



Vers une réhabilitation énergétique de l'architecture moderne Immeubles d'habitation du quartier de St Exupéry à Tunis

Rania FARAH JAAFAR^{*}, Amina HARZALLAH^{**}, Leïla AMMAR^{***}

Résumé

Cet essai se propose de présenter les résultats d'une étude de réhabilitation thermique de l'enveloppe du bâti permettant de se conformer à la réglementation thermique tunisienne tout en préservant l'identité architecturale du bâtiment. Ces résultats sont issus de simulations dynamiques à partir de maquettes numériques.

Le corpus considéré dans cette étude correspond aux immeubles d'habitation du quartier de Saint-Exupéry à Tunis. Un quartier édifié au début des années 50 selon un plan d'aménagement proposé par le Commissariat de la Reconstruction au Logement dirigé par Bernard Zehrfuss. Ces immeubles font partie d'une commande au profit de l'Office Tunisien du Logement de l'Aviation (O.T.L.A).

La méthodologie envisagée consiste, après avoir dégagé les spécificités architecturales de cet ensemble bâti et questionné ses habitants, à analyser la performance thermique d'un appartement témoin à partir de mesures *in situ* et de simulations. Les variables analysées sont la température de l'air intérieur, les flux radiatifs et convectifs échangés et l'énergie stockée dans l'enveloppe.

Les résultats obtenus laissent envisager des solutions à caractère non invasif (tel que l'ajout d'isolants thermiques au niveau des parois, l'installation de double vitrage, etc.) permettant d'impacter sur la consommation énergétique du bâtiment dans le respect des spécificités architecturales.

Ce type d'approche peut ainsi mettre l'accent sur la nécessité d'entreprendre des travaux de réhabilitation face à l'état d'abandon des bâtiments emblématiques de l'architecture moderne en Tunisie. Compte tenu de l'indisponibilité d'une réglementation relative à la réhabilitation en matière de lois, de programmes, d'outils et de cadres institutionnels, les opérations de réhabilitation énergétique représentent un défi de taille.

Mots-clés : Patrimoine récent, architecture moderne, adaptabilité, réhabilitation, simulation thermique.

* Architecte doctorante au sein de l'équipe de recherche sur les ambiances à l'école doctorale Sciences et Ingénierie architecturales.

** Architecte, docteure en architecture, maître-assistante à l'école nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis, membre de l'Équipe de Recherche sur les Ambiances.

*** Architecte, historienne et docteure en architecture. Professeure à l'école nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis, membre du Laboratoire (LAAM).



Abstract

This paper is intended to present the results of a thermal rehabilitation study of the building envelope, which makes it possible to comply with Tunisian thermal regulations while preserving the architectural identity of the building. These results are derived from dynamic simulations using numerical models.

The corpus considered in this study corresponds to the residential buildings of the Saint-Exupéry neighborhood of Tunis. A neighborhood built in the early 50s according to a development plan proposed by the Reconstruction and Housing Commission headed by Bernard Zehrfuss. These buildings are part of an order for the benefit of the Tunisian Aviation Housing Office (O.T.L.A).

The methodology envisaged consists, after having identified the architectural characteristics of this built assembly and questioned its inhabitants, in analyzing the thermal performance of a control apartment from in situ measurements and simulations. The variables analyzed are the temperature of the indoor air, the radiative and convective fluxes exchanged and the energy stored in the envelope.

The results obtained suggest non-invasive solutions (such as the addition of thermal insulators at the walls, the installation of double glazing, etc.) which make it possible to have an impact on the energy consumption of the building while respecting the architectural specificities.

This type of approach can emphasize the need to undertake rehabilitation work in the face of the abandoned state of Tunisia's iconic buildings of modern architecture. Given the unavailability of rehabilitation regulations in terms of laws, programs, tools and institutional frameworks, energy rehabilitation operations present a significant challenge.

Keywords: Retrofitting methodology, Modern heritage, Historic buildings, Energy saving.

الملخص

يقترح هذا المقال تقديم نتائج دراسة إعادة التأهيل الحراري لغلاف المبنى ليتوافق مع اللوائح الحرارية التونسية مع الحفاظ على الهوية المعمارية للمبنى. تأتي هذه النتائج من المحاكاة الديناميكية من النماذج الرقمية.

تتوافق المجموعة التي تم تناولها في هذه الدراسة مع المباني السكنية في منطقة Saint-Exupéry في تونس. حي تم بناؤه في أوائل الخمسينيات من القرن الماضي وفقاً لخطة التنمية التي اقترحتها مفوضية التعمير والإسكان التي يديرها برنارد زيرفوس. هذه المباني هي جزء من أمر لصالح مكتب إسكان الطيران التونسي.

تتكون المنهجية المقترحة، بعد تحديد الخصائص المعمارية لهذا المجمع المبني واستجواب سكانه، لتحليل الأداء الحراري لشقة نموذجية من القياسات والمحاكاة في الموقع. المتغيرات التي تم تحليلها هي درجة حرارة الهواء الداخلي، والتدفق الإشعاعي والحمل الحراري المتبادل والطاقة المخزنة في الغلاف.



النتائج التي تم الحصول عليها تشير إلى حلول غير غازية (مثل إضافة العزل الحراري على مستوى الجدران، وتركيب الزجاج المزدوج، وما إلى ذلك) مما يسمح بالتأثير على استهلاك الطاقة للمبنى وفقاً للمواصفات المعمارية. يمكن أن يؤكد هذا النوع من النهج على الحاجة إلى القيام بأعمال إعادة التأهيل في مواجهة حالة التخلي عن المباني الرمزية للعمارة الحديثة في تونس. نظراً لعدم توفر لوائح إعادة التأهيل من حيث القوانين والبرامج والأدوات والأطر المؤسسية، فإن عمليات إعادة تأهيل الطاقة تمثل تحدياً كبيراً.

الكلمات المفاتيح: التراث المعماري الحديث -إعادة تأهيل -محاكاة حرارية.

