



Repenser les patios enterrés de Bulla Regia : une lecture intégrée entre HBIM, performance climatique et design situé

Aida Hermi^{*} et Héra Oueslati^{}**

Résumé

Le site archéologique de Bulla Regia, en Tunisie, se distingue par ses maisons à patios enterrés, uniques dans le monde romain par leur systématisme et leur degré de sophistication. Ces dispositifs architecturaux constituent un terrain privilégié pour analyser les stratégies bioclimatiques mises en œuvre en contexte méditerranéen semi-aride. Afin de dépasser les limites liées à l'état fragmentaire du bâti antique, cette recherche adopte une méthodologie intégrée combinant Heritage Building Information Modeling (HBIM), simulations thermo-aérodynamiques et approche de design situé. Le modèle HBIM, élaboré à partir des données archéologiques, des relevés existants et des corpus de référence de Thébert (1985) et Aïachi (2003), est enrichi par une reconstruction paramétrique permettant de formaliser plusieurs scénarios géométriques selon les niveaux d'incertitude. Les simulations climatiques, calibrées sur des données locales et accompagnées d'analyses de sensibilité, mettent en évidence la capacité du patio enterré à atténuer les variations thermiques, à stabiliser le microclimat intérieur et à favoriser une ventilation naturelle efficace grâce à la géométrie en double niveau. L'intégration du design situé permet d'interpréter ces résultats au regard des usages, des pratiques domestiques et des formes de confort adaptatif propres aux sociétés antiques, évitant ainsi toute lecture strictement technocentrée. Cette étude propose un cadre méthodologique hybride, transférable à l'analyse d'autres architectures anciennes en climat chaud, et ouvre des perspectives pour une réappropriation critique des savoirs climatiques du passé dans la conception architecturale contemporaine.

Mots-clés : Patios enterrés, Bulla Regia, HBIM, bioclimatisme, design situé.

Abstract

The archaeological site of Bulla Regia, Tunisia, is distinguished by its houses with sunken courtyards, which are unique in the Roman world due to their systematic use and high level of sophistication. These architectural devices provide an exceptional case study for investigating Roman bioclimatic strategies in a Mediterranean semi-arid context. To overcome the limitations related to the fragmentary state of the ancient remains, this study adopts an integrated methodology combining Heritage Building Information Modeling (HBIM), thermo-aerodynamic simulations, and a situated design approach. The HBIM model, developed from archaeological data, architectural surveys, and the reference corpora of Thébert (1985) and Aïachi (2003), is enriched through parametric reconstruction, allowing the exploration of multiple geometric scenarios according to varying levels of uncertainty. Climate simulations, calibrated using local climatic data and supported by sensitivity analyses, demonstrate the

^{*} Enseignante, l'école nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis, Université de Carthage.

^{**} Maître-assistante, institut supérieur des arts et métiers de Kairouan, Université de Kairouan.

capacity of the sunken courtyard to reduce temperature fluctuations, stabilize the indoor microclimate, and promote effective natural ventilation through its double-level geometry. The integration of situated design enables an interpretation of these results in relation to ancient domestic practices and adaptive comfort, avoiding a purely technocentric reading. This research proposes a transferable methodological framework for the analysis of ancient architecture in hot climates and highlights the relevance of historical climatic knowledge for contemporary sustainable design.

Keywords: sunken courtyards; Bulla Regia; HBIM; bioclimatic architecture; situated design.

الملخص

يُعدّ الموقع الأثري لبولا ريجيا في تونس من أبرز المواقع التي تميّزت بالأفنية المطمورة، مما يجعله مجالاً ممتازاً لدراسة العمارة البيوكليماتية الرومانية ضمن مناخ شبه جاف متوسطي. ولتجاوز قيود التهدم الجزئي، تعتمد هذه الدراسة منهجية متكاملة تجمع بين نمذجة معلومات المباني التراثية (HBIM)، والمحاكاة الحرارية والهوائية، ومقاربة التصميم الموقعي. وقد طُوّر نموذج الـ HBIM انطلاقاً من البيانات الأثرية، والرفع المعماري، وأعمال تبيير (1985) وعياشي (2003)، مع إثارته بإعادة بناء بارامترية لاختبار عدة سيناريوهات هندسية وفق درجات مختلفة من عدم اليقين. تُظهر المحاكاة قدرة الفناء المطمور على تقليل التقلبات الحرارية، وتحقيق استقرار المناخ الداخلي، وتعزيز التهوية الطبيعية بفضل تكوينه ثنائي المستوى. وتسمح مقاربة التصميم الموقعي بفهم هذه النتائج في ضوء أنماط العيش القديمة والراحة المناخية، مقدمةً إطاراً منهجياً قابلاً للتطبيق لدراسة العمارة القديمة في المناخات الحارة.

الكلمات المفتاحية: العمارة البيوكليماتية، التصميم الموقعي، HBIM، الأفنية المطمورة، بولا ريجيا.

Pour citer cet article

Aida Hermi et Héra Oueslati, « Repenser les patios enterrés de Bulla Regia : une lecture intégrée entre HBIM, performance climatique et design situé », *Al-Sabîl : Revue d'Histoire, d'Archéologie et d'architecture maghrébines* [En ligne], n°22, année 2026.

URL : <http://www.al-sabil.tn/?p=11611>



Introduction

À l'heure où les disciplines de l'architecture et de l'archéologie sont reconfigurées par les enjeux climatiques contemporains, les architectures anciennes apparaissent comme des réservoirs de savoirs environnementaux encore largement sous-exploités. Loin d'être de simples témoins du passé, elles incarnent des systèmes d'adaptation climatique intégrant géométrie, matière et usages dans une intelligence environnementale située. Dans ce contexte, le site archéologique de Bulla Regia, en Tunisie, occupe une place singulière : ses maisons à patios enterrés, uniques dans le monde romain par leur systématique, constituent un terrain privilégié pour interroger les relations entre architecture, climat et modes d'habiter en milieu méditerranéen semi-aride.

