes.

4. Le Potentiel du HBIM pour la Préservation de l'Histoire et de la Fonctionnalité des Barrages en RDC

Le patrimoine congolais des barrages illustre à la fois l'ambition passée coloniale belge et le potentiel hydroélectrique du pays. Ces barrages ont été principalement conçus pour fournir l'énergie à l'industrie minière et aux centres urbains stratégiques. C'est le cas des structures emblématiques tels que Inga I et Inga II, qui ont joué un rôle majeur dans le développement des infrastructures et des systèmes énergétiques de la RDC. Cependant, cette orientation a laissé une grande partie du pays sans accès à l'électricité.

Le potentiel hydroélectrique est estimé à 100 GW. Malgré ce potentiel, l'accès à l'énergie hydroélectrique reste extrêmement limité. En 2020, seulement 1,6 million de ménages (environ 16 % de la population) avait accès à l'électricité, conduisant à une situation où plus de 80 % de la population restait sans électricité. Si les efforts d'électrification ne s'intensifient pas, jusqu'à 84 millions de personnes pourraient encore vivre sans accès à l'électricité d'ici 2030 [BAN 20].

Cette situation s'accroît également par une croissance démographique rapide et une urbanisation accélérée dans les grandes métropoles et une demande d'électricité des mines, estimée à 7 000 GWh en 2018 avec une attente en besoin de 11 000 GWh d'ici 2030, augmentant ainsi une pression sur les infrastructures énergétiques existantes [BAN 20].

Les infrastructures hydroélectriques existantes ayant un âge moyen de 43 ans sont pour la plupart vieillissantes, avec une grande partie de leur capacité n'ayant jamais été réhabilitée depuis leur mise en service. Le vieillissement des installations, associé à des défis de gestion et de maintenance, a conduit à une réduction significative de la production électrique disponible [BAN 20].

Dans ce contexte, la préservation et la gestion de barrages par l'intégration du HBIM procurent des perspectives pertinentes. En s'appuyant sur des technologies géomatiques avancées et des données historiques, le HBIM ne sera pas simplement un outil technologique mais également un levier stratégique permettant non seulement de valoriser ces infrastructures monumentales, mais aussi d'améliorer leur efficacité opérationnelle, de soutenir un développement durable.

En intégrant les dimensions historiques, architecturales et fonctionnelles dans un modèle numérique riche en données, le HBIM permettra de :

- Reconstituer les caractéristiques techniques et matérielles des barrages même en l'absence de plans complets ;
- Centraliser les informations dans une base de données collaborative accessible à distance ;
- Mettre en place une maintenance préventive et prédictive grâce à l'intégration de capteurs et d'analyses structurelles ;
- Renforcer les formations techniques dans les domaines de l'architecture, de l'ingénierie, de la conservation du patrimoine et de l'aménagement du territoire.

Cette approche apporte également un partage historique commun vu que les barrages ne sont pas seulement des objets techniques, mais aussi des symboles d'une époque, de savoir-faire et de relations entre le Congo et la Belgique. La rigueur et l'innovation dans leur préservation révélera une volonté tant stratégique que scientifique de protéger un patrimoine commun, tout en le réinscrivant dans les dynamiques contemporaines de développement.

C'est dans ce cadre que cette section explore le contexte historique des barrages en RDC, avant de présenter les cas emblématiques et le rôle structurant que le HBIM pourrait y jouer.

4.1. Contexte Historique des Barrages en RDC

4.1.1. Développements Précoces à l'Époque Coloniale

Pendant la période coloniale belge, le développement des infrastructures constituait le cœur de l'expansion économique et industrielle. Le fleuve Congo et ses affluents, dotés d'un potentiel hydroélectrique exceptionnel, ont été au centre de ces efforts. L'un des projets les plus ambitieux fut l'identification du site d'Inga dans les années 1950, choisi pour ses avantages hydrologiques, notamment une forte déclivité et un débit important, posant ainsi les bases des futurs projets hydroélectriques [PIR 57].