Pour citer cet article

FARAH JAAFAR Rania, HARZALLAH Amina et AMMAR Leïla, « Vers une réhabilitation énergétique de l'architecture moderne. Immeubles d'habitation du quartier de St Exupéry à Tunis », *Al-Sabil : Revue d'Histoire, d'Archéologie et d'Architecture Maghrébines* [En ligne], n°16, Année 2023.

URL : <https://al-sabil.tn/?p=3253>



Introduction

Ces vingt dernières années, l'architecture du XX^e siècle, et particulièrement celle de sa deuxième moitié, bénéficie d'un regard renouvelé à la faveur de multiples investigations scientifiques, études thématiques et surtout travaux portant sur les procédés de sa protection. Face aux nouveaux enjeux énergétiques, sociaux et opérationnels, ce legs architectural est confronté à divers types d'opérations surtout en matière de réhabilitation et de transformation. Dans ce contexte, plusieurs opérations de réhabilitation ont été menées en Europe depuis les années 80 avec l'objectif commun de valoriser le patrimoine récent et de l'adapter à la vie contemporaine. Les problématiques de réhabilitation supposent d'améliorer le confort de vie des habitants tout en répondant aux nouveaux impératifs de réduction des consommations énergétiques et d'exigences environnementales. Comment intervenir alors de façon pertinente pour adapter un ancien bâtiment aux nouvelles normes de consommation énergétique et au confort de l'utilisateur d'aujourd'hui ?

Nous nous proposons, dans cet article, de présenter les résultats d'une étude de réhabilitation thermique de l'enveloppe du bâti permettant de se conformer à la réglementation thermique tunisienne, tout en préservant l'identité architecturale du bâtiment. Notre objectif de départ étant de trouver des solutions à caractère non invasif permettant de protéger l'authenticité du bâtiment. Cette étude s'inscrit dans le cadre plus large d'une thèse portant sur la réhabilitation durable des immeubles d'habitation de la période de la reconstruction de l'après-guerre en Tunisie.

L'objectif de cet article est d'analyser la performance thermique d'un appartement témoin à partir de visualisation et de simulation thermique. Dans un premier temps, nous positionnerons notre corpus d'étude dans son contexte historique, urbain, architectural et législatif où nous exposerons la réglementation thermique tunisienne et ses lacunes. Ensuite, nous procéderons aux différents diagnostics afin d'aboutir à une interprétation physique du problème soulevé et des résultats obtenus.

Nous proposerons en conclusion, les limites de notre travail ainsi que des recommandations qui pourront être utiles à des futures recherches similaires.

1. Les contextes

1.1. Contexte historique de la Reconstruction

Dès 1943, la Tunisie était amenée à entreprendre des opérations de recasement. Ces opérations ont été conduites par les Services d'Architecture et d'Urbanisme dirigés par Bernard Zehrfuss.

Les Services concernés avaient dressé un programme de recasement destiné à divers centres et diverses communautés par la mise en place des plans d'aménagement des villes telles que Bizerte, Sfax, Tunis, Sousse, etc. Selon Hounaida Dhouib, les architectes aspiraient à construire selon les principes et les techniques modernes, mais suggéraient un esprit méditerranéen avec l'utilisation de systèmes constructifs qui répondaient aux exigences climatiques, économiques et fonctionnelles des populations locales.¹



Fig. 1. Photos de quartiers détruits, Cité de l'Architecture et du Patrimoine.

Source : *Archives d'Architecture du XX^e siècle*, 358 AA, Fonds Bernard Zehrfuss, Boite 69.

1.2. Contexte urbain

Le choix du site d'intervention s'est porté sur les immeubles du quartier de « Saint-Exupéry »² actuellement « cité Mahrajène » qui semble offrir un potentiel d'habitabilité. En effet, il s'agit d'un quartier d'habitation qui a été édifié au début des années 50 selon un plan d'aménagement proposé par le Commissariat de la Reconstruction et au Logement (CRL) suite à une commande de l'Office Tunisien du Logement de l'Aviation (O.T.L.A).

Le quartier compte des immeubles collectifs, semi-collectifs et des habitations individuelles. Il est pensé à la manière d'une cité-jardin³ où les logements sont répartis dans des immeubles dressés en barres détachées les unes des autres pour offrir des vues au centre des îlots. Ces centres sont aménagés suivant les principes du Mouvement Moderne et la Charte d'Athènes de Le Corbusier.

¹ Hounaida Dhouib Morabito, 2010, p. 318.

² Cette nomination de la cité se réfère à « Antoine de Saint-Exupéry », écrivain, poète et aviateur français, qui effectua pour l'aviation tunisienne en 1943, plusieurs missions de reconnaissance aérienne. Sa femme « Consuelo » faisait partie du groupe d'amis-artistes du village d'Oppède où séjourna Bernard Zehrfuss.

³ D'après la définition d'Ebenzer Howard : Une Cité-jardin est une ville conçue en vue d'assurer à la population de saines conditions de vie et de travail; les dimensions doivent être justes suffisantes pour permettre le plein développement de la vie sociale, entourée d'une ceinture rurale, le sol étant dans sa totalité propriété publique ou administré par fidéicommissaire pour le compte de la communauté.



En effet : « *Le paysage bâti se caractérise par des ensembles à échelle humaine et cela est lisible à travers l'aménagement des espaces verts, des aires de jeu pour les enfants ainsi que des équipements de proximité : école, crèche, espaces commerciaux* »⁴.

1.3. Contexte architectural

Le quartier compte quatre barres identiques toutes orientées suivant un axe longitudinal Nord-Est Sud-Ouest. Chaque barre d'immeuble est dressée sur quatre étages et comprend 24 appartements dont la superficie habitable totale est de 640m² loggia comprise (voir figure n°2).