Longtemps appréhendés sous l'angle typologique et historique (Thébert, 1985 ; Aïachi, 2003), les patios enterrés de Bulla Regia appellent aujourd'hui une relecture capable de dépasser la description morphologique pour en révéler la logique environnementale. La profondeur habitée apparaît comme une stratégie climatique intégrée, mobilisant l'inertie thermique du sol, la régulation hygrométrique et la ventilation naturelle. Toutefois, l'état fragmentaire du bâti et l'incertitude inhérente aux données archéologiques ont longtemps limité toute évaluation rigoureuse de leurs performances thermo-aérauliques.

La problématique de cet article se situe à l'intersection entre patrimoine archéologique et analyse environnementale : comment analyser, de manière scientifiquement robuste, la performance climatique d'un dispositif architectural antique partiellement conservé, sans réduire l'architecture à une simple machine thermique abstraite ?

Pour répondre à cette question, cette étude propose une approche intégrée combinant Heritage Building Information Modeling (HBIM) et simulations thermo-aérauliques. Le HBIM est mobilisé comme un modèle cognitif capable de formaliser plusieurs hypothèses de reconstruction et de rendre explicite le degré d'incertitude associé à chaque scénario. En s'appuyant sur les corpus de référence de Thébert (1985) et Aïachi (2003), enrichis par une reconstruction paramétrique, le modèle devient un support opératoire pour l'analyse des performances climatiques du patio enterré.

Les simulations, calibrées selon des scénarios climatiques locaux et accompagnées d'analyses de sensibilité, permettent de quantifier les capacités de régulation thermique et de ventilation naturelle de ces dispositifs à double niveau. L'interprétation des résultats est toutefois replacée dans une lecture attentive des usages et des modes d'habiter, afin d'éviter toute approche anachronique, en cohérence avec les apports récents sur le HBIM et le patrimoine bâti (Fai & Wood, 2012).

L'article développe ainsi un cadre méthodologique hybride, articulant archéologie du bâti, HBIM et modélisation environnementale, transférable à d'autres contextes antiques ou vernaculaires en climat méditerranéen. En replaçant les patios enterrés de Bulla Regia au croisement des sciences du patrimoine et des outils numériques, cette recherche contribue à une meilleure compréhension des stratégies climatiques anciennes et ouvre des perspectives pour leur mobilisation critique dans la réflexion architecturale contemporaine.

1. Penser le patio enterre : savoirs anciens, technologies émergentes et écologies du confort

1.1. Archéologie du frais : continuités bioclimatiques méditerranéennes

Loin d'être marginal, le recours à la fraîcheur souterraine s'inscrit dans une longue tradition de savoirs bioclimatiques développés dans l'aire méditerranéenne et les régions à climat chaud.



Dès l'Antiquité, l'architecture romaine met en œuvre des stratégies de régulation thermique passive fondées sur l'inertie des matériaux, la gestion de l'ombre, la ventilation naturelle et l'interaction avec le sol. Le patio enterré de Bulla Regia constitue l'une des expressions les plus abouties de cette intelligence environnementale (Thébert, 1985).

L'« archéologie du frais » vise à reconstituer des écologies du confort historiquement situées, où le confort thermique résulte d'un ajustement fin entre climat, architecture et usages, plutôt que d'une stabilité mécanique des températures. Dans cette perspective, le patio enterré, espace à ciel ouvert profondément ancré dans le substrat, combine plusieurs leviers bioclimatiques : inertie thermique, contrôle de l'ensoleillement, circulation de l'air et contact avec le sol pour produire une fraîcheur vécue et socialement intégrée (Rapoport, 1969).

À Bulla Regia, la généralisation des maisons à double niveau témoigne d'un savoir constructif stabilisé et partagé, relevant d'une norme culturelle de l'habiter plutôt que d'une adaptation ponctuelle. La diffusion cohérente de ces dispositifs à l'échelle de quartiers entiers suggère que leur performance climatique était empiriquement éprouvée et reconnue comme structurante du confort domestique en contexte semi-aride (Aïachi, 2003).

Inscrits dans une généalogie méditerranéenne de l'architecture du frais, les patios enterrés de Bulla Regia illustrent une culture constructive capable d'articuler contraintes environnementales et valeurs sociales. Toutefois, la performance climatique de ces dispositifs est longtemps restée présumée plutôt que démontrée, en raison de l'absence de données mesurées et des difficultés de reconstitution des conditions anciennes. Les outils numériques contemporains permettent désormais de dépasser cette limite en objectivant, quantifiant et comparant les effets thermiques et aérauliques de ces formes architecturales.

Envisagée comme une archéologie du frais, l'étude des patios enterrés de Bulla Regia constitue ainsi un socle théorique pour un dialogue entre archéologie du bâti, modélisation environnementale et sciences du design, renouvelant la lecture des architectures anciennes comme systèmes bioclimatiques performants, situés et culturellement médiés.

1.2. HBIM comme épistémologie du fragment et de l'incertitude

L'analyse des architectures antiques se heurte structurellement à une tension épistémologique majeure : comment produire une connaissance rigoureuse à partir d'objets bâtis incomplets, altérés et partiellement hypothétiques ? Contrairement au bâti contemporain, le patrimoine archéologique ne se donne jamais comme un système clos, mais comme un ensemble de fragments matériels, de lacunes documentaires et d'interprétations savantes. Dans ce contexte, le Heritage Building Information Modeling (HBIM) ne peut être réduit à un simple outil de restitution tridimensionnelle ; il constitue un dispositif épistémique, capable de formaliser l'incertitude, de structurer des hypothèses concurrentes et de rendre explicite le statut cognitif de chaque décision de modélisation.