4.1.2. Les Barrages d'Inga : Merveilles d'Ingénierie

Les barrages d'Inga — Inga I et Inga II (voir Figure 1) — sont les structures hydroélectriques les plus remarquables de la RDC. Conçus dans les années 1970 pour répondre aux besoins énergétiques des industries minières et des centres urbains, Inga I, d'une capacité de 351 MW, et Inga II, produisant jusqu'à 1424 MW, témoignent d'un savoir-faire technique avancé pour l'époque. Leur conception intégrait des techniques innovantes pour gérer l'hydrologie du fleuve Congo, alliant résilience structurelle et optimisation de la production énergétique [CLE 60].



Figure 1. Barrages d'Inga

La trajectoire d'Inga est également marquée par des projets ambitieux visant à transformer le site en un gigantesque barrage, le Grand Inga (voir Figure 2), envisagé comme le plus grand barrage hydroélectrique du monde. Bien que les phases postérieures à Inga II aient connu divers retards dus à des obstacles financiers, politiques et techniques, le potentiel du HBIM pour gérer les structures existantes et soutenir les développements futurs demeure encore à exploiter [ENR 17]

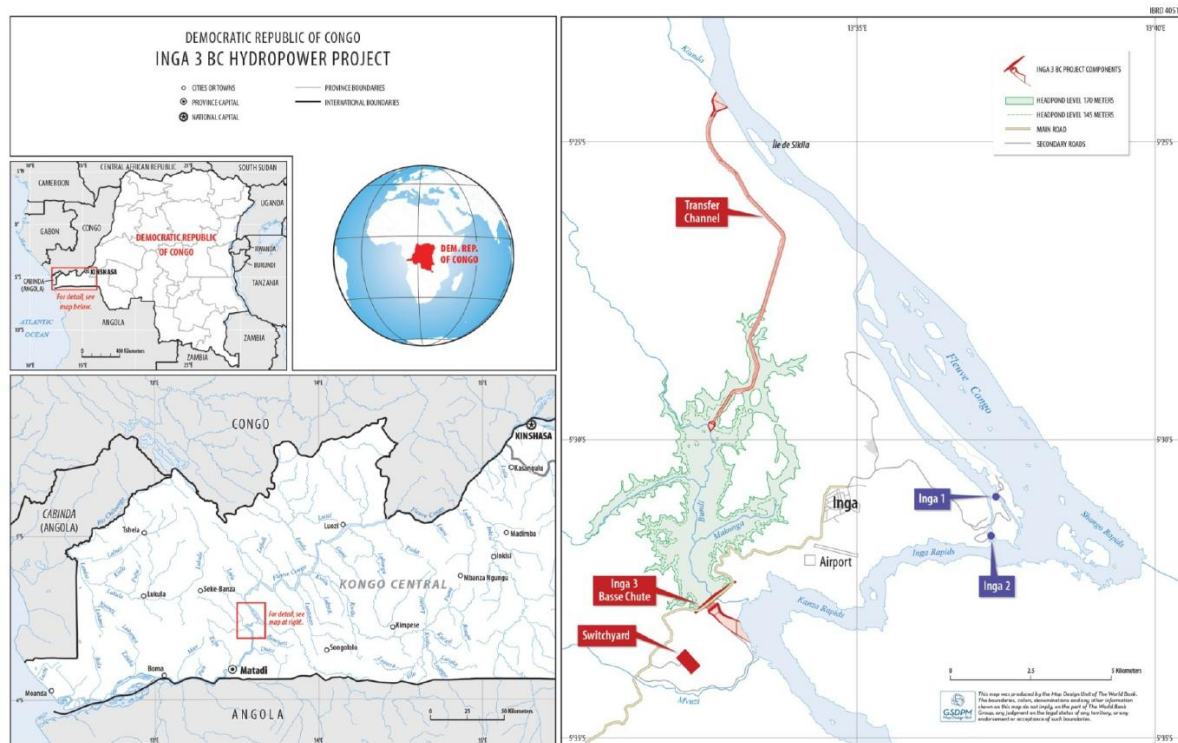


Figure 2. Carte d'Inga 1, 2 et du projet commun proposé pour Inga 3 [THE 14]

4.1.3. Barrages au-delà d'Inga

Outre le complexe d'Inga, plusieurs autres barrages ont été construits pendant la période coloniale et après l'indépendance pour répondre aux besoins énergétiques régionaux.