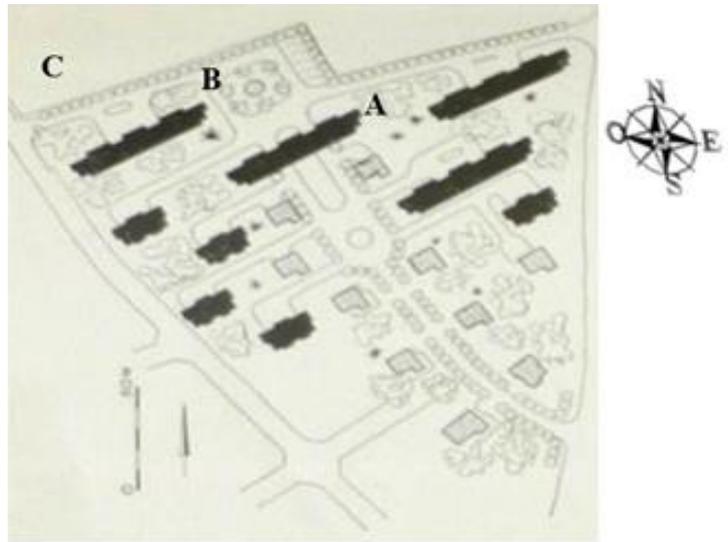


Fig. 2. Localisation des barres sur le plan du lotissement du quartier Saint-Exupéry par le commissariat à la Reconstruction et au logement. *Source : AA, 1955, p. 92.*

La volumétrie des immeubles est assez simple, une forme parallélépipédique avec un volume central en saillie orienté Nord-Ouest et traité par du claustra correspondant à une cage d'escalier et l'espace buanderie (voir figure n°3). La façade arrière bénéficie d'une orientation Sud-Est, avec un dispositif de régulation thermique assez particulier sous forme de lamelles horizontales : des brise-soleil (voir figure n°4).



Fig. 3. Dispositif claustra de la façade Nord-Ouest. *Source : Photo de l'auteur.*



Fig. 4. Dispositif brise-soleil de la façade Sud-Est. *Source : Photo de l'auteur.*

⁴ *L'Architecture d'Aujourd'hui* (60) AA, 1955, p. 89.



1.4. Le contexte législatif

En Tunisie, la maîtrise de l'énergie est considérée comme une des priorités nationales couvrant tous les programmes et les projets qui ont pour objectif d'améliorer le niveau d'efficacité énergétique. Dans ce sens, plusieurs lois existent telle que la loi du 2 août 2004 amendée par la loi du 9 février 2009 permettant d'ouvrir la voie à l'autoproduction de l'électricité par les énergies renouvelables⁵, les arrêtés du 23 juillet 2008 et du 1er juin 2009 fixant respectivement les spécifications techniques minimales visant l'économie d'énergie des projets de construction et d'extension des bâtiments à usage de bureaux ou assimilés et des projets de construction et d'extension des bâtiments à usage résidentiel⁶.

En effet, pour la performance énergétique des bâtiments, la réglementation exige un seuil de classe énergétique minimale fixé à 5 pour les bâtiments du secteur privé et à 3 pour les bâtiments du secteur public.

Le cadre institutionnel tunisien semble bien développé. Ces réglementations sont toutefois obligatoires pour les nouveaux bâtiments à usage résidentiel et les projets d'extension des bâtiments existants du même type. De ce fait, le principal défi consisterait à mettre en place des stratégies de réhabilitation énergétique permettant d'adapter un ancien bâtiment aux nouvelles normes de consommation énergétique et au confort de l'utilisateur d'aujourd'hui, tout en préservant son authenticité.

Dans ce sens, l'agence nationale de maîtrise de l'énergie (ANME), en partenariat avec l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)⁷, a lancé un travail spécifique pour la mise en place d'un label intégrant les performances énergétiques des bâtiments en Tunisie. Ce nouveau label ECO-BAT⁸ a été élaboré en 2013, sauf qu'il n'est toujours pas appliqué à ce jour⁹.

1.5. Le contexte ambiantal

Les questions de l'espace habité, des pratiques de l'espace et surtout du rapport à l'environnement et au monde biophysique ne devraient cependant pas être évincées au profit d'un cadre normatif et législatif du confort. En effet, la question de « l'habiter » est avancée comme étant centrale pour une sociologie, une anthropologie et une philosophie traitant des dimensions spatiales. Pour Heidegger, « *habiter n'est pas une activité, à l'instar d'aller au travail ou d'aller chercher les enfants à l'école, mais un concept qui englobe l'ensemble des activités humaines. C'est un trait fondamental de l'être* »¹⁰. Cette approche confirme que les

⁵ Arrêté du ministre de l'industrie, de l'énergie et des petites et moyennes entreprises du 29 mai 2009, portant ouverture d'un concours interne sur épreuves pour la promotion au grade d'analyste central du corps des analystes et techniciens de l'informatique des administrations publiques.

⁶ Arrêté conjoint du ministre de l'équipement, de l'habitat et de l'aménagement du territoire et du ministre de l'industrie, de l'énergie et des petites et moyennes entreprises du 1^{er} juin 2009.

⁷ L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie est un établissement public français à caractère industriel et commercial créé en 1991. Elle affiche également le nom « d'Agence de la transition écologique »

⁸ Le label ECO-BAT ainsi que son référentiel pour le résidentiel.

⁹ Mohamed Amine Zainine, Mohamed Ali Dakhlaoui, Taoufik Mezni, Amen Allah Guizani, 2016.

¹⁰ Martin Heidegger, 2004, p. 139-156.



êtres humains ne sont pas des êtres isolés, mais plutôt reliés avec d'autres individus ainsi qu'avec des normes et valeurs sociales et insérés dans différents contextes d'action.¹¹ Dans ce sens, Coccia nous invite à repenser la maison comme un espace mouvant d'accueil où l'homme doit « *tisser des relations intenses avec certaines choses et certaines personnes, d'accueillir, dans une forme d'intimité, la portion du monde* »¹².