Les premières applications du HBIM ont principalement cherché à transposer les logiques du BIM contemporain vers le patrimoine, en privilégiant la précision géométrique et l'archivage des données historiques (Murphy, McGovern, & Pavia, 2009). Or, cette approche, efficace pour des édifices bien documentés, montre rapidement ses limites lorsqu'elle est appliquée à des sites archéologiques fragmentaires, où la reconstruction repose nécessairement sur des inférences, des analogies typologiques et des choix interprétatifs. La littérature récente souligne ainsi la nécessité d'un changement de paradigme, passant d'un HBIM de restitution à un HBIM d'exploration et de raisonnement (López et al., 2020).

Dans le cas des maisons à patios enterrés de Bulla Regia, cette problématique est centrale. L'absence de superstructures conservées, l'incertitude sur les hauteurs, les dispositifs de



couverture ou les ouvertures verticales rendent toute reconstitution unique scientifiquement intenable. Le HBIM est ici mobilisé comme un cadre paramétrique, permettant de générer plusieurs scénarios géométriques cohérents, chacun explicitement associé à un degré d'incertitude. Cette approche transforme le modèle numérique en un espace de négociation entre données archéologiques, hypothèses savantes et contraintes physiques, plutôt qu'en une image figée prétendant à l'exactitude.

Conceptualiser le HBIM comme une épistémologie du fragment implique également de reconnaître que la valeur scientifique du modèle ne réside pas uniquement dans sa précision métrique, mais dans sa capacité à documenter les écarts, les zones d'ombre et les hypothèses implicites. Plusieurs auteurs plaident ainsi pour un HBIM « critique », intégrant des métadonnées sémantiques sur la provenance, la fiabilité et le statut interprétatif des informations (Dore & Murphy, 2017). Dans cette perspective, l'incertitude n'est plus un défaut à masquer, mais une dimension constitutive de la connaissance patrimoniale.

Cette posture est particulièrement déterminante lorsqu'il s'agit de coupler le HBIM à des simulations thermo-aérauliques. Les modèles énergétiques exigent des géométries, des matériaux et des conditions limites clairement définis, alors même que ces paramètres sont souvent partiellement inconnus pour le bâti antique. En intégrant l'incertitude dès la phase de modélisation HBIM, il devient possible de conduire des analyses de sensibilité et de comparer les performances climatiques relatives de différents scénarios, plutôt que de chercher une valeur absolue illusoire. Le HBIM agit alors comme une interface méthodologique entre l'archéologie du bâti et les sciences de l'ingénieur, rendant explicite le passage de l'hypothèse à la simulation.

Enfin, envisager le HBIM comme une épistémologie engage une réflexion plus large sur la nature de la preuve en archéologie architecturale. Le modèle numérique ne remplace ni l'interprétation archéologique ni l'analyse historique, mais il en devient un prolongement opératoire, capable de tester la plausibilité physique de scénarios interprétatifs. Dans le cas de Bulla Regia, cette démarche permet de dépasser l'opposition stérile entre reconstruction hypothétique et abstention analytique, en proposant un cadre rigoureux où les fragments matériels, les savoirs historiques et les lois physiques co-produisent la connaissance.

1.3. Le design situé : relier climat, culture et expérience habitée

Si l'archéologie du frais met en évidence la continuité des savoirs bioclimatiques méditerranéens et si le HBIM offre un cadre pour penser le fragment et l'incertitude, ces approches restent insuffisantes sans une prise en compte de l'expérience habitée. Le design situé intervient ici comme une posture théorique permettant d'articuler données climatiques, formes architecturales et pratiques sociales dans leur contexte culturel et environnemental spécifique. S'opposant à une lecture universaliste ou strictement techniciste du confort thermique, le design situé considère le confort comme une construction à la fois physique et culturelle, façonnée par des usages, des normes sociales et des rythmes de vie historiquement situés (Shove, 2003). Appliquée aux architectures antiques, cette approche évite d'évaluer les dispositifs du passé à l'aune de standards contemporains inadaptés.

Dans le cas des patios enterrés de Bulla Regia, le design situé invite à les comprendre non seulement comme des dispositifs climatiques performants, mais comme des espaces relationnels structurant pratiques quotidiennes, hiérarchies domestiques et usages saisonniers. La fraîcheur produite par la profondeur ne se réduit pas à des valeurs mesurables, mais s'exprime à travers des gradients sensoriels et des transitions spatiales participant à la qualité vécue de l'espace (Pallasmaa, 2005).

Le design situé permet également de relier les résultats de la modélisation numérique à des scénarios d'usage plausibles, en croisant simulations thermo-aérauliques, données archéologiques

et connaissances sur les pratiques sociales romaines. Les performances climatiques peuvent ainsi être interprétées comme des conditions favorables à certaines activités et formes de confort adaptatif, plutôt que comme des valeurs abstraites (Nicol & Humphreys, 2002).

2. Construire l'invisible : une méthodologie intégrée HBIM, simulation et design

2.1. Données, corpus et reconstruction paramétrique du bâti antique

Les maisons romaines bâties sur caves sont très rares. Hormis quelques rares exceptions, les sous-sols découverts appartiennent tous aux habitations de la ville de Bulla Regia. La reconstruction repose sur un corpus de données hétérogène, combinant vestiges archéologiques, résultats de fouilles, relevés graphiques des plans architecturaux, plans de mosaïques, descriptions historiques et hypothèses interprétatives issues de la littérature scientifique. Les travaux de référence de Thébert (1985) et d'Aïachi (2003) constituent le socle documentaire principal, en proposant une lecture typologique des habitations, une analyse de l'organisation spatiale et des informations détaillées sur les matériaux et les techniques constructives. Ces données sont complétées par les études issues des fouilles publiées par S. Bullo et F. Ghedini (2003), qui s'appuient sur des relevés des plans et des mosaïques des domus monumentales. Ces documents graphiques (fig1) apportent des éléments déterminants pour la compréhension des volumes, de la hiérarchisation des espaces et de la dimension représentative des maisons à patios enterrés dans le contexte urbain de Bulla Regia.

