

L'Apport du BIM dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments : Vers une construction durable

The contribution of BIM in improving the energy efficiency of buildings: Towards sustainable construction

Ons Najjar Mansour¹, Raja Gzara²

¹ ENAU University of Carthage, Tunis, Tunisia, onsnajjarmansour@gmail.com

² ENAU University of Carthage, Tunis, Tunisia, gzara.raja@gmail.com

RÉSUMÉ. Face à la situation climatique critique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenue un impératif mondial. La digitalisation du secteur de la construction, et notamment l'adoption du BIM (Building Information Modeling), offre une alternative intéressante. En effet, en intégrant des données multi-échelles pour la simulation énergétique, les outils BIM permettent d'anticiper les impacts environnementaux et d'optimiser les choix techniques. Dans ce contexte, on se propose de mener une réflexion sur comment le BIM peut-il être le catalyseur de cette transition énergétique ? Comment les outils BIM permettent de concilier efficacité énergétique, confort des usagers et durabilité ? Quels défis techniques et organisationnels restent à surmonter ?

Cette étude analyse le potentiel du BIM comme levier d'innovation, en illustrant son rôle à chaque phase du cycle de vie du bâtiment. Elle s'appuie d'une part sur une revue méthodique de la littérature autour du BIM et d'autres part sur des cas pratiques pour évaluer le BIM comme outil pouvant transformer les pratiques vers une construction réellement durable.

ABSTRACT. In light of the critical climate situation, reducing greenhouse gas emissions has become a global imperative. The digitalisation of the construction sector, and in particular the adoption of BIM (Building Information Modelling), offers an interesting alternative. By integrating multi-scale data for energy simulation, BIM enables us to anticipate environmental impacts and optimise technical choices. In this context, we propose to reflect on how BIM can be the catalyst for this energy transition. How can BIM tools reconcile energy efficiency, user comfort and sustainability? What technical and organisational challenges remain to be overcome?

This study analyses the potential of BIM as a lever for innovation, illustrating its role at each stage of the building's life cycle. It is based on a methodical review of the literature on BIM and on practical cases to evaluate BIM as a tool that can transform practices towards truly sustainable construction.

MOTS-CLÉS. Climat, performance énergétique, bâtiment, BIM, optimisation.

KEYWORDS. Climate, energy performance, buildings, BIM, optimisation.

1. Introduction

Le changement climatique s'accélère sous l'effet des activités humaines, comme en attestent les dernières données du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat GIEC (2023) : la température moyenne mondiale a augmenté de +1,1°C depuis l'ère préindustrielle, en raison principalement des émissions anthropiques de CO₂. Cette hausse, sans précédent par son rythme, entraîne une amplification des extrêmes climatiques tout comme les canicules, les inondations ou encore l'acidification des océans, menaçant ainsi directement les équilibres écologiques et socio-économiques. Face à cette urgence, l'action de limiter le réchauffement à +1,5°C, constitue un objectif central de l'accord de Paris, qui exige une réduction immédiate et massive des émissions (−45 % d'ici 2030).

Pour y parvenir, trois axes sont prioritaires :

La décarbonation énergétique : C'est le processus visant à réduire ou éliminer les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et autres gaz à effet de serre (GES) liés à la production et à la consommation d'énergie en misant sur l'adoption accélérée des énergies renouvelables (solaire, éolien) et l'abandon progressif des combustibles fossiles ;

La protection des puits de carbone naturels : Ce sont des écosystèmes qui absorbent et stockent naturellement le CO₂ de l'atmosphère, contribuant ainsi à réduire l'effet de serre, tels que les forêts tropicales et les zones humides. La préservation pourrait absorber jusqu'à 30 % des émissions annuelles.

L'innovation industrielle : Ce sont les nouvelles technologies, processus et modèles permettant aux industries de diminuer leur empreinte carbone tout en restant compétitives, essentiellement basées sur l'adoption de technologies bas-carbone (capture et stockage du CO₂, hydrogène vert).

Cependant, l'atténuation des conséquences climatiques seule ne suffira pas, une stratégie globale plus adaptée à la situation actuelle est indispensable permettant d'anticiper et de mettre en place des pdans ce contexte processus préventifs. Ainsi, le renforcement de la résilience des territoires moyennant des infrastructures adaptées et des constructions avec des systèmes de contrôle basée sur des actions préventives, s'avère crucial pour minimiser l'impact des nouvelles constructions sur l'usage de l'énergie et l'émission carbone. Des systèmes proactifs doivent être mis en place, dans un cadre aussi bien politique et économique que social pour assurer une transformation digitale intégrant les nouvelles technologies et permettant une meilleure prise de décision en misant sur la construction durable.

Dans ce contexte, le secteur du bâtiment se présente comme l'un des secteurs les plus énergivores, consommant environ 40 % de l'énergie mondiale et générant d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Selon International Energy Agency (IEA), près de 36 % de la consommation énergétique finale mondiale est attribuée au secteur des bâtiments résidentiels et commerciaux. Selon United Nation Environment Program (UNEP), 2020, le bâtiment est responsable de 40 % d'émissions mondiales CO₂ provenant de la construction et de l'exploitation des bâtiments (construction, chauffage, refroidissement, éclairage, etc.).

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2023), souligne que le secteur du bâtiment représente à lui seul 39% des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie et 36% de la consommation énergétique finale globale. Ces données alarmantes, révèlent l'impact disproportionné de ce secteur sur le réchauffement climatique. Ces statistiques illustrent clairement l'urgence d'initiatives et d'actions visant à réduire la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment. Les vagues de chaleur plus fréquentes et intenses augmentent la demande en climatisation, créant un cercle vicieux énergétique : plus la température augmente, plus la demande en énergie augmente et plus l'impact environnemental est important. D'un autre côté, on note des solutions incontournables mais insuffisamment déployées tout comme la rénovation énergétique du parc existant et la construction bas-carbone. Ainsi, face à l'urgence de la situation climatique et à la nécessité de repenser les modèles constructifs, la transition vers des bâtiments durables impose une rupture avec les pratiques traditionnelles, souvent énergivores et peu adaptées aux nouveaux impératifs environnementaux. Cette rupture nécessite l'intégration et l'adoption de nouveaux outils et processus de travail permettant d'atteindre les objectifs environnementaux de manière efficace. C'est dans ce cadre-là que cette recherche focalise sur une question centrale : comment le Building Information Modeling (BIM), en tant que méthodologie numérique intégrée, peut-il restructurer les processus de conception, de construction et d'exploitation pour concilier performance énergétique et qualité d'usage ? L'étude interroge spécifiquement la capacité du BIM à agir comme un outil transversal d'optimisation énergétique, depuis la phase de conception bioclimatique jusqu'à la gestion opérationnelle, en passant par la coordination des acteurs et l'analyse cyclique des données.