Parmi eux :

– **Barrage Nzilo** : Construit en 1952 près de Likasi dans la province du Haut-Katanga, il était à l'origine destiné à alimenter en électricité la Union Minière du Haut Katanga.

– **Barrages Ruzizi (I & II)** : Situés à la frontière entre la RDC, le Rwanda et le Burundi, ces barrages illustrent la coopération transfrontalière. Conçus dans les années 1950 et étendus dans les années 1980, ils ont significativement contribué à l'électrification régionale [PIR 57].

– **Barrage Mobayi-Mbongo** : Implanté sur le fleuve Ubangi, ce barrage a été développé pour répondre aux besoins énergétiques du nord de la RDC et de certaines zones de la République Centrafricaine.

Ces structures illustrent l'ingéniosité de l'ingénierie belgo-congolaise, chacune répondant à des défis géographiques et hydrologiques spécifiques [CLE 60].

Le Tableau 1 présente la liste des barrages classés par ordre décroissant d'année de mise en service, 75% d'entre eux ayant été construits avant 1960, l'année de l'indépendance de la RDC.

| N° | Nom | Année de mise en service |
|----|--------------------|--------------------------|
| 1 | Ruzizi II | 1989 |
| 2 | Mobaye | 1987 |
| 3 | Inga II | 1982 |
| 4 | Inga I | 1972 |
| 5 | Ruzizi I | 1958 |
| 6 | Kyimbi | 1957 |
| 7 | N'seke | 1956 |
| 8 | Zongo | 1955 |
| 9 | Tshopo | 1955 |
| 10 | Sanga | 1954 |
| 11 | Kilubi | 1954 |
| 12 | Nzilo | 1953 |
| 13 | Koni | 1950 |
| 14 | Tshikapa (Lungudi) | 1949 |
| 15 | Mpozo | 1934 |
| 16 | Mwadingusha | 1928 |

Tableau 1. *Tableau récapitulatif des Barrages en RDC*

4.2. *Potentiel du HBIM pour les Barrages en RDC*

Le HBIM offre une plateforme puissante pour documenter, gérer et restaurer les barrages historiques de la RDC. En intégrant les archives historiques aux outils numériques modernes, le HBIM permet de :

- **Documentation et Préservation** : Création de modèles 3D détaillés intégrant plans originaux, photographies d'époque et documents d'archives, servant d'archives vivantes pour conserver l'essence historique des barrages [PIR 57] [CLE 60].

- **Entretien et Suivi** : Mise en place de systèmes de maintenance prédictive grâce à l'intégration de capteurs permettant de surveiller la santé structurelle, détecter les fuites et contrôler les niveaux des réservoirs [ENR 17].

- **Développement Durable** : Évaluation des impacts environnementaux, optimisation de la gestion des ressources en eau et implication des communautés dans la prise de décisions, notamment dans le cadre de projets comme le Grand Inga.

- **Éducation et Renforcement des Capacités** : Utilisation des modèles HBIM comme outils pédagogiques pour former des ingénieurs et conservateurs aux meilleures pratiques de conception, d'entretien et de préservation du patrimoine.

4.3. *Défis et Perspectives d'Avenir*

La mise en œuvre du HBIM dans le contexte de la RDC rencontre plusieurs obstacles :

- **Accès Technologique** : La disponibilité limitée d'équipements géomatiques avancés et de logiciels HBIM.

– **Intégration des Données** : Des lacunes dans les archives historiques et une documentation parfois incomplète.

– **Formation** : Le besoin de professionnels formés pour utiliser efficacement les systèmes HBIM et interpréter leurs résultats.

La résolution de ces défis requiert une approche collaborative, avec des partenariats internationaux, des investissements dans la formation et un soutien étatique accru.