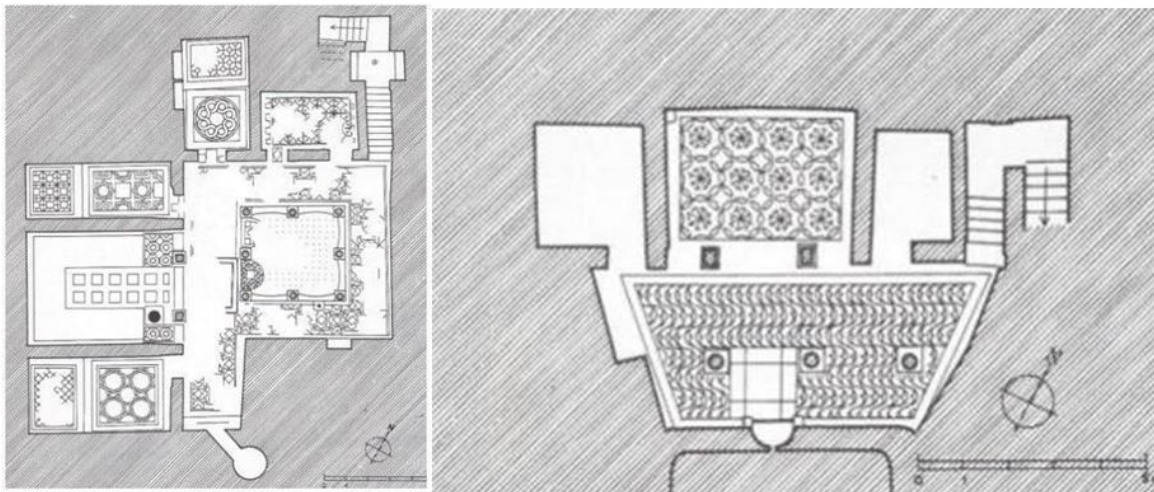


Fig. 1. Maison de la chasse nouvelle (nuova Caccia), Bulla Regia, à gauche, Plan rez-de-chaussée, à droite plan de cave. Source : *S.Bullo et F.Ghedini, 2003, p.50.*

Sur la base de ces sources, un prototype de maison romaine à patio enterré a été reconstitué (A. Hermi, 2017), intégrant la hiérarchie fonctionnelle des espaces (fig.2). La légende fonctionnelle a été intégrée au modèle HBIM afin de relier les performances climatiques simulées aux usages supposés des espaces. Cette articulation entre fonction et climat constitue un point clé de la démarche, permettant de dépasser une modélisation purement géométrique.

A1: Impluvium
 A2: Hortus
 B1: Atrium
 B2: Péristyle
 C: Les pièces d'habitation
 D: Triclinum
 E: Commerce
 F: Etage
 G: Thermes privé

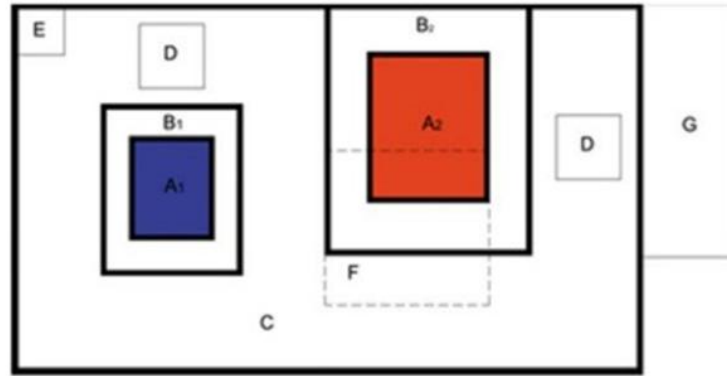


Fig. 2. Modèle structural de la Domus.

Source : A. Hermi, 2017, p.178.

La reconstruction n'a pas cherché à produire une restitution unique et définitive, mais s'est appuyée sur une logique paramétrique, autorisant des variations contrôlées de hauteur, de proportions du patio, d'épaisseur des murs et de degré d'enfouissement. Cette approche permet d'explorer un ensemble de configurations plausibles plutôt qu'un modèle figé, en cohérence avec l'état fragmentaire du bâti antique (fig.3). Le paramétrage devient ainsi un outil heuristique, au service de l'analyse climatique, plutôt qu'un simple procédé de modélisation. Les matériaux ont été définis conformément aux données archéologiques : murs massifs en pierre locale, planchers traditionnels, absence totale d'isolation ou de revêtements modernes. Ce choix méthodologique vise à évaluer le comportement thermique intrinsèque de l'architecture antique, sans optimisation contemporaine, et à restituer au plus près les conditions constructives romaines.



Fig. 3. Modélisation 3D.

Source : *Raslen Ben Amor, 5^e année Architecture, ENAU.*

2.3. HBIM comme modèle cognitif : scénarios, incertitudes et règles de modélisation

Le modèle HBIM développé pour cette étude ne se limite pas à une fonction de représentation tridimensionnelle. Il est conçu comme un modèle cognitif. Chaque élément du bâti est associé à un niveau de fiabilité, distinguant les données attestées archéologiquement, les hypothèses fortement probables et les reconstructions conjecturales fondées sur analogies typologiques.

Cette structuration permet de générer plusieurs scénarios géométriques, correspondant à différentes hypothèses sur les superstructures, les hauteurs des espaces ou les dispositifs d'ouverture. Ces scénarios sont ensuite mobilisés dans les simulations thermo-aérauliques afin d'évaluer la sensibilité des performances climatiques aux variations morphologiques.

Les règles de modélisation ont été définies de manière à préserver la cohérence historique du bâti : absence de systèmes mécaniques, continuité matérielle des murs, relations directes entre patio, espaces de vie et circulations. Le choix de ne pas intégrer de systèmes HVAC est fondamental, car il conditionne l'interprétation des résultats énergétiques. Le bâtiment est envisagé comme un système passif intégral, où la forme architecturale et les matériaux assurent l'essentiel du confort thermique. Cette approche critique du HBIM permet d'éviter l'illusion de précision souvent associée aux modèles numériques.