L'objectif est d'identifier un processus efficace d'intégration précoce des informations sur les paramètres énergétiques permettant des simulations dynamiques (orientation, matériaux, ouvertures) et

assurant une meilleure prise de décision. Pour cela nous procérons d'abord par une lecture empirique du BIM, en tant que processus basé sur la modélisation d'une maquette numérique fiable constituant une source d'information unique exploitable pour orienter les prises de décision relative à l'efficacité énergétique selon les phases du projet. Ainsi nous passons en revue les phases d'un projet ainsi que les paramètres agissant sur l'efficacité énergétique du bâtiment tout en considérant les dimensions d'ordre environnemental, économique et social du projet. Cette première phase permettra de lire l'apport du modèle numérique BIM dans chaque phase du projet. Une deuxième partie expérimentale assurera la visualisation de la simulation de l'apport du processus BIM dans la mise en place d'une matrice d'exploitation du modèle numérique pour rationaliser la consommation énergétique.

2. La modélisation collaborative, au cœur de la méthodologie BIM

L'efficacité énergétique dans le bâtiment repose aujourd'hui sur une intégration profonde des méthodologies BIM, où la donnée énergétique devient le fil conducteur de toutes les phases du projet. Cette approche systémique nécessite une refonte des processus traditionnels pour placer l'analyse énergétique au cœur de la conception, de la réalisation et de l'exploitation des bâtiments. Le BIM constitue un levier transformationnel pour l'optimisation énergétique des bâtiments. En centralisant et synchronisant l'ensemble des données techniques, environnementales et fonctionnelles dans un modèle dynamique partagé, elle permet une intégration systémique des exigences énergétiques dès les phases amont du projet et durant tout son cycle de vie. L'analyse portera sur sa capacité à générer des scénarios comparatifs, à identifier les points critiques et à proposer des solutions adaptées à chaque étape du projet. L'ambition est de démontrer que le BIM constitue bien plus qu'une alternative - un changement de paradigme indispensable pour atteindre les objectifs de neutralité carbone dans le bâtiment, tout en garantissant le confort et la satisfaction des usagers finaux.

Cette recherche s'appuie sur une revue systématique de la littérature académique croisée avec des simulations pratiques, afin d'identifier les bonnes pratiques d'usage technologique. Le BIM dépasse sa capacité à intégrer un modèle numérique 3D collaboratif pour devenir un système centralisé autour des enjeux durables.

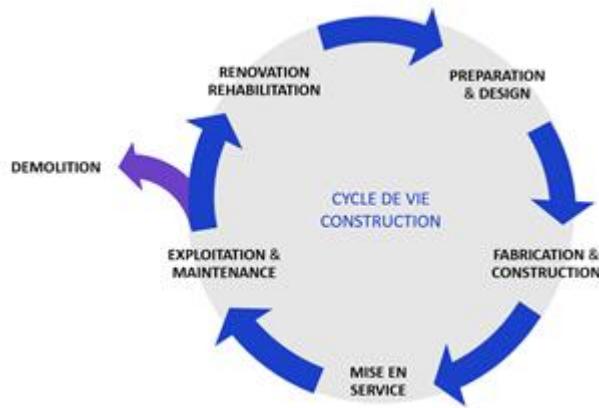


Figure 1. Illustration du cycle de vie d'un projet

Dans ce contexte, l'architecte, en tant que premier acteur de la chaîne de construction, devient un pilier essentiel de la transition énergétique grâce à son influence déterminante sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments. En adoptant une approche bioclimatique dès la phase de conception, il peut optimiser l'orientation, la forme et l'enveloppe du bâtiment pour exploiter au mieux les ressources naturelles (ensoleillement, ventilation, inertie thermique), réduisant ainsi drastiquement les besoins en énergie artificielle. Par des choix stratégiques – comme la compacité des volumes, l'utilisation de matériaux à forte inertie ou la disposition judicieuse des ouvertures – l'architecte transforme le bâtiment en un système économique en énergie, voire producteur d'énergie (via des panneaux solaires intégrés par exemple). Cette vision holistique, combinée à des outils de modélisation énergétique

avancés, permet de concilier performance environnementale, confort des usagers et viabilité économique, faisant de l'architecte un véritable catalyseur de la ville durable de demain. L'intégration du BIM révolutionne la pratique de l'architecte dès la phase de préconception, en permettant des simulations énergétiques précoce et une analyse fine des performances du bâtiment avant même sa construction. Ces outils numériques facilitent la collaboration entre les différents acteurs et permettent d'ajuster en continu les paramètres pour atteindre une optimisation énergétique globale. Ainsi, en combinant conception bioclimatique, matériaux durables et technologies numériques, l'architecte devient un acteur clé pour répondre au double défi du confort des usagers et de la réduction de l'impact environnemental, tout au long du cycle de vie du bâtiment. Cette approche intégrée ouvre la voie à des constructions véritablement durables, où chaque décision - de la conception à la maintenance - participe à l'atteinte des objectifs climatiques tout en garantissant la qualité d'usage.

2.1. Le BIM comme catalyseur de la transition énergétique dans le bâtiment

Face à l'urgence climatique, le secteur du bâtiment doit opérer une mutation profonde allant de méthode traditionnelle vers des méthodes digitales adaptées au contexte actuel et répondant aux exigences d'aujourd'hui. Cette situation souligne la nécessité d'une approche systémique, où tous les acteurs, de la conception à l'exploitation, alignent leurs pratiques sur des objectifs de décarbonation. La réussite de cette transition repose sur une collaboration inédite entre les parties prenantes (maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs, constructeurs, exploitants), mais aussi sur le rôle pivot de l'architecte, dont les choix initiaux, (de l'orientation en particulier) déterminent en partie l'impact environnemental du bâtiment sur son cycle de vie.

Dans ce contexte, le BIM offre le potentiel pour atteindre ces objectifs et émerge comme une solution innovante permettant d'anticiper des solutions et d'orienter la prise de la bonne décision avant même la phase de construction. Cette méthode digitale ne se limite pas à un simple outil de modélisation 3D, elle représente une véritable révolution méthodologique intégrant des processus et des logiciels avancés d'analyse dynamique, de simulation des flux énergétiques et d'évaluation environnementale. Le BIM est un processus basé sur l'exploitation d'un modèle numérique généré par ordinateur permettant de simuler plusieurs dimensions de la planification, la conception, la construction et l'exploitation d'un bien.

La maquette numérique (BIM), représente une source d'information unique et fiable, constituant une révolution méthodologique pour le secteur du bâtiment. Co-produite et enrichie en continu par l'ensemble des acteurs (architectes, ingénieurs, économistes, maîtres d'ouvrage), elle permet une modélisation dynamique et multicritère des projets, intégrant dès les premières esquisses des paramètres techniques, économiques et sociaux.

Le BIM est désormais reconnu comme une méthodologie scientifiquement validée pour l'optimisation énergétique des bâtiments, comme en attestent de nombreuses études empiriques. Selon Eastman [EAS 18] le BIM permet d'améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité en liant le modèle de bâtiment aux outils d'analyse énergétique. Ceci permet d'évaluer la consommation d'énergie dès les premières phases de conception. Cela n'est pas possible avec les outils 2D traditionnels qui exigent qu'une analyse énergétique séparée soit réalisée à la fin du processus de conception, ce qui réduit les possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique. La possibilité de relier le modèle de bâtiment à différents types d'outils d'analyse offre de nombreuses possibilités d'améliorer la qualité du bâtiment.