5. Workflow Proposé pour le HBIM des Barrages en RDC

Le workflow proposé (voir Figure 3) offre un cadre complet adapté aux défis uniques des infrastructures patrimoniales en RDC, en intégrant des technologies géomatiques avancées et des données historiques et culturelles pour créer des modèles 3D précis et sémantiquement riches.

5.1. Etapes du Workflow

5.1.1. Acquisition des Données

– **Technologies Géomatiques** : Utiliser la numérisation laser terrestre (TLS) et la photogrammétrie pour générer des nuages de points haute résolution.

– **Documentation Historique** : Recueillir plans, photographies et rapports sur la conception, la construction et les modifications des barrages.

– **Relevés sur Site** : Réaliser des visites de terrain pour identifier la détérioration physique et évaluer les conditions environnementales.

5.1.2. Intégration des Données

– **Traitement des Nuages de Points** : Importer les données dans des plateformes HBIM (ex. Autodesk Revit ou Graphisoft ArchiCAD) et nettoyer les ensembles de données pour assurer une représentation numérique précise du barrage.

– **Enrichissement Métadonnée** : Ajouter des informations sur les propriétés des matériaux, le contexte historique et l'état de conservation au modèle HBIM. En cas d'insuffisance des données historiques ou jugées insuffisamment fiables [BIA 18], un retour à l'étape d'acquisition est nécessaire.

5.1.3. Analyse et Interprétation

– **Analyse Structurelle** : Utiliser des outils de modélisation par éléments finis (FEM) pour évaluer les capacités de charge et identifier les vulnérabilités.

– **Modélisation Prédictive** : Simuler les impacts environnementaux (inondations, variations de température, corrosion) afin de prévoir les besoins en maintenance.

– **Évaluation de l'État** : Générer des rapports indiquant les zones critiques pour orienter les interventions.

5.1.4. Collaboration et Documentation

– **Implication des Acteurs** : Organiser des ateliers avec ingénieurs, historiens, conservateurs et autorités locales pour favoriser la prise de décision collaborative.

– **Référentiel Numérique** : Créer une base de données centralisée pour le partage en temps réel des modèles HBIM et des mises à jour.

– **Rapports Détaillés** : Produire des rapports combinant visualisations, données historiques et évaluations techniques.

5.1.5. Entretien et Suivi

– **Déploiement de Capteurs** : Installer des capteurs IoT pour surveiller la santé structurelle (vibrations, contraintes, conditions environnementales).

– **Mises à Jour du Modèle** : Actualiser régulièrement le modèle HBIM en fonction des interventions de maintenance.

– **Planification Préventive** : Utiliser les données du HBIM pour planifier des interventions avant que les dégradations ne

5.1.6. Formation et Renforcement des Capacités

– **Programmes de Formation** : Organiser des ateliers et des sessions de formation sur les technologies HBIM pour les professionnels locaux.

– **Partenariats Académiques** : Collaborer avec des universités et centres de recherche pour favoriser l'innovation et le partage des meilleures pratiques.

– **Transfert Technologique** : Faciliter l'accès aux équipements de numérisation et aux logiciels HBIM par le biais de collaborations internationales.