Thierry Paquot introduit le concept « habiter » en faisant référence au terme « *habitable* » qui vient du latin habitabiles, qui signifie tout simplement « *où l'on peut habiter* », et qui sous-entend que ce qui est « *inhabitable* » ne permet pas « *l'habitation* »¹³. Il pose aussi la question des relations que des habitants entretiennent avec leur territoire ainsi que les différents modes d'appropriation de l'espace. En effet, nos modes de vie ne sont rien d'autre que des dispositions acquises qui engendrent d'une manière directe ou indirecte nos pratiques quotidiennes. Dans le même sens, Catherine Furet¹⁴ travaille depuis plus de vingt ans sur une architecture de l'habitation qui a pour rôle de redonner sens aux zones de contact, lieux de confort, de partage et de lien :

« *Bâtir des lieux à habiter, n'est-ce pas aussi rassembler tous ces espaces privés pour constituer avec eux une « société » où pourront se tisser des liens autres que ceux, contraints ou indifférents de la juxtaposition, ...de l'intérieur du logement lui-même, permettent de fabriquer des espaces singuliers auxquels les habitants puissent s'identifier : ce que j'appellerais des maisonnées qui, au-delà des logiques du collectif ou de l'individuel, offrirait une dimension d'urbanité* », insistant ainsi sur le but de retrouver ce qu'elle appelle « *le lien spatial* »¹⁵.

Les recherches en sciences sociales n'ont commencé à s'intéresser aux liens entre architecture et logement que tardivement et c'est à partir des années 1980 qu'on commençait à développer une vision de la sociologie urbaine traitant essentiellement de la question de l'espace domestique et de l'habitat. Yankel Fijalkow insiste sur la distinction entre habiter et (se) loger et affirme que « *si l'amélioration du confort des logements participe objectivement à la qualité du logement, le gain n'est pas toujours évident en termes de qualité d'habitat, qui prend en compte le rapport subjectif des habitants à leur milieu* »¹⁶. C'est sur cette relation entre l'architecture de l'habitat et les manières d'habiter que nous souhaitons insister. En ce sens, l'habitat désigne les rapports entre le logement et son environnement. Marion Segaud insiste sur le fait que : « *Quand on parle d'habitat urbain, on prend donc en compte non seulement la fonction résidentielle de la ville, mais également les autres fonctions qui permettent à l'homme de subsister et de s'approprier cet espace* »¹⁷. Ainsi, logement et habitat renvoient-ils aux espaces physiques de la vie ordinaire.

¹¹ Yi-Fu Tuan, 1971, pp. 193-201.

¹² Emmanuel Coccia, 2021, p. 206.

¹³ Thierry Paquot, 2007, p. 9.

¹⁴ Catherine Furet est une architecte française contemporaine, spécialisée dans le logement social.

¹⁵ Catherine Furet, 1999-2000, p. 57.

¹⁶ Yankel Fijalkow, 2017, pp. 17-26.

¹⁷ Marion Segaud, Catherine Bonvalet, Jacques Brun, 1998, p. 6-7.



Le contexte normatif traitant du confort thermique réduit la paroi d'une habitation à sa composition physique, en oubliant qu'il s'agit de l'interface entre un dedans et un dehors et qu'elle est constituée le plus souvent par des éléments architectoniques qui assurent une certaine perméabilité physique (visuelle, thermique, sonore, ...). Cependant, Amphoux délimite trois formes de confort à savoir : le confort de commodité, le confort de maîtrise et le confort de réserve¹⁸. Le confort est une notion subjective où le jugement de la qualité thermique d'une ambiance est directement lié à la sensation de neutralité, mais aussi aux conditions physiologiques et psychologiques dans lesquelles se trouve un individu à un instant précis. Afin d'assurer le confort thermique, le cadre normatif a fait recours à l'isolation des parois et cette systématisation génère une ségrégation sociale et la mise en place d'une logique d'isolement. En effet, pour Amphoux, le contrôle d'environnement au sens technique n'est rien sans la maîtrise du milieu au sens pragmatique avec toutes les modalités sensorielles, qu'elles soient visuelles, sonores, tactiles et autres. Ainsi, dans le domaine des ambiances qui interroge aussi bien des dimensions quantitatives et qualitatives, l'habitant joue un rôle déterminant en s'appropriant le milieu de vie mais aussi en le transformant selon le besoin¹⁹.

2. Outils d'évaluation

La démarche de travail que nous envisageons d'utiliser combine à la fois une approche sensible et une autre physique, qui est présentée dans le cadre de cet article. Trois phases préliminaires doivent être accomplies en amont : tout d'abord, il faut choisir un appartement de référence qui présente des critères bien définis. Le choix s'est porté sur un appartement n'ayant pas subi d'interventions architecturales majeures par rapport à son état originel. L'appartement est composé de 3 pièces, une salle de bain, une cuisine et une buanderie. Il occupe le premier étage de la barre A (voir figure n°5). Il bénéficie d'une double orientation, Sud-Est et Nord-Ouest associant deux dispositifs de protection solaire. Du claustra au niveau des buanderies orientées Nord-Ouest (voir figure n°3) et des briseS-soleil en éléments préfabriqués en béton pour la façade Sud-Est (voir figure n°4). Cet appartement est habité depuis plus de soixante ans, par un couple de personnes âgées.

Une fois le choix de l'appartement de référence arrêté, il y a lieu de passer à la collecte des données qui serviront d'outils de validation expérimentale aux résultats de simulations. Nous avons effectué une campagne de mesure thermographique sur une zone donnée, afin de déterminer le comportement thermique de l'appartement et proposer des scénarios d'amélioration. La collecte de toutes les mesures et leur analyse permet de fournir une photographie très précise de la performance thermique d'une zone à un moment donné. Pour notre cas d'étude, l'appartement témoin étant habité, la réalisation d'une campagne de mesure sur une longue période était impossible. C'est pourquoi, nous avons réalisé une campagne de mesure ponctuelle combinée à un questionnaire dans le but d'étudier le confort thermique des occupants.