2.4. Modélisation thermo-aéraulique et inscription des dimensions humaines

Les simulations thermo-aérauliques ont été menées en s'appuyant sur des scénarios climatiques locaux représentatifs du contexte méditerranéen semi-aride. Deux outils complémentaires ont été mobilisés : Insight, utilisé dans une première phase exploratoire à des fins comparatives (fig.4), et EDGE, retenu comme outil principal en raison de sa capacité à simuler un bâtiment sans systèmes HVAC, condition indispensable à l'étude d'une architecture antique fondée exclusivement sur des dispositifs passifs.

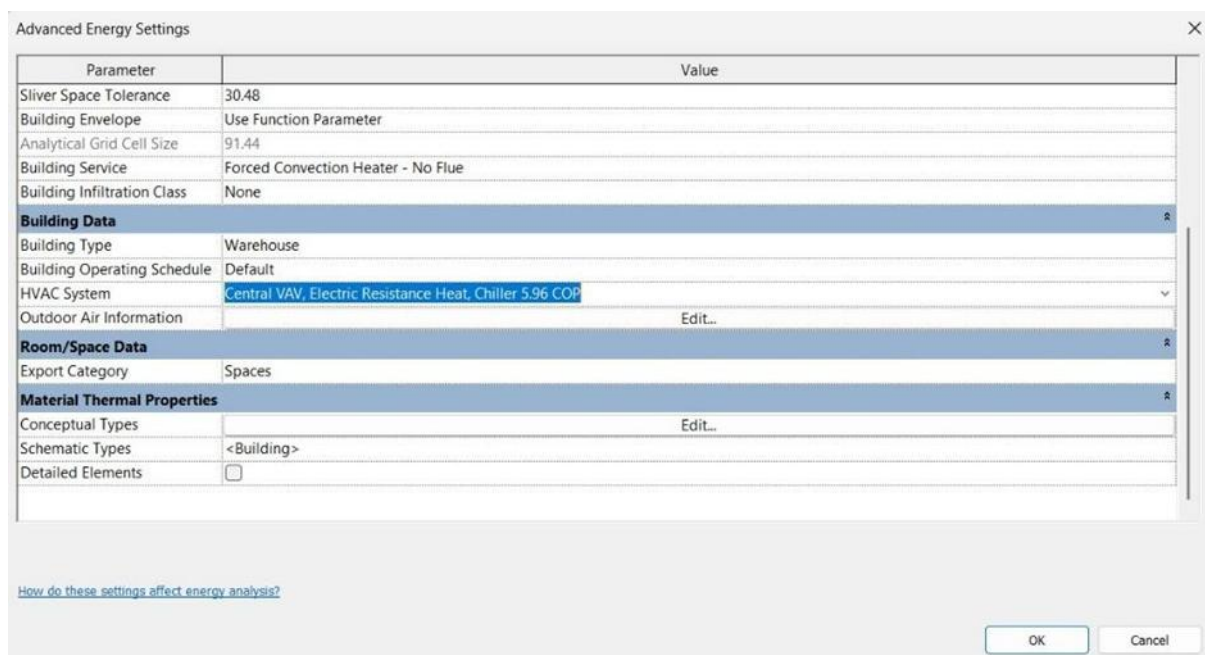


Fig. 4. Interface Insight.
Source : *Photo des auteurs*

La principale contrainte méthodologique réside dans l'inadéquation partielle des outils contemporains aux logiques bioclimatiques des architectures historiques. L'impossibilité de supprimer entièrement les systèmes mécaniques dans Insight a conduit à privilégier EDGE, seul outil permettant de modéliser un bâtiment à consommation énergétique nulle (fig.5). Ce choix met en évidence le décalage structurel entre les standards actuels de la simulation énergétique, conçus pour des bâtiments contemporains, et les principes de fonctionnement des architectures antiques.