Azhar,S [AZH11] a révélé, de son côté, que l'utilisation du BIM permettait une réduction moyenne de 23% des consommations énergétiques opérationnelles grâce à une modélisation thermique précise. Ces résultats sont corroborés par les recherches de Liu,S [LUI 20] qui ont mesuré des gains énergétiques atteignant 30% pour des bâtiments commerciaux conçus avec des workflows BIM avancés. Le process repose sur la capacité du BIM à intégrer des algorithmes de simulation dynamique (EnergyPlus, TRNSYS) permettant d'analyser finement les transferts thermiques et les flux énergétiques. D'un autre côté, Pu, L.L. and Wang, Y.M. [PUL 21], ont souligné l'importance cruciale

de l'interopérabilité entre les différents logiciels (Revit, ArchiCAD) et outils d'analyse énergétique pour assurer l'efficacité du processus durant tout le cycle de vie d'un projet.

Selon le processus BIM, la maquette numérique mise à jour en continu tout au long du cycle de vie du bâtiment et enrichie selon les besoins d'information (Level of Detail – LOD, Level of Information Need – LOIN), constitue une base de données vivante, garantissant à la fois une traçabilité complète de l'historique du bâtiment avec archivage des modifications techniques (choix structurels, remplacement d'équipements), le suivi des interventions de maintenance (dates, coûts, acteurs). Cette maquette reflète la réalité du bâtiment avec une reproduction détaillée des performances énergétiques (isolation, ponts thermiques, rendement des systèmes CVC) et une intégration des réseaux techniques (circuits électriques, conduits de ventilation, plomberie). Grâce aux simulations énergétiques intégrées (thermique, éclairage, ventilation), les simulations opérées sur la maquette permettent d'évaluer l'impact des choix architecturaux (orientation, compacité, matériaux) sur la consommation future, dès la phase conceptuelle. Et permet aussi l'optimisation continue par itérations collaboratives, ainsi l'ajustement au niveau du projet prend en considération des contraintes croisées entre la technique (résolution de conflits), l'économique (équilibre entre le coût, l'exécution et l'efficacité) et le social (confort des usagers). C'est ainsi que la maquette numérique, lorsqu'elle est alimentée et exploitée de manière rigoureuse, devient bien plus qu'un outil de visualisation et de conception : c'est un système nerveux central qui assure la durabilité, la sécurité et l'efficacité du bâtiment sur le long terme. Elle incarne la transition numérique et écologique du secteur, en transformant des données brutes en décisions anticipées et durables. Le BIM dépasse son statut d'outil de modélisation 3D pour devenir un éco système décisionnel, où la performance énergétique se construit collectivement, depuis l'esquisse jusqu'à l'exploitation. Cette approche préventive conduite par l'information (data-driven) permet d'atteindre les objectifs de neutralité carbone dans le secteur de la construction. Le point de départ de tout projet en BIM est la réalisation d'une maquette numérique fiable, constituant une source réelle d'information et point de départ pour toute simulation du bâtiment en question. Selon Kaboré, M [KAB 18], la simulation est primordiale pour le développement et l'adaptation des bâtiments face aux enjeux énergétiques et aux changements climatiques. Les simulations énergétiques avancées conduisent à 15-20% d'amélioration des performances.

Les résultats scientifiques plaident pour une adoption systématique du BIM comme outil d'aide à la décision dans les projets de construction durable, particulièrement dans le cadre des réglementations thermiques de plus en plus strictes (RT 2020, Bâtiments à Énergie Positive). Les simulations énergétiques couvrent tous les composants du bâtiment, de l'enveloppe aux systèmes techniques, en intégrant même le comportement des usagers. Leur combinaison permet d'orienter les décisions en se basant sur une combinaison de paramètres selon les priorités et les disponibilités des informations.

2.2. L'apport des simulations précoce dans la prise de décision à chaque phase du projet : Workflows BIM et intégration méthodologique

L'optimisation de l'efficacité énergétique dans un projet architectural nécessite une approche intégrée tout au long du cycle de vie du bâtiment. Le Building Information Modeling (BIM) joue un rôle clé dans cette démarche en permettant une collaboration fluide, une modélisation précise et une analyse performante des données. L'architecte, en tant que pilote du projet, exploite le BIM pour améliorer la conception, la construction et la gestion du bâtiment. Nous allons détailler les différentes phases du projet architectural et analyser comment le BIM, sous la conduite de l'architecte, contribue à l'efficacité énergétique à chaque étape.

2.2.1. Phase de Pré-études et analyse des besoins

Durant cette phase préliminaire, l'architecte, en collaboration étroite avec le maître d'ouvrage, définit les exigences fonctionnelles, esthétiques et économiques du projet, tout en intégrant les contraintes du site (topographie, orientation, climat). Grâce aux simulations précoce (ensoleillement, vents dominants), il compare des scénarios pour optimiser la compacité et l'orientation, réduisant ainsi les

besoins énergétiques. La création d'une maquette paramétrique (LOD 100) permet de visualiser l'enveloppe extérieur afin de procéder à une simulation de l'ensoleillement permettant à l'architecte d'analyser les apports solaires naturels sur un bâtiment en fonction de l'orientation, des masques solaires (voisins, végétations) et les variations de la course solaire selon les saisons. L'approche BIM permet une prise en considération et un équilibre entre performance énergétique, attentes du maître d'ouvrage entre esthétiques, fonctionnelles et contraintes budgétaires.

2.2.2. Phase de Conception détaillée (APS/APD)

Durant cette phase, l'architecte affine la conception en produisant des plans détaillés (coupes, façades, implantations) et en définissant les matériaux, les systèmes constructifs et les performances énergétiques. La modélisation est plus précise intégrant les données techniques (résistance thermique, inertie, ACV matériaux). Les simulations thermiques, acoustiques, luminosité permettent d'optimiser les choix des matériaux. La coordination assurée selon le processus BIM permet une détection précoce de conflits permettant à chaque intervenant d'ajuster ces modèles avant la phase exécution.

L'approche BIM permet ainsi de concilier exigences esthétiques, techniques et budgétaires, tout en garantissant la cohérence environnementale du projet.

2.2.3. Phase d'Études Techniques et de Consultation (PRO/DCE)

Durant cette phase cruciale, l'architecte élabore les documents contractuels (CCTP, DPGF, plans d'exécution) qui serviront de base à la consultation des entreprises. Cette étape exige une rigueur technique absolue et une coordination rigoureuse entre les différents bureaux d'études (structure, fluides, thermique), sous peine d'impacter directement la qualité de l'exécution.

Le BIM révolutionne cette phase en transformant la maquette numérique en un référentiel unique et dynamique, permettant de générer de manière automatique tous les plans, nomenclatures et quantitatifs, limitant les erreurs humaines et les incohérences entre les documents. La collaboration entre tous les acteurs du projet permet d'uniformiser les données et de mettre à jour de manière fiable les versions et les changements opérés. L'estimation des coûts est établie sur la base de données spécifiques répondant aux exigences du projet et limitant les dépassements.