¹⁸ Pascal Amphoux., 1990, pp. 28-30.

¹⁹ Pascal Amphoux., 1990, p. 27.



En dernière étape de ce protocole, il faut arrêter la liste des paramètres d'entrée, autrement dit le choix des données d'entrée qui peuvent être extraites directement à partir des documents graphiques ou bien moyennant les relevés et les visites sur site. Pour notre cas d'étude, nous retiendrons les paramètres suivants, identiques à l'ensemble des appartements :

- Orientation de l'immeuble.
- Typologie de l'immeuble.
- Situation de l'immeuble (altitude, latitude et longitude).
- Dimensions de l'enveloppe.
- Composition des différents murs.

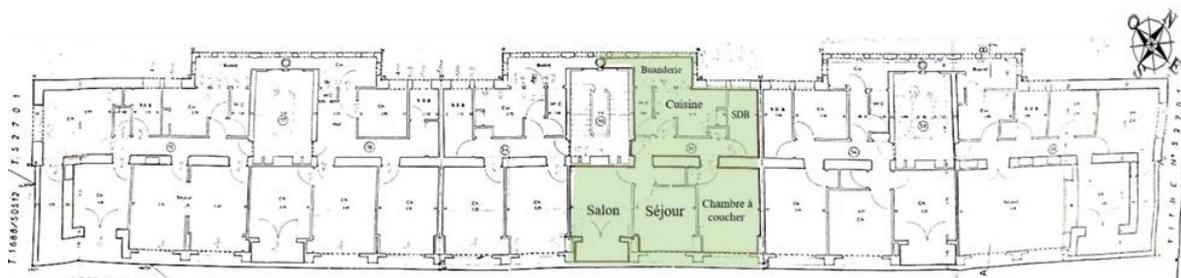


Fig. 5. Localisation de l'appartement témoin par rapport à l'ensemble de la barre A.

Source : Photo de l'auteure.

2.1. Climat et données solaires

Le bâtiment est situé dans une région sud-méditerranéenne. La situation géographique du quartier Saint-Exupéry est de latitude 36° nord et de longitude 10° est. L'immeuble est implanté de façon que chaque logement bénéficie d'une double orientation, avec une exposition Sud-Est et Nord-Ouest, profitant ainsi des rayons solaires tout au long de la journée. D'après le diagramme solaire (voir figure n°6), nous constatons que les pièces de vie, orientées Sud-Est profitent des rayons solaires toute la matinée. Tandis que pour les espaces de service, orientés Nord-Ouest, ce n'est qu'en fin d'après-midi qu'ils bénéficient du rayonnement solaire.

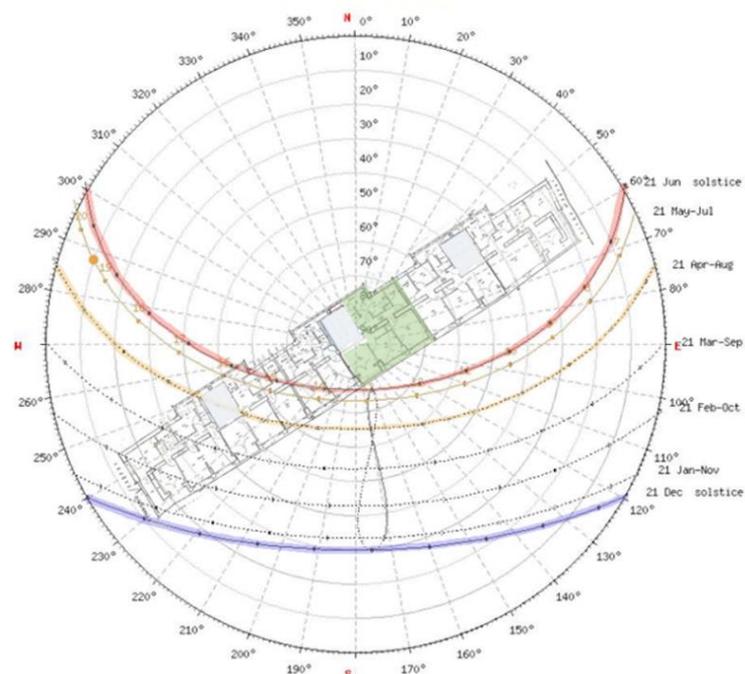


Fig. 6. Le diagramme solaire par rapport à la barre A.

Source : Dessin de l'auteure.



2.2. Matériaux de construction

Le système constructif est fondé sur des murs porteurs en maçonnerie de moellons de 50 cm d'épaisseur avec une double assise de briques pleines tous les 60cm de hauteur. Chaque bâtiment comporte deux joints de dilatation situés au niveau de tous les éléments de l'ossature, des fondations à la terrasse²⁰. Les fenêtres utilisées pour les façades sont des fenêtres à simple vitrage avec un cadre en bois. Le plancher du RDC est identique aux planchers des étages et réserve un vide sanitaire utilisé en partie pour des garages individuels, des caves de service et un logement pour le concierge²¹.

3. Diagnostics

3.1. Diagnostic sensible

Le diagnostic sensible du confort thermique est une approche qui permet de comprendre la relation entre le vécu des occupants et les expériences sensorielles par rapport à leur environnement thermique, afin d'évaluer leur niveau de confort. Alors que les approches physiques du confort thermique se fondent principalement sur des mesures objectives, telles que la température de l'air ou le taux d'humidité, le diagnostic sensible prend en compte les dimensions subjectives et individuelles du confort, en reconnaissant que la perception du confort varie d'une personne à l'autre.