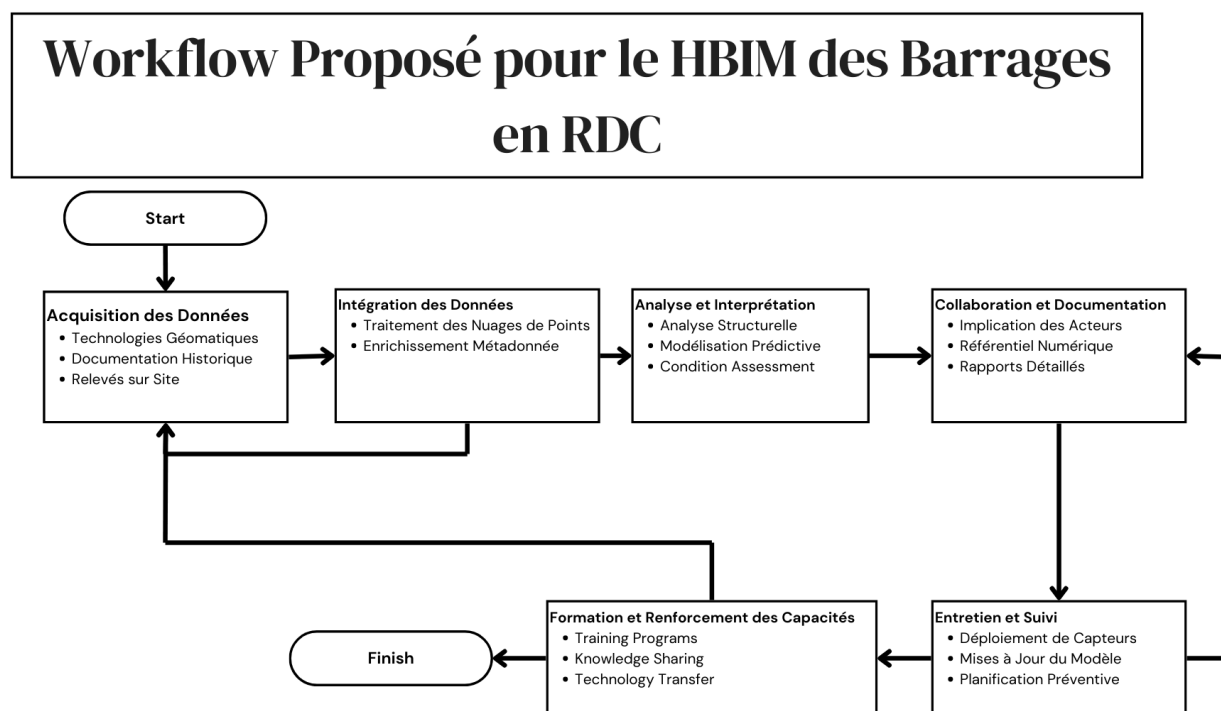


Figure 3. Workflow proposé pour le HBIM des barrages en RDC

6. Discussion

Le HBIM se profile actuellement comme une tendance significative dans l'évolution des méthodes de préservation des constructions anciennes à travers le monde. Il ne s'agit pas seulement de reproduire numériquement des édifices anciens, mais aussi d'élaborer un système intégré de gestion du savoir architectural qui regroupe des relevés, des données historiques, des études structurelles et des informations sémantiques au sein d'une interface collaborative. Le HBIM constitue également une avancée significative dans l'art actuel de la modélisation du bâti historique. Sa mise en œuvre dans le contexte congolais offre des opportunités nouvelles et inédites.

Jusqu'à une période récente, les techniques de documentation et de préservation du patrimoine étaient grandement disjointes. Elles s'étaient basées soit sur des enregistrements manuels non précis,

soit sur des bases de données difficilement interopérables. Le HBIM propose une démarche globale où les aspects historiques, architecturaux, structurels et contextuels sont amalgamés en un unique modèle numérique. Ce dernier offre la possibilité de franchir les barrières des outils traditionnels de conception assistée par ordinateur, particulièrement en ce qui concerne l'archivage, la simulation et le suivi des interventions.

Sur le plan international, le HBIM est actuellement considéré comme une technique avancée dans les travaux relatifs au patrimoine. Son développement est fortement influencé par les progrès technologiques significatifs dans le domaine de la géomatique (LiDAR, TLS, photogrammétrie), de l'intelligence artificielle (segmentation automatique, détection de formes), et de gestion de données sémantiques (ontologies, formats ouverts tels que IFC).

Les recherches sur le HBIM se concentrent de plus en plus sur l'interopérabilité des systèmes, la durabilité des modèles dans le temps et la fiabilité des relevés afin de garantir leur usage continu sur plusieurs décennies.