Grâce au BIM, l'architecte garantit l'alignement parfait entre conception et exécution, mais aussi la rapidité des processus de consultation des entreprises en fournissant des documents clairs et fiables.

2.2.4. Phase de Suivi de Chantier (DET)

Cette étape est cruciale car elle implique la réalisation du projet et vérifie en continu l'avancement, les coûts et la conformité entre le prévu et le réel. Les maquettes numériques sont actualisées au rythme du chantier, intégrant des systèmes qualité répondant aux exigences structurelles et énergétiques (étanchéité à l'air, mise en œuvre de l'isolation). L'architecte utilise le BIM comme outil central :

- Pour effectuer des ajustements en temps réel avec les entreprises via des plateformes collaboratifs (BIM 360)
- Pour confronter les versions « as-built » et « as-planned », notamment via un suivi des écarts énergétiques (scan laser vs modèle théorique)
- Pour gérer les fiches de chantier numériques, assurant la traçabilité des matériaux

Cette méthode permet non seulement de garantir la conformité des travaux, mais aussi d'anticiper les dérives (délais, coûts) et d'optimiser la réactivité face aux modifications. Le BIM se révèle ainsi indispensable pour piloter la qualité à chaque étape d'exécution.

2.2.5. Phase de Réception et Livraison (AOR)

En phase de réception, l'architecte joue un rôle clé en vérifiant la conformité du bâtiment aux exigences techniques, réglementaires et environnementales définies initialement. Son expertise permet d'assurer la parfaite adéquation entre le résultat final et les objectifs du projet. Le processus BIM garantit la fluidité de cette phase, assurant une documentation précise et actualiser. Des simulations plus poussées peuvent être mises en place grâce à l'alimentation du jumeau numérique par des informations réelles du bâtiment grâce à des capteurs afin de comparer les simulations initiales et la réalité exécuter et d'assurer des ajustements si besoin.

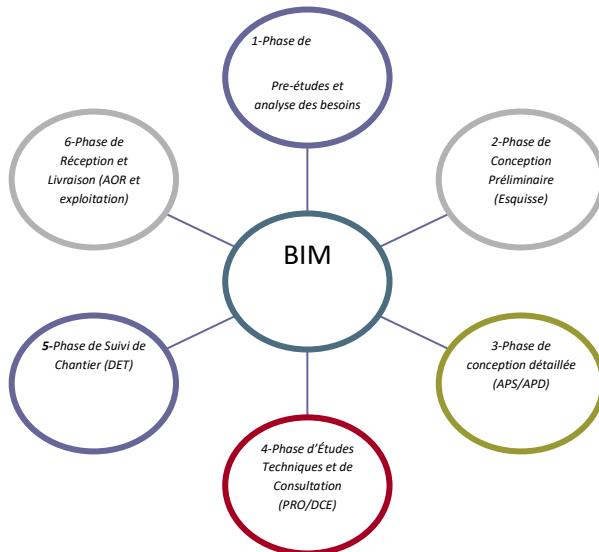


Figure 2. Implication du BIM dans toute les phases du projet

Le BIM représente l'ADN numérique du bâtiment, intégrant dans son modèle toutes les données clés nécessaires à sa gestion et à son évolution. Bien plus qu'un simple outil de conception, il agit comme un système digital unifié, associant une documentation exhaustive (caractéristiques techniques, propriétés des matériaux, performances énergétiques) à une traçabilité dynamique (suivi des modifications, données IoT, historiques de maintenance). Ainsi, le BIM se transforme en véritable système nerveux d'un bâtiment intelligent, capable de s'auto-optimiser tout au long de son cycle de vie, de la conception jusqu'à l'exploitation. Dans cette approche, la coordination et la collaboration entre les acteurs assure la cohérence globale du projet, conciliant les impératifs techniques, économiques, réglementaires et esthétiques, tout en pilotant l'optimisation énergétique grâce aux jumeaux numériques et à leur capacité d'autorégulation.

2.3. La contribution au développement durable d'un projet

Dans la continuité de notre analyse du rôle de l'architecte et des apports du BIM pour l'efficacité énergétique, nous proposons d'illustrer ces concepts par des études de cas et simulations appliquées. Cette démarche s'appuie sur deux notions fondamentales : le développement durable et l'optimisation énergétique dans le bâtiment, dont la compréhension est essentielle pour orienter les décisions vers une construction durable.

Le développement durable, tel que défini par le Rapport Brundtland (1987), constitue "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs". Ce concept repose sur trois piliers interdépendants : environnemental (préservation des ressources et des équilibres écologiques), social (réduction des inégalités et amélioration des conditions de vie) et économique (croissance responsable respectant les limites planétaires). La digitalisation des processus constructifs via le BIM apparaît comme une solution synergique, offrant simultanément des bénéfices environnementaux (réduction de l'empreinte carbone),

économiques (optimisation des coûts globaux) et sociaux (amélioration du confort des usagers). Cette approche durable nécessite une vision systémique intégrant des actions concrètes pour concilier progrès et préservation, à travers des solutions comme la transition énergétique ou l'économie circulaire. Le secteur de la construction a progressivement intégré ces principes, donnant naissance à des concepts comme les bâtiments passifs ou à énergie positive, et à des certifications environnementales (BREEAM, LEED). Bien qu'enraciné dans des pratiques traditionnelles comme l'architecture bioclimatique, ce mouvement a connu une accélération décisive depuis les années 1970 sous l'effet d'une prise de conscience globale.

Dans ce contexte, le BIM émerge comme un outil stratégique pour la construction durable, permettant de modéliser et simuler les performances des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie. Son adoption présente un intérêt particulier pour notre recherche, en offrant une méthodologie rigoureuse pour concrétiser les principes de durabilité à toutes les phases du projet architectural.

Définition de l'optimisation énergétique

Selon la définition du centre Delta expert “L'optimisation énergétique se rapporte à la façon dont on utilise (et surtout dont on économise) l'énergie dans un bâtiment”. L'optimisation énergétique consiste alors à réduire la consommation d'énergie tout en maintenant ou améliorant les performances des systèmes ou des bâtiments. Cette démarche vise à utiliser les ressources de manière efficace pour limiter les gaspillages, diminuer les coûts énergétiques et réduire l'impact environnemental.

Dans le secteur du bâtiment, cela implique d'adopter des pratiques, des technologies et des stratégies permettant une gestion intelligente de l'énergie durant tout le cycle de vie du projet. L'intégration de l'optimisation énergétique implique une intervention en amont de la construction visant principalement l'optimisation des choix (orientation, ouverture, phase conception) mais aussi lors de l'occupation du bâtiment en optimisant les équipements utilisés et la gestion des sources d'énergies. La réflexion autour de l'optimisation énergétique dans le bâtiment a fait l'objet de plusieurs recherches, qui mettent plus en avant l'intervention en phase d'occupation de l'espace. Ainsi l'optimisation se limite à l'amélioration du rendement thermique des équipements et la gestion de l'usage des sources d'énergie. Ceci est donc valable principalement pour les bâtiments existants. Or dans notre cas, on focalise sur l'apport du processus BIM pour l'ajustement de la consommation dès les premières phases de conception. Dans le cadre de ce travail, nous focalisons sur les phases préliminaires du projet à savoir : la phase de programmation et la phase de conception. Nous allons ainsi mettre en valeur l'apport du BIM pour la prise de décision adéquate durant ces phases.