En effet, la perception du confort est multidimensionnelle et dépend de plusieurs facteurs, tels que les sensations thermiques, les émotions, les expériences passées, les attentes culturelles et les préférences individuelles. Ainsi, nous considérons que le confort thermique est une notion dynamique et évolutive au cours du temps et dans différents contextes. Afin d'établir un état des lieux des différentes qualités ambiantales originelles du corpus étudié, nous avons eu recours aux outils de sciences sociales. Les enquêtes qualitatives peuvent être utilisées pour recueillir des données sur les perceptions et les expériences des individus en matière de confort thermique. Ces enquêtes sur terrain ont été menées au moyen de questionnaire et d'observations *in situ*. Dans le cadre de cet article, nous développerons particulièrement les résultats du diagnostic physique et comme perspective future, nous envisagerons un croisement avec ceux du volet sensible.

3.2. Diagnostic physique

3.2.1 Audit énergétique sur plan

L'étape qui précède la réalisation des simulations consiste à effectuer un audit énergétique sur plan, moyennant un logiciel spécialisé. Pour notre cas, nous avons choisi CLIP²². Par définition, l'audit énergétique est un état des lieux détaillé des performances énergétiques de l'immeuble. Cette étude nous permet d'analyser les problèmes énergétiques rencontrés et de

²⁰ AA, 1955, p. 90-92.

²¹ AA, 1955, p. 32.

²² CLIP : Conception et Labellisation d'Immeubles Performants est un outil logiciel créé pour l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie tunisienne ANME. Il est distribué gratuitement aux bureaux d'études et architectes tunisiens.



trouver les solutions pertinentes permettant de les résoudre. Conformément à l'arrêté du 01 juin 2009, fixant les spécifications techniques minimales visant l'économie dans la consommation d'énergie des projets de construction et d'extension des bâtiments à usage résidentiel, l'immeuble étudié est à vocation résidentielle puisque les espaces réservés à l'habitation constituent plus de 80% de sa surface utile.

D'après les résultats obtenus (voir figure n°7) et afin de maintenir la température intérieure du bâtiment à 20 °C en hiver et 26°C en été (dans l'intervalle de confort tel que défini par Fanger²³), les besoins thermiques nécessaires sont de 16 kWh/m² en hiver et 53 kWh/m² en été. L'étude démontre que l'immeuble étudié se place dans la classe énergétique 6 des performances thermiques du bâtiment avec une consommation annuelle de 69 kWh /m². Nous remarquons également que le besoin thermique en été est nettement supérieur au besoin thermique en hiver et constitue plus du double. Certes, cet écart peut être justifié par le climat méditerranéen de la Tunisie mais cela laisse supposer qu'il y a une inadéquation entre les gains solaires et les besoins énergétiques.

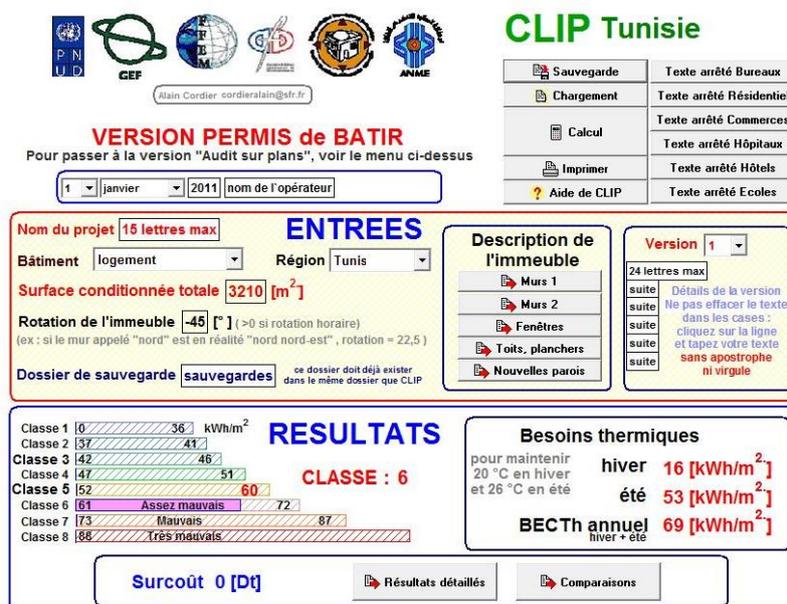


Fig. 7. Présentation des résultats pour l'état actuel sous le logiciel CLIP. Source : Dessin de l'auteure.

3.2.2 Thermographie infrarouge

Un autre outil a été adopté dans cette phase de diagnostic, il s'agit de la caméra thermique²⁴. Elle permet de déterminer les températures de surface et de déceler les éventuels défauts d'isolation à la source de l'inconfort. En effet, une mauvaise isolation peut créer des ponts thermiques importants et des températures de parois non uniformes. Les mesures thermographiques ont été effectuées tout le long de la journée du 21 mars 2022 et cela toutes

²³ Fanger désigne « Fanger's Thermal Comfort Model » correspond à un modèle développé par le chercheur P.O. Fanger dans les années 1970 pour évaluer le confort thermique dans les espaces intérieurs.

²⁴ Caméra thermique FLIR, Système Flir TG 297. Résolution 4 800 pixels, précision : ±2 °C (±3,6 °F) ou 2 %, selon la valeur la plus élevée, à une température nominale de 25 °C (77 °F).



les 4 heures d'intervalle. Le temps était nuageux et la température ambiante était de +12 °C. Toutes les photos ont été prises à une distance comprise entre 5 m et 10 m de la façade du bâtiment. (Voir figures n° 8 et n° 9). La thermographie permet de rendre visibles les rayonnements infrarouges invisibles à l'œil nu en y attribuant une couleur en fonction de l'échelle de température : le rouge correspond aux objets les plus chauds visibles à l'écran, et le bleu aux objets les plus froids. Grâce à cet instrument, il a été possible d'évaluer le rôle de la protection solaire du dispositif du brise-soleil installé le long de la façade orientée Sud-Est et assurant la maîtrise du rayonnement solaire. En effet, d'après la figure n°9, nous remarquons que la température au point (centre de la croix) est de 22.2°C alors qu'à l'extérieur il fait environ 12°C. Afin d'éviter toute confusion, nous précisons que les températures indiquées au niveau des figures 8 et 9 correspondent aux températures de surface interne et non à la température ambiante. En ce qui concerne le dispositif claustra orienté Nord-Ouest, nous remarquons d'après la figure 9 que la température au point (centre de la croix) est de 19.8°C (paroi) et nous notons la présence des points faibles qui correspondent au claustra et sont à 21,8°C. Cet écart s'explique par le fait que la capacité thermique totale du mur est nettement supérieure à celle du vitrage au niveau du claustra.