L'un des défis principaux du HBIM est l'interopérabilité des systèmes. Comme l'indiquent Yang et al. [YAN 20], la communication entre les plateformes BIM, SIG et les bases patrimoniales est entravée par des normes de données variées. L'adoption de formats ouverts tels que l'IFC, préconisé par Bianchini et al. [BIA 18], est cruciale pour assurer la durabilité et la transférabilité des modèles à travers le temps. En outre, l'implémentation d'ontologies sémantiques, comme le suggèrent Brusaporci et al. [BRU 18], améliore l'utilisation interdisciplinaire du modèle, rendant sa réutilisation plus aisée dans divers contextes : conservation, recherche, éducation ou gestion publique.

La fiabilité des modèles HBIM repose directement sur la qualité des données de relevé et des métadonnées intégrées. Dans leur travaux Murphy et Bruno [MUR 09] [BRU 19] soulignent que la précision des nuages de points, la traçabilité des sources historiques et la documentation rigoureuse des étapes de modélisation sont essentielles pour garantir l'exactitude et l'utilisabilité à long terme des modèles patrimoniaux. Cette rigueur est d'autant plus importante dans des contextes où les archives sont rares ou partiellement perdues, comme c'est souvent le cas en RDC.

Le workflow suggéré dans cet article s'aligne sur cette tendance d'innovation. Cette étude, en élaborant un flux de travail adapté à un patrimoine hydraulique complexe — notamment les barrages — et en l'inscrivant dans le contexte d'un pays sub-saharien, contribue à étendre la portée du HBIM et à illustrer sa souplesse. Elle encourage également à envisager la conservation non seulement comme une tâche technique, mais aussi comme un processus de diffusion et de mise en valeur du savoir architectural dans des contextes aux ressources restreintes.

Dans ce cadre, la République Démocratique du Congo représente un cas d'étude important. Le pays possède à la fois un héritage infrastructurel riche de son passé colonial et un potentiel hydroélectrique important tout en étant confronté à d'importants défis actuels : infrastructures en dégradation, accès restreint à l'électricité, insuffisance de documentation technique et faible mise en priorité de la conservation. Les barrages belgo-congolais comme Mwadingusha ou post-coloniaux tel que Inga I et II, Nzilo en fournissent une illustration frappante. Ces ouvrages, pensés comme des éléments essentiels du progrès énergétique dans l'industrie minière, souffrent actuellement d'un déficit d'entretien structurel et d'une valorisation patrimoniale insuffisante.

L'intégration du HBIM ne cherche pas seulement à préserver la mémoire technique de ces infrastructures, mais également à leur attribuer une fonction actuelle. La modélisation offrirait la possibilité de rassembler les données existantes, d'approfondir la compréhension de leur situation présente, de projeter des plans de réhabilitation et, par-dessus tout, de transmettre ces connaissances aux générations à venir. Il s'agit également d'un moyen d'ancrer ces ouvrages dans une nouvelle perspective : celle d'un développement durable enraciné dans la mémoire collective, accessible, numérique et interdisciplinaire.

Le HBIM dévoile également une nouvelle perspective en RDC, où les compétences et les techniques dédiées à la conservation sont encore restreintes. Celle d'un potentiel de formation et de développement des compétences locales. La mise en œuvre d'un projet HBIM nécessite l'engagement de diverses compétences : relevés sur site, modélisation en 3D, codage sémantique, étude historique et simulation numérique. C'est ainsi une opportunité pédagogique et universitaire importante pour les universités locales, qui ont la possibilité d'incorporer ces instruments dans leurs cursus et recherches et de consolider leur implication dans la protection du patrimoine national.

En utilisant des moyens numériques contemporains pour mettre en valeur son héritage technique et historique, la RDC renforce également sa souveraineté culturelle. Elle se munie d'instruments pour narrer son histoire personnelle, consigner ses infrastructures propres et diriger ses politiques de développement, sans être tributaire uniquement des compétences extérieures.

7. Conclusion Générale et Perspectives

Ce travail a présenté une exploration du Historic Building Information Modeling (HBIM) en tant qu'outil innovant et stratégique pour la conservation du patrimoine architectural et infrastructurel en République Démocratique du Congo (RDC), à travers des barrages hydroélectriques construits à l'époque colonial et post-colonial. En articulant des considérations théoriques, technologiques et contextuelles, cette recherche contribue à élargir le champ d'application du HBIM, souvent concentré sur les centres historiques urbains d'Europe, en l'ouvrant à des infrastructures techniques et à des territoires moins étudiés.