Pour ce faire, nous avons dressé une matrice d'identification des paramètres agissant sur le comportement énergétique du bâtiment par phase de projet, en fonction des piliers du développement durable. Cette première phase permettra de dégager les informations qui seront exploitées par les logiciels du BIM pour établir des actions précises et des choix efficaces.

| Projet | Développement durable | | | Processus BIM |
|--|---|--|---|--|
| Phase | Aspect environnemental | Aspect social | Aspect Économique | Maquette BIM |
| 1-Phase de Pré-études et analyse des besoins | Orientation adaptée au contexte Accessibilité au site | Accès Besoins fonctionnels Esthétiques | Coûts globaux du projet, Surface bâti répondant aux besoins et au budget | Modélisation volumétrique LOD 100/200 en intégrant le contexte. Premières simulations paramétriques de variantes architecturales. |
| 2- Phase de Conception Préliminaire (Esquisse) 3- Phase de conception détaillée (APS/APD) 4- Phase d'Études Techniques et de Consultation (PRO/DCE) | Orientation Matériaux Conformité règlementaire Choix architecturaux | Exigences fonctionnelles et esthétique Accessibilité – PMR Confort acoustique, visuel | Coût global d'investissement Surface optimisée ROI des solution énergétique | Modélisation LOD 300-400 et Simulation énergétiques axées sur les matériaux, les ouvertures, l'ombrage et les systèmes d'isolation. |
| 5-Phase de Suivi de Chantier (DET) | Gestion des déchets Transport des matériaux Réduction de nuisances sonores ou autres | Sécurité du chantier, des travailleurs. Formation aux techniques durable, suivi et résistance | Maîtrise des coûts, des délais, optimisation des ressources humaines, techniques | Suivi en temps réel des performances énergétiques |
| 6-Phase d'exploitation | Consommation réelle / consommation estimée Gestion des énergies renouvelables Empreinte carbone évaluer | Qualité de vie des usagers Flexibilité et adaptation de l'usage Services connectés | Coûts de la maintenance Valorisation immobilière et certification LEED/BREAM | Monitoring énergétique via IoT. Maintenance prédictive des systèmes CVC Réglage automatisé du digital Twin. |
| Fin de vie - Recyclage ou démolition | Démontage sélectif Réemploi des matériaux | Impact sur le paysage Réinsertion dans le territoire | Coûts de la déconstruction Economie circulaire Valeur résiduelle | Valorisation des matériaux Plan de démontage Bilan carbone fin de vie |

Tableau 1. Apport du développement durable et du BIM à chaque phase du projet

Ce tableau illustre les différentes phases du projet allant de la phase préliminaire de réflexion d'un projet architectural, jusqu'à la phase d'exploitation, de maintenance et de recyclage. A chaque phase, nous sommes en présence de paramètres en lien direct avec les dimensions du développement durable : aspect environnemental, social et économique. A chaque phase l'exploitation de la maquette numérique permet de contribuer à l'optimisation de l'efficacité énergétique en agissant sur les paramètres spécifiques. C'est dans cette continuité que les logiciels du BIM permettent à la fois de modéliser, de simuler et d'analyser afin d'optimiser les choix à faire avant le début de la construction. Cette étape est importante car elle développe des scénarios variables avec des couplages d'information difficile à identifier par le calcul. Ainsi le BIM se propose aujourd'hui comme un levier essentiel pour concevoir, construire et gérer des bâtiments alignés sur ces principes de construction durable. Il se présente comme un outil de la construction durable, permettant de relever les défis modernes de l'urbanisation et du changement climatique.

3. Rationalisation de la consommation énergétique : cas pratique de simulation

Le BIM constitue un outil d'aide à la prise de décision. En effet, dans chaque phase d'un projet, plusieurs scénarios sont mis en place, en variant des paramètres d'ordre relatifs à l'orientation, au pourcentage d'ouverture et au choix des matériaux. La capacité des logiciels BIM à intégrer des informations et de les coupler afin de donner de meilleurs résultats est essentielle pour trouver le bon compromis, entre confort thermique, optimisation énergétique et coûts. Grâce à sa capacité à modéliser, à analyser, à calculer et à simuler les performances d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie, le BIM permet une conception optimisée en intégrant, dès les premières étapes, des analyses énergétiques, des choix de matériaux écoresponsables et des stratégies de gestion de l'énergie.

Notre étude se concentre sur la phase de Pré projet, où l'analyse précoce de l'orientation, de l'enveloppe et des matériaux permet d'anticiper avec précision les performances énergétiques du bâtiment. Comme illustré dans notre modélisation, le géoréférencement du projet intègre systématiquement le site réel, capturant ainsi les paramètres environnementaux critiques (ensoleillement, vents, températures). Cette étape fondatrice garantit l'adéquation du projet avec son contexte climatique, transformant la maquette numérique en un véritable prototype réactif. Les simulations d'orientation, rendues possibles par cette approche, permettent d'analyser finement la course solaire et d'optimiser l'implantation du bâtiment. Cette capacité à tester et ajuster virtuellement les paramètres architecturaux avant toute réalisation concrète représente un saut méthodologique décisif, réduisant les incertitudes énergétiques dès les premières esquisses du projet. Avec l'usage du logiciel REVIT 2024, nous informons notre modèle avec des données comme l'orientation, l'ensoleillement et la spécification des matériaux identifiés pour l'enveloppe.