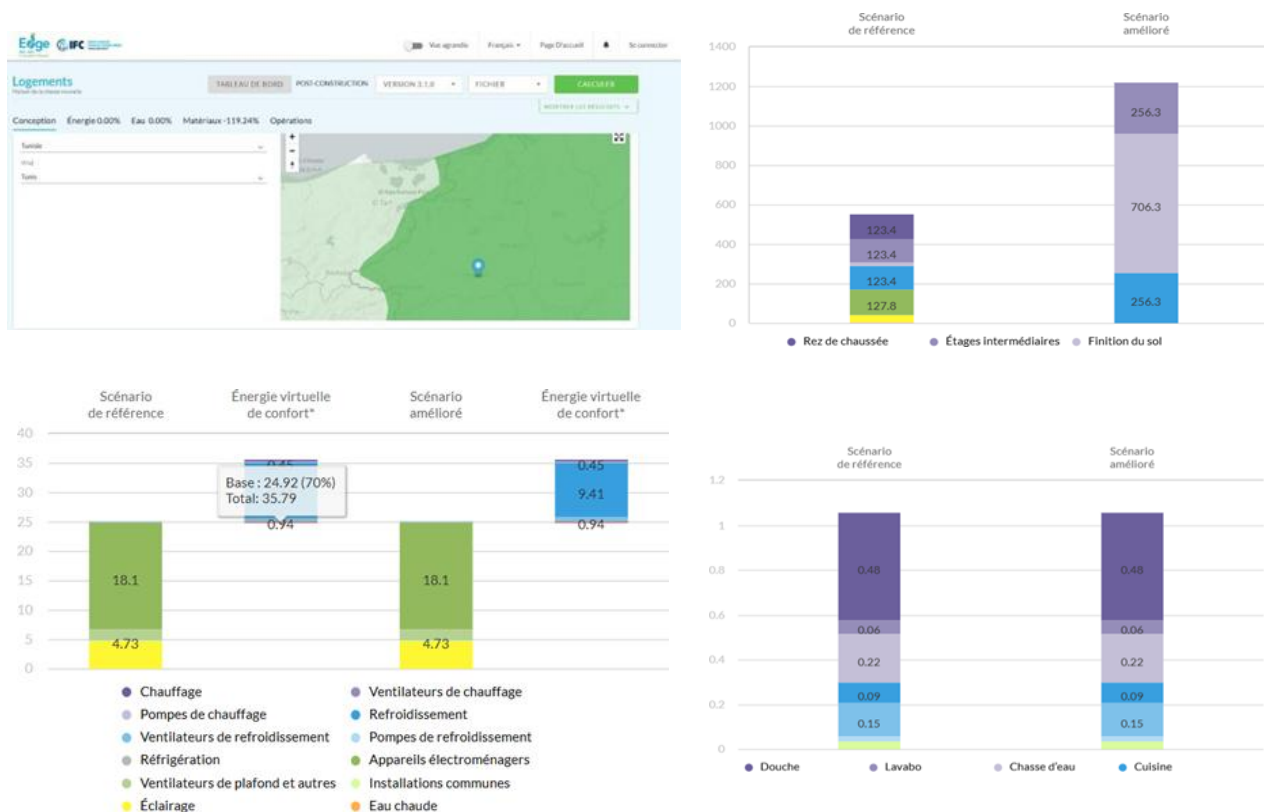


Fig. 5. Interface du logiciel EDGE et les résultats de simulation énergétique du prototype de maison romaine à patio enterré. Source : *Photo des auteures.*

Les simulations reposent exclusivement sur des paramètres passifs : orientation du bâti, géométrie du patio enterré, inertie thermique des murs en pierre et ventilation naturelle induite par les différences de niveau. Les résultats ne sont pas interprétés comme des indicateurs de performance au regard de normes actuelles, mais comme des révélateurs de dynamiques climatiques internes et de potentiels de confort adaptatif propres à l'architecture romaine.

Les indicateurs fournis par EDGE font ainsi l'objet d'une lecture critique. La consommation énergétique nulle reflète l'état historique du bâtiment, dépourvu de systèmes mécaniques, et confirme que le confort thermique reposait sur la forme architecturale et les propriétés des matériaux. L'empreinte carbone calculée pour les matériaux souligne l'écart entre les standards contemporains intégrés dans le logiciel et les matériaux massifs historiques, mettant en évidence la robustesse et la longévité de ces derniers, ainsi que les limites des outils normatifs actuels pour évaluer l'architecture antique. L'intégration de la dimension humaine s'opère par le croisement des résultats climatiques avec la distribution fonctionnelle des espaces. Les microclimats des zones de réception, des chambres et des cours permettent de formuler des hypothèses sur les usages saisonniers et les pratiques domestiques antiques. La simulation devient ainsi un outil d'interprétation spatiale et anthropologique, et non une fin en soi.



3. Le patio comme machine climatique : dynamiques thermiques et aérauliques

3.1. Inertie et régulation thermique de la profondeur enterrée

Les résultats des simulations confirment le rôle central de la profondeur enterrée dans la régulation thermique de la maison romaine. L'inertie des murs en pierre, combinée au contact direct avec le sol, permet une atténuation significative des amplitudes thermiques journalières et saisonnières. Les espaces situés autour du patio enterré présentent des températures plus stables que les espaces en surface, en particulier durant les périodes estivales. Cette stabilité ne résulte pas d'un contrôle mécanique, mais d'un déphasage thermique naturel, où la masse des murs et du sol absorbe les pics de chaleur diurne et restitue progressivement l'énergie emmagasinée. Le patio enterré agit ainsi comme un tampon climatique, créant un microclimat intérieur favorable au confort.

3.2. Chorégraphies de l'air : ventilation naturelle et géométrie en double niveau

La coupe sur le patio enterré met en évidence le rôle déterminant de la géométrie en double niveau dans l'organisation des flux d'air. Les différences de hauteur entre les espaces enterrés et les niveaux supérieurs génèrent des mouvements convectifs favorables à la ventilation naturelle. L'air plus frais, accumulé dans la profondeur, est progressivement mis en circulation, tandis que l'air chaud est évacué vers les niveaux supérieurs. Cette « chorégraphie de l'air » n'est pas le produit d'un dispositif ponctuel, mais d'une configuration architecturale globale, où patios, circulations et ouvertures fonctionnent en synergie. Les simulations montrent que cette ventilation contribue à renforcer la sensation de fraîcheur, même en l'absence de renouvellement mécanique de l'air.

3.3. Robustesse des simulations : scénarios alternatifs et marges d'incertitude

L'analyse de scénarios alternatifs confirme la robustesse des tendances observées. Si les valeurs absolues varient selon les hypothèses géométriques, les principes de régulation thermique et de ventilation naturelle restent constants. Cette stabilité relative des résultats renforce la plausibilité de l'interprétation bioclimatique du patio enterré, tout en rappelant que les simulations doivent être lues comme des plages de plausibilité et non comme des vérités définitives.

4. Au-delà de la technique : vers une anthropologie du dispositif enterré

4.1. Entre mesures et hypothèses : dialogue critique entre données et archéologie

La confrontation entre simulations numériques et données archéologiques met en évidence une tension constitutive de la recherche sur le bâti ancien : celle entre quantification scientifique et interprétation historique. Les modèles thermo-aérauliques, aussi rigoureux soient-ils, reposent sur des hypothèses géométriques, matérielles et climatiques qui ne peuvent être entièrement vérifiées. Loin de fragiliser la validité des résultats, cette situation impose au contraire un dialogue critique explicite entre mesures simulées et savoirs archéologiques.