L'étude débute par une revue de littérature qui retrace l'évolution du HBIM dans le champ de la modélisation patrimoniale, en soulignant les innovations les plus marquantes : la numérisation laser terrestre, la photogrammétrie, la modélisation sémantique enrichie, les ontologies, et les approches open source. Elle met en évidence les limites actuelles, notamment en matière d'interopérabilité des plateformes, de normalisation des formats, de lourdeur des traitements de données, et de dépendance à une main-d'œuvre hautement qualifiée.

Dans la section consacrée à l'analyse de cas, un exemple européen (l'Église de l'Annonciation à Séville) a permis d'illustrer les méthodologies avancées appliquées à un site complexe. Cette étude a montré la précision obtenue grâce aux scanners de haute résolution et aux outils d'analyse comparative des nuages de points. Elle offre un modèle technique exportable qui a guidé l'élaboration du workflow proposé pour la RDC.

La troisième partie du travail s'est focalisée sur le contexte congolais, en soulignant les caractéristiques historiques, techniques et stratégiques des barrages construits entre 1928 et 1989. Ces ouvrages, dont Inga I et II, Nzilo ou encore Mobayi-Mbongo, témoignent d'un savoir-faire d'ingénierie remarquable, mais souffrent aujourd'hui d'un abandon structurel dû au manque d'entretien, à la perte d'archives, et à une gestion fragmentaire. Le HBIM, dans ce cadre, offre une réponse adaptée en permettant de reconstituer numériquement ces structures, d'en centraliser la documentation, de simuler des scénarios de réhabilitation, et d'enrichir leur valeur culturelle.

L'un des principaux apports de ce papier réside dans le développement d'un workflow HBIM spécifique à la RDC, en six étapes : acquisition des données, intégration et enrichissement sémantique, analyse structurelle, documentation collaborative, maintenance prédictive, et formation. Ce modèle méthodologique intègre à la fois les réalités technologiques locales et les standards internationaux, dans une perspective de durabilité, de collaboration interdisciplinaire et de transfert de compétences.

Parallèlement, cette étude contribue à l'évolution de l'état de l'art sur le HBIM en l'appliquant à des infrastructures hydrauliques de grande échelle dans un contexte africain, ce qui reste encore peu exploré dans la littérature scientifique. Elle démontre que le HBIM peut transcender sa simple

utilisation pour des édifices à forte valeur historique visible, en s'étendant à des ouvrages techniques ayant un rôle fondamental dans le développement territorial.

Elle ancre également la technologie dans un cadre socio-économique et éducatif. Le HBIM devient ici un levier pour structurer une ingénierie locale du patrimoine, renforcer la formation dans les universités congolaises, créer des synergies entre acteurs publics et privés, et valoriser l'héritage matériel du pays. En cela, il répond à un double besoin : celui de conserver le passé tout en outillant l'avenir.

Enfin le projet s'inscrit dans une logique de développement durable, en proposant une gestion plus rationnelle des infrastructures, une réduction des coûts de maintenance, une anticipation des défaillances et une implication plus grande des communautés locales dans les choix patrimoniaux et énergétiques.

Cependant, cette méthodologie s'est heurtée à des contraintes techniques, économiques et politico-institutionnelles.

Techniquement parlant son déploiement en RDC sera freinée par un accès limité aux équipements de numérisation haute résolution (LiDAR, scanners TLS), souvent coûteux et peu disponibles localement. Il faudra également souligner un manque de logiciels professionnels adaptés ou de licences officielles pour les outils HBIM ; l'insuffisance d'archives numériques fiables pour certains barrages anciens ainsi que l'absence de standardisation nationale des formats de documentation patrimoniale comme obstacles potentiels.

Sur le plan économique, les investissements initiaux nécessaires pour lancer un projet HBIM à l'échelle d'un site ou d'un réseau de barrages sont non négligeables. Ils concernent non seulement l'acquisition d'outils, mais aussi la formation du personnel, la logistique des relevés, la gestion des bases de données, et le maintien des systèmes informatiques à jour.