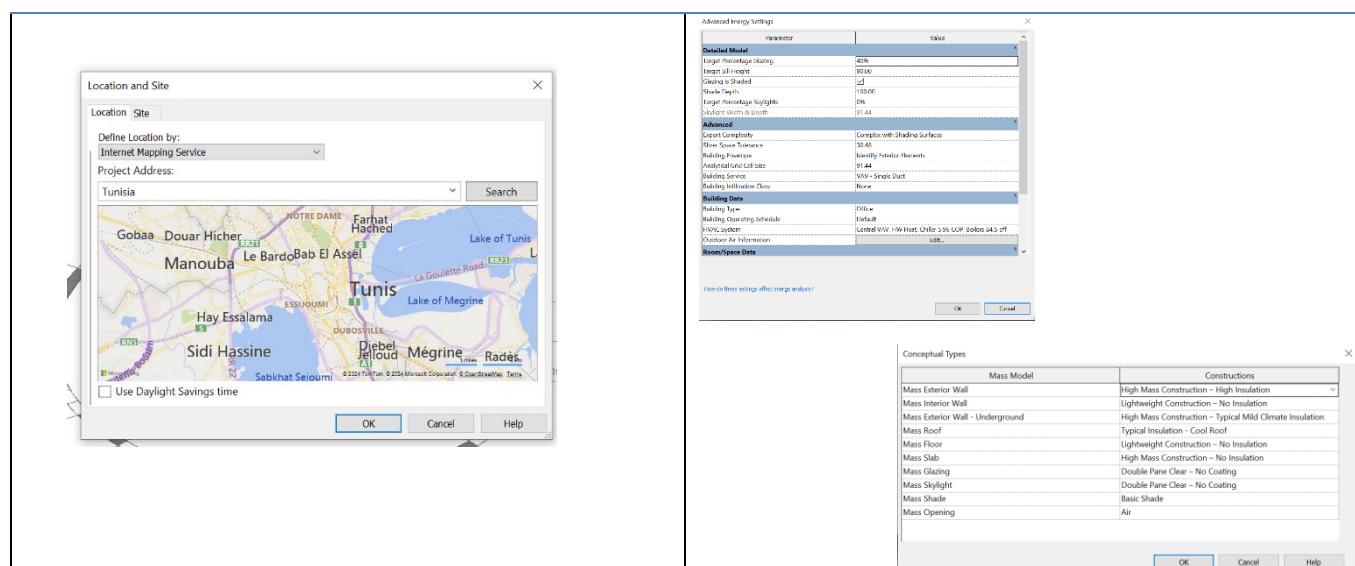
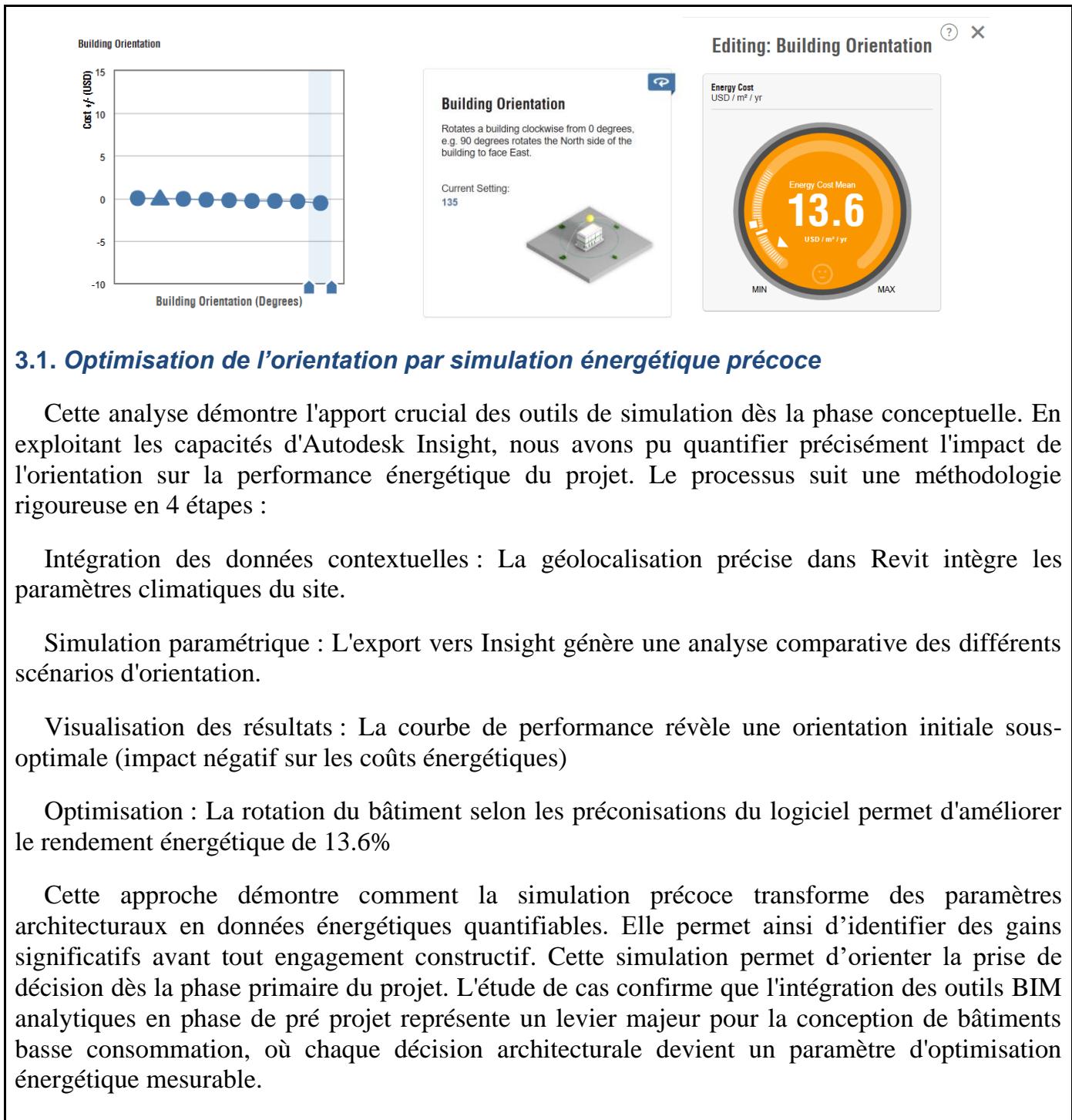


Tableau 2. Paramétrage de la localisation, de l'orientation, de l'ensoleillement pour l'optimisation énergétique.

Pour ce faire, la maquette numérique conceptuelle modélisée sur Revit et informée, permet de générer un modèle analytique énergétique MAE, qu'on envoie vers Insight pour analyse et propositions d'optimisation, en collaboration avec Green Building Studio en arrière-plan. Ainsi Autodesk Green Building Studio agit comme le moteur de calcul qui effectue les simulations et les analyses énergétiques dans le cloud. De son côté, Autodesk Insight fournit une interface utilisateur intuitive et visuelle qui permet de visualiser, interpréter et interagir avec les résultats produits par Green Building Studio. En envoyant le modèle vers Insight (A partir de l'interface Revit), nous pouvons explorer différents scénarios d'efficacité énergétique et d'émissions de carbone. Des changements seront ainsi mis en place pour optimiser l'efficacité énergétique du bâtiment tout en considérant le confort de l'usagers et le coût des changements. Un processus itératif établi sur la base d'un modèle numérique permettra ainsi, pour chaque projet, et pour chaque phase, de spécifier les paramètres clés pour optimiser l'énergie tout en considérant l'aspect environnemental, économique et social.



3.1. Optimisation de l'orientation par simulation énergétique précoce

Cette analyse démontre l'apport crucial des outils de simulation dès la phase conceptuelle. En exploitant les capacités d'Autodesk Insight, nous avons pu quantifier précisément l'impact de l'orientation sur la performance énergétique du projet. Le processus suit une méthodologie rigoureuse en 4 étapes :

Intégration des données contextuelles : La géolocalisation précise dans Revit intègre les paramètres climatiques du site.

Simulation paramétrique : L'export vers Insight génère une analyse comparative des différents scénarios d'orientation.