Dans le cas de Bulla Regia, les performances observées : atténuation des amplitudes thermiques, stabilisation du microclimat intérieur et organisation efficace des flux d'air, ne doivent pas être lues comme des valeurs absolues, mais comme des plages de plausibilité compatibles avec les données disponibles. Cette approche rejoint les travaux récents en archéologie architecturale numérique, qui soulignent la nécessité de penser la simulation comme un outil heuristique, permettant de tester la cohérence physique d'hypothèses interprétatives, plutôt que comme un instrument de validation définitive (Brughmans, 2020).

Ainsi, le patio enterré apparaît moins comme une forme figée que comme un dispositif adaptatif, dont la performance dépend de multiples paramètres géométriques, climatiques, mais aussi



sociaux, que les modèles numériques permettent d'explorer sans jamais les clôturer. Cette posture épistémologique prolonge celle développée en Section 1.2, en assumant pleinement l'incertitude comme condition normale de la connaissance patrimoniale.

4.2. Modes d'habiter : gestes, usages et confort vécu dans l'espace enterré

L'intégration des résultats techniques dans une lecture anthropologique conduit à interroger les modes d'habiter associés aux patios enterrés. Dans les sociétés antiques, le confort thermique ne correspond pas à une homogénéité spatiale ou à une neutralité climatique, mais à une diversité de situations permettant des ajustements continus entre le corps, l'espace et le climat. Les gradients thermiques et lumineux générés par la profondeur ne constituent pas des défauts, mais des ressources spatiales, organisant la distribution des activités domestiques selon les saisons et les moments de la journée.

Les patios enterrés de Bulla Regia peuvent ainsi être interprétés comme des dispositifs de confort adaptatif, au sens où ils offrent aux habitants une palette de microclimats, favorisant des stratégies d'occupation différenciées. Cette lecture rejoint les approches contemporaines du confort, qui insistent sur le rôle actif des usagers dans la régulation environnementale, bien avant l'avènement des systèmes mécaniques (Nicol & Humphreys, 2002). Elle permet également de dépasser une vision strictement fonctionnaliste de l'architecture romaine, en réhabilitant la dimension sensible et expérientielle de l'espace domestique.

Dans cette perspective, le patio enterré ne se réduit pas à une solution technique face à la chaleur ; il participe d'une culture de l'habiter où le rapport au climat est médié par des gestes, des rythmes et des usages socialement construits. La fraîcheur devient alors une qualité vécue, intégrée aux pratiques quotidiennes et aux représentations du confort, plutôt qu'un objectif abstrait de performance.

4.3. Le design situé comme lecture éthique et contextualisée du patrimoine

Cette relecture anthropologique trouve son prolongement dans une approche de design situé, mobilisée ici comme cadre critique pour interpréter le patrimoine sans l'instrumentaliser. Face aux tentations contemporaines de transposition directe des solutions anciennes vers le présent, le design situé propose une posture plus nuancée : il ne s'agit ni de reproduire les formes du passé, ni de les réduire à des prototypes techniques, mais d'en comprendre les logiques relationnelles dans leur contexte d'émergence.

Appliquée à Bulla Regia, cette approche engage une réflexion éthique sur la manière dont les savoirs anciens sont mobilisés dans les discours contemporains sur la durabilité. Le patio enterré ne constitue pas un modèle universel, mais un cas situé, dont la pertinence dépend étroitement des conditions climatiques, culturelles et sociales qui l'ont vu naître. Le design situé permet ainsi de préserver la singularité du patrimoine tout en en faisant une ressource critique pour la conception contemporaine.

En articulant résultats numériques, interprétation archéologique et lecture anthropologique, cette section montre que la valeur du patio enterré réside autant dans sa performance climatique que dans sa capacité à révéler une écologie de l'habiter fondée sur l'adaptation, la sobriété et la relation au milieu.

5. Vers une méthodologie régénérative pour les architectures semi-arides

5.1. Transférabilité aux architectures antiques et vernaculaires méditerranéennes

La singularité de Bulla Regia ne doit pas masquer l'existence de principes bioclimatiques partagés à l'échelle du bassin méditerranéen. L'enfouissement partiel, l'usage de la masse thermique, la



hiérarchisation des espaces selon des gradients climatiques et la mobilisation de la ventilation naturelle constituent des invariants que l'on retrouve, sous des formes diverses, dans de nombreuses architectures antiques et vernaculaires (Oliver, 2003). La méthodologie développée dans cet article permet de dépasser une approche comparative strictement formelle, en proposant un cadre analytique transférable, centré sur les logiques environnementales plutôt que sur les typologies.

En combinant HBIM paramétrique et simulations environnementales, il devient possible d'appliquer cette démarche à d'autres sites fragmentaires, qu'ils soient romains, islamiques ou vernaculaires, tout en respectant leurs spécificités culturelles et climatiques. La transférabilité ne réside donc pas dans la reproduction des formes, mais dans la capacité à **réactiver des principes** à travers une analyse située, fondée sur les données disponibles et les conditions locales.

5.2. Applicabilité aux sites fragmentaires : gérer l'incertitude comme ressource

L'un des apports majeurs de cette recherche réside dans la reconnaissance explicite de l'incertitude comme une composante structurante de la connaissance patrimoniale. Plutôt que de considérer la fragmentation du bâti comme un obstacle, la méthodologie proposée l'intègre comme une ressource analytique, permettant d'explorer un spectre de scénarios plausibles. Cette approche est particulièrement pertinente pour les sites semi-arides, souvent marqués par une forte dégradation matérielle et une documentation incomplète.

La gestion de l'incertitude à travers des modèles paramétriques et des analyses de sensibilité offre un cadre rigoureux pour comparer des hypothèses, évaluer leur cohérence climatique et expliciter leurs limites. Ce positionnement méthodologique contribue à renouveler les pratiques de l'archéologie architecturale et du patrimoine numérique, en proposant une alternative aux restitutions figées et aux lectures déterministes du passé (Brumana et al., 2018).