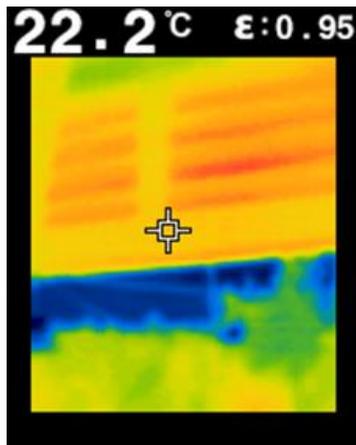


Fig. 8. Les résultats de la thermographie au niveau du brise-soleil. *Source : Photo de l'auteure.*

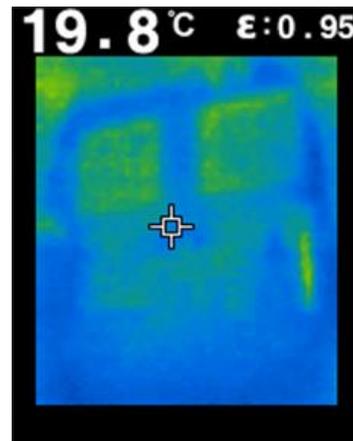


Fig. 9. Les résultats de la thermographie au niveau du dispositif claustra. *Source : Photo de l'auteure.*

4. Simulations dynamiques thermiques STD

Pour les travaux de simulation, nous avons sollicité l'aide d'un expert thermicien qui a contribué à la mise en place du modèle développé. Au niveau de cette approche, nous étudions principalement les paramètres nécessaires à l'évaluation du confort thermique (température ambiante, température de l'air interne, flux radiatifs et convectifs échangés et l'énergie stockée dans l'enveloppe, etc.).

Avant de procéder aux simulations, un protocole expérimental a été défini. En premier lieu, il est nécessaire de déterminer la typologie thermique de l'appartement de référence. La figure n°10 présente les différentes zones qui constituent notre corpus de simulation. En effet,



l'appartement est à structure multizone²⁵ de 77 m² dont les deux façades sont orientées Sud-Est et Nord-Ouest. Le découpage zonal a conduit à définir six zones thermiques : La pièce de vie et les deux chambres (réparties respectivement en ZONE 1 et 2), le couloir (ZONE 3), la salle de bain (ZONE 4), la cuisine et les toilettes (ZONE 5) et la buanderie (ZONE 6). La zone 5 est composée de deux pièces certes fonctionnellement différentes (cuisine et WC) mais il s'avère qu'elles sont thermiquement homogènes pour les besoins de chauffage et pour le confort d'été.



Fig. 10. Les zones thermiques.
Source : Dessin de l'auteur.

Ensuite, pour faire aboutir notre expérimentation, la modélisation dynamique du comportement thermique du bâtiment a été réalisée en combinant un modèle fondé sur la méthode du circuit électrique équivalent et programmé sur les logiciels Microsoft Excel et *Trnsys*²⁶. Le modèle développé repose sur la méthode du circuit électrique équivalent où la résistance thermique est modélisée comme une résistance électrique équivalente et la capacité thermique du bâtiment est simulée par un condensateur électrique. Cette modélisation tient compte des différents paramètres physiques du bâtiment²⁷ : capacité thermique, conductivité thermique, masse volumique, ...

²⁵ Une zone est définie de par son usage (cuisine, chambres, etc...) son orientation et sa situation dans le bâtiment (RDC, étages intermédiaires, dernier étage).

²⁶ « *TRaNsient SYstem Simulation Tool* » est un logiciel de simulation développé par l'université de Wisconsin aux Etats Unies d'Amérique dans le cadre de collaborations internationales avec le Solar Energy Laboratory Transsolar Energietechnik et Thermal Energy Systems Specialists. TRNSYS représente aujourd'hui une référence mondiale dans le domaine de la simulation dynamique des bâtiments et des systèmes.

²⁷ Le flux radiatif : il s'agit du flux incident sur les parois (mur+ vitrage) d'orientation bien spécifiées (Nord-Ouest/ Sud-Est).



5. Interprétation des résultats de la simulation

Afin d'améliorer le confort thermique et pour minimiser les besoins thermiques du logement étudié, une simulation thermique dynamique a été effectuée. Cette simulation nous permettra d'étudier les différents échanges thermiques avec le milieu environnant, l'énergie stockée par la paroi et son influence sur la température interne de chaque zone du logement. Les données météorologiques (irradiation solaire, vitesse de l'air et température ambiante) pour les simulations ont été obtenues à partir de la base de données internationale *METEONORM*²⁸. Les valeurs de l'irradiation solaire ont été traitées par le logiciel *Trnsys* afin d'obtenir les valeurs de l'irradiation incidente relatives à chaque façade de l'appartement. Pour étudier l'effet de la saison sur les besoins thermiques de l'appartement, deux saisons cibles ont été examinées. Les jours choisis dans chaque saison correspondent au solstice d'été et celui d'hiver.

Après avoir étudié l'état initial en termes de flux de chaleur, énergie stockée et température interne deux scénarios d'amélioration ont été étudiés :

- Scénario 0 : Etat initial
- Scénario 1 : Remplacement du simple vitrage par du double vitrage à faible émissivité
- Scénario 2 : Rajout d'une couche d'isolant (laine de roche 06cm) + une paroi en Placoplatre BA13 (épaisseur 02cm) du côté intérieur.