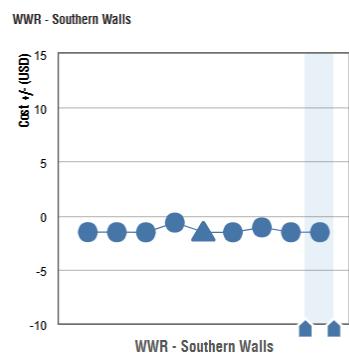
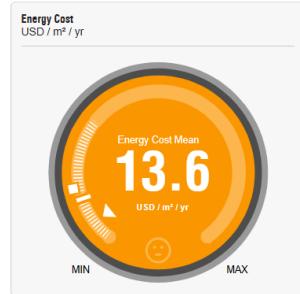
Visualisation des résultats : La courbe de performance révèle une orientation initiale sous-optimale (impact négatif sur les coûts énergétiques)

Optimisation : La rotation du bâtiment selon les préconisations du logiciel permet d'améliorer le rendement énergétique de 13.6%

Cette approche démontre comment la simulation précoce transforme des paramètres architecturaux en données énergétiques quantifiables. Elle permet ainsi d'identifier des gains significatifs avant tout engagement constructif. Cette simulation permet d'orienter la prise de décision dès la phase primaire du projet. L'étude de cas confirme que l'intégration des outils BIM analytiques en phase de pré projet représente un levier majeur pour la conception de bâtiments basse consommation, où chaque décision architecturale devient un paramètre d'optimisation énergétique mesurable.



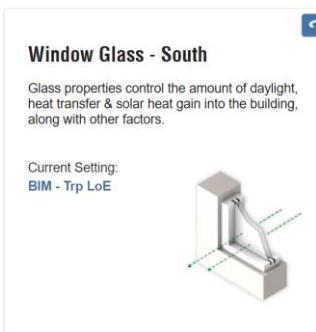
Editing: WWR - Southern Walls



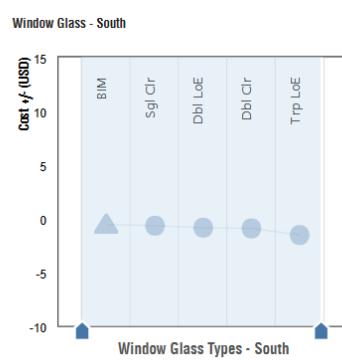
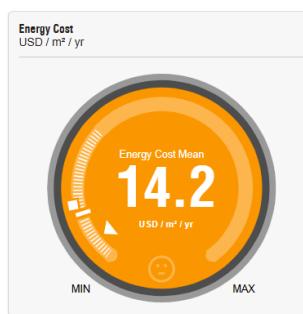
3.2. Optimisation des parois et des ouvertures par simulation énergétique précoce

Cet exemple permet de lire l'efficacité d'une approche combinant modélisation BIM sous Autodesk Revit et analyse énergétique avancée via Autodesk Insight pour optimiser les performances de l'enveloppe du bâtiment dès les phases conceptuelles. La méthode repose sur la création d'un modèle numérique paramétrique des parois intégrant précisément leur orientation, leur composition (épaisseur et nature des matériaux), ainsi que les caractéristiques des ouvertures (pourcentage de surface vitrée et types de vitrage). Ce modèle est ensuite exporté vers Insight où des simulations comparatives permettent d'évaluer rigoureusement les performances thermiques de chaque variante de conception.

Les résultats obtenus révèlent des gains énergétiques substantiels, avec une réduction démontrée des coûts d'exploitation atteignant 13,6 USD/m²/an. Cette approche présente l'avantage décisif de valider scientifiquement les choix constructifs dès l'esquisse, tout en permettant d'anticiper avec précision les performances réelles du bâtiment. Elle offre ainsi la possibilité d'équilibrer de manière optimale les impératifs architecturaux et énergétiques. L'étude confirme que l'optimisation précoce de l'enveloppe par simulation numérique constitue un levier majeur pour améliorer la performance globale des bâtiments, tout en générant des économies significatives sur les coûts d'exploitation. La flexibilité des outils employés permet par ailleurs d'explorer efficacement différentes alternatives pour identifier les solutions les plus performantes.



Editing: Window Glass - South



3.3. Optimisation des ouvertures par simulation énergétique précoce

L'approche consiste à intégrer dans le modèle numérique les caractéristiques techniques de chaque option de vitrage (facteur solaire, transmission lumineuse, coefficient U, etc.), tout en maintenant constants les autres paramètres de l'enveloppe (orientation, épaisseur des parois, isolation). Ces données sont ensuite exportées vers Insight, où des simulations thermiques dynamiques permettent d'évaluer l'influence de chaque vitrage sur les besoins en chauffage, en refroidissement et en éclairage artificiel.

Les résultats mettent en évidence des écarts entre les solutions testées, avec des variations sur la consommation énergétique annuelle selon le type de vitrage sélectionné. Les vitrages optimaux

permettent de réduire les pics de charge thermique tout en optimisant les apports lumineux naturels. Cette méthode permet ainsi d'objectiver le choix des vitrages en quantifiant leur impact sur l'efficacité énergétique du projet dès la phase de conception.

L'étude confirme que l'analyse comparative des vitrages par simulation numérique offre une aide à la décision précieuse, permettant de concilier exigences architecturales (transparence, esthétique) et performances énergétiques. La flexibilité des outils utilisés facilite l'exploration de différents scénarios, garantissant la sélection de la solution optimale en termes de coûts globaux et de confort thermique. En intégrant ces évaluations en amont du processus de conception, il devient possible d'éviter des surcoûts ultérieurs tout en maximisant l'efficacité énergétique du bâtiment.

Tableau 3. Exemple de simulation énergétique par application sur *Insight*

Autodesk Green Building Studio (GBS) constitue le moteur de calcul énergétique qui alimente les analyses d'Insight en arrière-plan. Cette plateforme cloud-based effectue des simulations thermiques dynamiques complètes, évaluant les performances énergétiques du bâtiment sur la base des données géométriques et techniques transmises par Revit via Insight. GBS intègre des algorithmes avancés permettant de calculer les consommations énergétiques annuelles, les charges thermiques et les émissions de CO₂, tout en tenant compte des conditions climatiques locales et des caractéristiques des matériaux. Son couplage avec Insight offre une chaîne d'analyse cohérente, où GBS fournit les résultats bruts tandis qu'Insight les restitue sous forme d'indicateurs visuels et de recommandations actionnables. Cette synergie permet aux concepteurs d'optimiser rapidement les paramètres du bâtiment pour atteindre les objectifs de performance énergétique dès les premières phases de conception.

Intégration du BIM dans une démarche PDCA pour une optimisation énergétique itérative

Notre approche démontre comment les outils BIM s'inscrivent naturellement dans une logique d'amélioration continue selon le cycle Plan-Do-Check-Act (PDCA), créant ainsi un processus dynamique d'optimisation énergétique. Une fois les choix initiaux validés par simulation, le modèle numérique est systématiquement repris et affiné, formant une boucle vertueuse entre conception et analyse.