5.3. Vers un protocole reproductible pour les patrimoines climatiques

Au-delà du cas de Bulla Regia, cette recherche esquisse les contours d'un protocole reproductible pour l'étude des patrimoines climatiques en milieu semi-aride. Ce protocole repose sur trois piliers :

- une modélisation HBIM critique, capable de formaliser l'incertitude ;
- des simulations environnementales conçues comme des outils comparatifs ;
- une interprétation située, intégrant les dimensions culturelles, sociales et sensibles de l'habiter.

Cette articulation permet de produire une connaissance à la fois scientifique, contextualisée et opérationnelle, susceptible d'informer les débats contemporains sur la conception durable. En ce sens, la méthodologie proposée ne se limite pas à une application patrimoniale : elle constitue un pont épistémologique entre l'étude des architectures anciennes et les enjeux actuels de la transition écologique.

En réactivant les savoirs climatiques du passé sans les essentialiser, cette approche contribue à une conception du projet architectural fondée sur la sobriété, l'adaptation et la relation au milieu. Elle invite à repenser la durabilité non comme une accumulation de technologies, mais comme une intelligence située, issue du dialogue entre héritages constructifs, outils numériques contemporains et exigences environnementales présentes.



Conclusion

Cette recherche propose une relecture intégrée des maisons romaines à patios enterrés de Bulla Regia, articulant HBIM, simulations thermo-aérauliques et design situé. L'étude démontre que la performance climatique de l'architecture antique est indissociable de ses dimensions culturelles, sociales et environnementales, et que le confort passif reposait sur la synergie entre forme, disposition des volumes et matériaux, plutôt que sur des dispositifs mécaniques isolés. Les simulations révèlent que la géométrie en double niveau des patios, l'inertie des murs et l'organisation des circulations favorisent des mouvements convectifs naturels assurant le renouvellement de l'air et la régulation thermique interne, confirmant que les pratiques architecturales romaines étaient déjà adaptées aux contraintes bioclimatiques locales. Au plan méthodologique, cette étude illustre l'intérêt du HBIM comme outil cognitif, capable de représenter les incertitudes archéologiques, de générer des scénarios alternatifs et de relier l'interprétation spatiale aux simulations environnementales. En intégrant les hypothèses et les données attestées dans un modèle unique, la recherche dépasse la simple restitution géométrique et propose une lecture critique et quantitative des performances climatiques et des usages domestiques. En repensant la performance climatique du passé à travers une méthodologie critique et contextualisée, l'étude contribue à une nouvelle écologie de la connaissance patrimoniale, où le numérique devient un instrument d'interprétation plutôt qu'un outil de normalisation. Les héritages ainsi révélés ouvrent des perspectives fécondes pour les recherches futures sur les patrimoines climatiques et pour une conception architecturale contemporaine plus sobre, située et responsable. Cette approche souligne l'importance de combiner analyse technique, interprétation archéologique et dimension humaine, pour comprendre non seulement comment vivaient les habitants, mais aussi comment ces principes peuvent inspirer une architecture durable et adaptée aux contextes locaux aujourd'hui.

Bibliographie

- AÏACHI Samir, 2003, *Les maisons de Bulla Regia : typologie et organisation spatiale*, Éditions de l'Institut National du Patrimoine, Tunis.
- AMOROSO Giuseppe, SPALLUTO Luigi, 2010, *Architectural heritage and HBIM: Digital modelling for conservation*, Maggioli Editore, Florence.
- BRUGHMANS Tom, 2020, *Simulating social complexity: Modelling past societies*, Springer, Cham.
- BRUMANA Raffaella, DORE Caterina, MURPHY Maurice, 2018, « HBIM challenge among the paradigms of complexity, tools and preservation: The Basilica di Collemaggio », *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2, p. 135-144.
- BULLO Silvia, GHEDINI Francesca, 2003, « *A amplissimae atque ornatissimae domus* », dans QUAZAR E. (dir.), *Bulla Regia*, tome 2.2, Éditions Quazar, Rome.
- DORE Caterina, MURPHY Maurice, 2017, « Current state of the art historic building information modelling », *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII-2/W5, p. 185-192.
- FAI Stephen, WOOD Neil, 2012, *Building information modelling and cultural heritage: Research and applications*, Springer, Londres.
- HERMI Aida, 2017, *Modélisation informationnelle des domus de la Tunisie romaine (146 av. J.-C.-439 apr. J.-C.)*, thèse de doctorat, École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme, Tunis.



KOLOKOTRONI Maria, GIRIDHARAN Renganathan, 2011, « Passive design strategies in historical Mediterranean architecture: Performance and simulation », *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 12, p. 3341-3350.

LÓPEZ Francisco Javier, LERONES Pedro, LLAMAS Jorge, GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO Jaime, ZALAMA Eduardo, 2020, « A review of heritage building information modeling (HBIM) », *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, p. 23437-23463.

MURPHY Maurice, McGOVERN Eugene, PAVIA Sara, 2009, « Historic building information modelling (HBIM) », *Structural Survey*, vol. 27, n° 4, p. 311-327.

NICOL Fergus, HUMPHREYS Michael, 2002, « Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings », *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 6, p. 563-572.

OLIVER Paul, 2003, *Dwellings: The vernacular house worldwide*, Phaidon Press, Londres.

PALLASMAA Juhani, 2005, *The eyes of the skin: Architecture and the senses*, John Wiley & Sons, Chichester.

RAPOPORT Amos, 1969, *House form and culture*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

RÜTHER Heinz, HAN Juhani, 2017, *Digital heritage and environmental simulation: Applications of HBIM for historical buildings*, Elsevier, Amsterdam.

SERAFINI Massimo, STOJANOVIC Vladimir, 2015, « Environmental performance of Roman domestic architecture: A computational approach », *Journal of Architectural Conservation*, vol. 21, n° 3, p. 180-200.

SHOVE Elizabeth, 2003, *Comfort, cleanliness and convenience: The social organization of normality*, Berg Publishers, Oxford.

THÉBERT Yves, 1985, *Bulla Regia : habitats et maisons*, CNRS Éditions, Paris.