Par ailleurs, sur le plan politique et institutionnel, la mise en œuvre efficace d'un projet HBIM requiert non seulement une volonté politique claire de valoriser le patrimoine bâti et technique mais aussi des mécanismes de gouvernance pour assurer l'accès, la gestion et la mise à jour des modèles. De plus des partenariats solides entre universités, ministères, opérateurs d'énergie et agences de conservation ; et un cadre juridique adapté pour régir la propriété intellectuelle, l'utilisation des données, et la conservation numérique seront nécessaires pour la réalisation d'un tel projet.

Sans ces conditions réunies, le HBIM risque de rester une initiative pilote sans impact systémique.

En conclusion, cette recherche démontre que le HBIM, bien qu'encore jeune en RDC, peut jouer un rôle central dans la conservation, la transmission et la réutilisation du patrimoine technique et architectural du pays. Il ne s'agit pas seulement de préserver des objets du passé, mais d'ouvrir une voie vers un développement technologique, culturel et énergétique intégré, inclusif et durable.

Bibliographie

- [BAN 20] BANQUE MONDIALE. "Accéder à l'électricité en République Démocratique du Congo. Opportunités et défis." (2020).
- [BIA 18] BIANCHINI, C. AND SAVERIO N. "From BIM to H-BIM." *2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) held jointly with 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018)*. Ed. IEEE. 2018. 1-4.
- [BRU 19] BRUNO, N. ET RICCARDO R. "HBIM for conservation: A new proposal for information modeling." *Remote Sensing* 11.15 (2019): 1751.
- [BRU 18] BRUSAPORCI S. , PAMELA M. ET ALESSANDRA T. "A framework for architectural heritage HBIM semantization and development." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42 (2018): 179-184.

- [CLE 60] CLERFAYT, A. *Le développement énergétique du Congo belge et du Ruanda-Urundi*. BRUXELLES, 1960.
- [DIA 22] DIARA . “HBIM open source: a review.” *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9 (2022): 472.
- [DLE 22] DLESK A. ET AL. “Comparison of leica blk360 and leica blk2go on chosen test objects.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 46 (2022): 77-82.
- [DOR 15] DORE C. ET AL. “Structural simulations and conservation analysis-historic building information model (HBIM).” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40 (2015): 351-357.
- [ENR 17] ENRDC. “Histoire de l’hydroélectricité en RD Congo.” 2017. 2024. <<https://enrdinfo.wixsite.com/enrdc-info/single-post/2017/11/18/histoire-de-lhydro%C3%A9lectricit%C3%A9-en-rd-congo>>.
- [LAN 17] LANDES T. , GERTRUD K. AND ROBIN B. “3D modeling of the Strasbourg’s Cathedral basements for interdisciplinary research and virtual visits.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40 (2015): 263-270.
- [MOY 22] MOYANO J., ET AL. “Evaluation of records using terrestrial laser scanner in architectural heritage for information modeling in HBIM construction: The case study of the La Anunciacion church (Seville).” *Journal of Building Engineering* 62 (2022): 105190.
- [MUR 09] MURPHY M. , EUGENE M. AND SARA P. “Historic building information modelling (HBIM).” *Structural Survey* (2009): 311-327.
- [PIR 57] PIRENNE, J.H. “ Histoire du site d’Inga.” *Académie royale des sciences sociales* 3.VI (1957).
- [QUA 15] QUATTRINI, RAMONA, ET AL. “From TLS to HBIM. High quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (2015): 367-374.
- [THE 14] THE WORLD BANK. *International Development Association Project Appraisal Document On A Proposed Grant In The Amount Of Sdr 47.7 Million (Us\$ 73.1 Million Equivalent) To The Democratic Republic Of Congo For An Inga 3 Basse Chute And Mid-Size Hydropower Development Technica*. Kinshasa: The World Bank, 2014.
- [YAN 20] YANG X., ET AL. “Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques.” *Journal of Cultural Heritage* 46 (2020): 350-360.