Mise en œuvre intégrée du PDCA via le BIM :

- *Plan* (Planifier) : Les objectifs énergétiques ambitieux sont traduits en paramètres simulables (orientation, matériaux, vitrages) dans la maquette conceptuelle Revit.
- *Do* (Déployer) : Le modèle est exporté vers Insight et Green Building Studio pour générer des scénarios optimisés, aboutissant à des choix conceptuels éclairés par des données quantitatives.
- *Check* (Vérifier) : Les performances simulées sont confrontées aux références du projet, identifiant les écarts et nouvelles opportunités d'optimisation.
- *Act* (Agir) : La maquette BIM est alors mise à jour avec les ajustements validés, relançant un nouveau cycle d'amélioration.

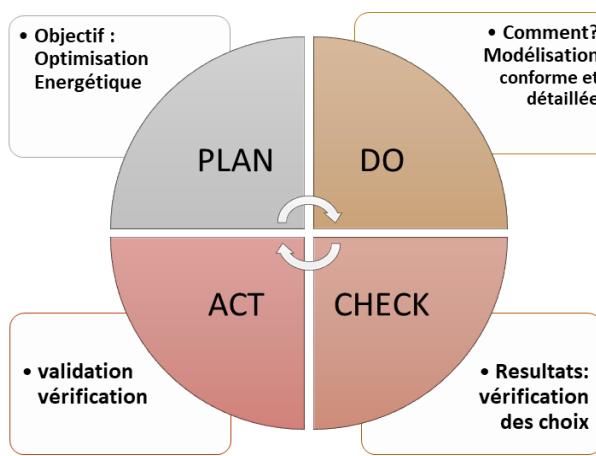


Figure 3. Illustration du cycle Plan-Do-Check-Act

Cette méthodologie transforme le BIM bien plus qu'un simple outil de modélisation : il devient le support d'un processus itératif où chaque analyse énergétique alimente la conception suivante. Les gains démontrés (comme les 13.6 USD/m²/an sur l'enveloppe ou les 8-12% sur les vitrages) résultent directement de cette capacité à tester, mesurer et perfectionner en continu.

En synchronisant parfaitement le flux BIM (modélisation → simulation → ajustement) avec le cycle PDCA, nous établissons un cadre rigoureux pour des bâtiments toujours plus performants. Cette intégration méthodologique explique pourquoi notre approche devrait s'étendre à toutes les phases du projet, chaque étape bénéficiant des enseignements des précédentes pour une optimisation globale du cycle de vie.

Conclusion

L'optimisation énergétique dans le bâtiment, lorsqu'elle s'appuie sur une **stratégie BIM explicitement focalisée sur l'efficacité énergétique**, se révèle être un levier déterminant pour atteindre les objectifs de durabilité. Cette approche ne se limite pas à l'adoption d'outils isolés, mais repose sur une **intégration systématique des données énergétiques** tout au long du cycle de vie du projet, permettant une analyse continue et une amélioration itérative des performances.

En phase de conception, le BIM énergétique permet une optimisation précoce grâce à des outils comme Revit couplé à Insight. Ces plateformes génèrent des données quantitatives sur les performances thermiques qui guident les choix architecturaux. La modélisation paramétrique offre la possibilité d'évaluer des centaines de variantes en quelques heures, identifiant les solutions optimales en termes d'orientation, de compacité et de composition de l'enveloppe. Les analyses de lumière naturelle et les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics) viennent compléter cette approche data-driven.

La phase d'exécution voit émerger de nouveaux enjeux de traçabilité énergétique. Des solutions comme BIM 360 permettent de suivre en temps réel les caractéristiques réelles des matériaux mis en œuvre et leur conformité aux spécifications énergétiques initiales. La géolocalisation des équipements et le suivi des procédés constructifs créent une base de données essentielle pour le futur exploitant. Cette phase cruciale permet de réduire l'écart fréquent entre performances théoriques et réelles.

L'exploitation du bâtiment bénéficie directement de cette capitalisation des données. Les systèmes CMMS (Computerized Maintenance Management Systems) intègrent désormais les maquettes BIM enrichies, permettant une gestion préventive des équipements énergétiques. L'analyse des données de consommation en temps réel, couplée à des algorithmes de machine Learning, détecte les dérives et propose des scénarios d'optimisation. Le digital Twin ou jumeaux numériques devient ainsi un outil de pilotage énergétique dynamique.

La croissance exponentielle du volume de données nécessite le développement de compétences avancées en gestion des données. Toutefois, plusieurs défis persistent, comme l'interopérabilité entre les logiciels, qui exige l'adoption de formats standardisés tels que l'IFC énergétique. Par ailleurs, la valeur juridique des données énergétiques dans le cadre du BIM, particulièrement pour le contrôle des engagements contractuels, nécessite plus de clarification.

Cette évolution vers un BIM énergétique data-driven transforme profondément les métiers du bâtiment. Les concepteurs deviennent analystes énergétiques, les exploitants se muent en data managers, et les maîtres d'ouvrage exigent des garanties chiffrées de performance. Cette révolution numérique, si elle est correctement maîtrisée, permettra d'atteindre les ambitieux objectifs de neutralité carbone du secteur. Les prochaines recherches devront se concentrer sur l'intégration des données énergétiques tout au long du cycle de vie, et sur le développement d'indicateurs prédictifs plus fins.

Bibliographie

- [AZH 11] Azhar, S. « Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry », *Leadership and Management in Engineering*, n° 11(3), p. 241-252, 2011.
- [AZH 11a] Azhar, S. « Building Information Modeling (BIM): A New Paradigm for Energy-Efficient Design », *Journal of Architectural Engineering*, 2011.
- [EAS 18] Eastman, C. et al. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, and Contractors*, 3rd ed. Wiley, 2018.
- [KAB 15] Kaboré, M. « *Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne* ». Université Grenoble Alpes; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Smart Grid and Renewable Energy, Vol.12 No.7, July 30, 2015.
- [LIU 20] Liu, S. et al. « *Digital Twin-Driven Building Energy Efficiency: A Review*, *Energy and Buildings* », *Energies*, n°15. 2022.
- [PUL 21] Pu, L.L. and Wang, Y.M. « The Combination of BIM Technology with the Whole Life Cycle of Green Building». *World Journal of Engineering and Technology*, n° 9, (2021).
- [LUY 17] Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., & Li, Y. « Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A systematic review and future directions », *Automation in Construction*, n° 83, p.134-148, 2017.
- [YAN 21] Yang, C. L., & Mao, L. « Analysis on Risk Factors of BIM Application in Construction Project Operation and Maintenance Phase ». *Journal of Service Science and Management*, n° 14, p. 213-227, 2021.
- [CIC 23] Ciccozzi, A.; de Rubeis, T.; Paoletti, D; Ambrosini, D. « BIM to BEM for Building Energy Analysis: A Review of Interoperability Strategies ». *Energies*, n° 16, 7845, 2023.
- [MDA 18] Md. Aslam, K. W. Yeoh « BIM for Existing Buildings: Opportunities and Barriers ». 3rd International Conference on Building Materials and Construction, 2018