Nous présenterons dans ce qui suit les résultats des simulations réalisées pour chaque façade de l'appartement, en mettant en évidence dans le cadre de cet article, les résultats obtenus pour la zone dans laquelle l'écart est le plus significatif entre les 3 scénarios réalisés. Pour la façade orientée Sud-Est, nous présenterons les résultats de la zone 1 tandis que pour la façade orientée Nord-Ouest, les résultats de la zone 6 seront présentés.

5.1. Simulations au 21 Juin

D'après les courbes indiquées dans la figure n°11, obtenues à partir des simulations réalisées pour le 21 juin, nous remarquons que la zone 1 orientée Sud-Est atteint son pic de température vers 15.00H tandis que la zone 6 orientée Nord-Ouest n'atteint son pic que vers 19.00H et cela pour les trois scénarios.

Nous constatons aussi que pour les trois scénarios, la température interne au niveau de l'appartement reste dans l'intervalle de confort tel que défini par *Fanger*, (selon *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*²⁹, la température de confort se situe entre 20°C et 28°C) et cela pour les deux orientations.

- Le flux convectif : il s'agit du flux échangé par convection entre la face externe des parois (mur +vitrage) et l'air ambiant. - Puissance stockée : il s'agit de la puissance stockée ou libérée au niveau des parois du bâtiment (mur + vitrage)

²⁸ Meteonorm offre un accès unique au Global Energy Balance Archive Data (GEBA). Les données GEBA sont fournies par les services météorologiques nationaux et répondent aux critères de qualité de l'Organisation météorologique mondiale OMM .

²⁹ ASHRAE est une organisation professionnelle internationale axée sur les domaines du chauffage, de la ventilation, de la climatisation et de la réfrigération. ASHRAE publie des normes, des lignes directrices



Pour le cas de l'orientation Sud-Est de l'appartement, l'épaisseur de 50 cm des parois en moellon et le dispositif de régulation thermique utilisé peuvent expliquer ce retard relevé relatif à l'atteinte de pic.

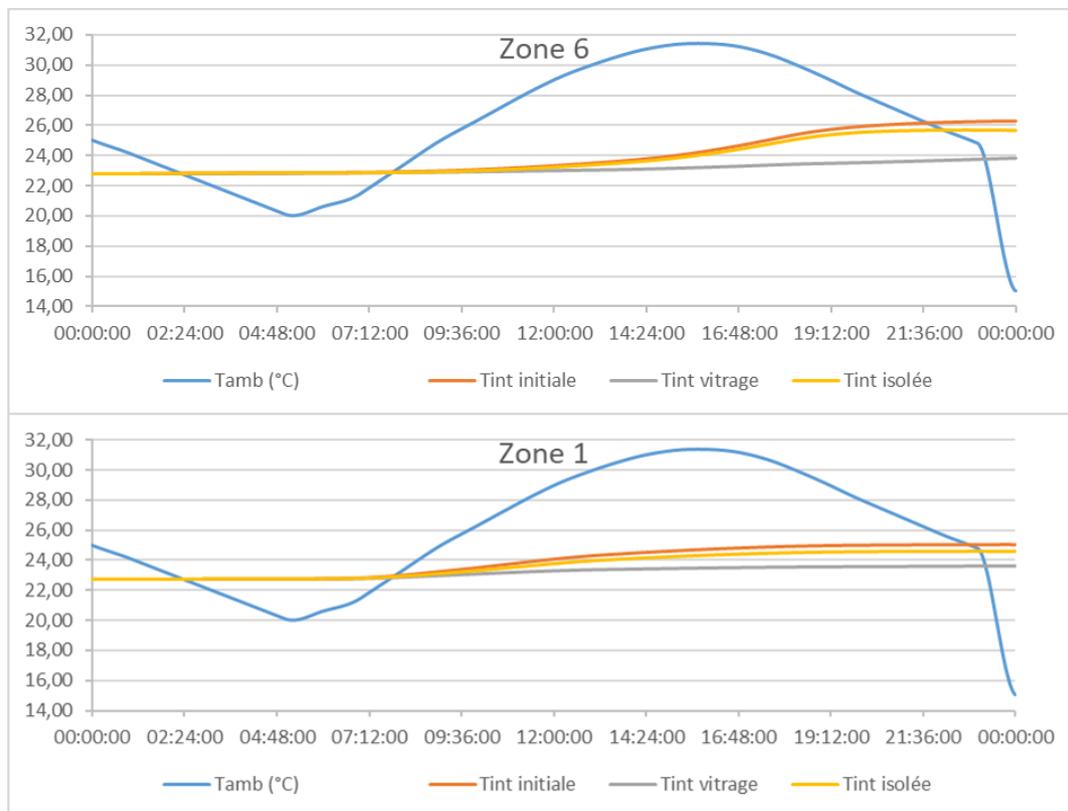


Fig. 11. Températures internes journalières pour les trois scénarios des zones 1 et 6.

Source : Photos de l'auteure.

La **T amb** correspond à la mesure de la température ambiante.

T int initiale correspond à la mesure de la température interne (scénario 0).

T int vitrage correspond à la mesure de la température interne (scénario 1).

T int isolée correspond à la mesure de la température interne (scénario 2).

Pour les variables de flux et d'énergie stockée, nous relevons d'après la figure n°12 que pour les zones étudiées, l'énergie stockée dans la paroi dans le cas du scénario avec double vitrage est nettement supérieure à celle du scénario initial et du scénario relatif à l'ajout de l'isolant.

Cela est dû à la diminution de la température interne en comparaison avec les autres scénarios ainsi que la diminution de la part radiative et convective transmises à la pièce à travers le vitrage.

techniques et des recherches dans ces domaines, et organise des conférences et des formations pour partager les connaissances et favoriser l'avancement de l'industrie.



Les résultats de l'étude réalisée pour le 21 juin font apparaître que les courbes relatives à l'évolution des températures internes, les flux radiatifs et convectifs ainsi que la quantité d'énergie stockée ont la même tendance pour les zones de même orientation. (Voir figure n°12).

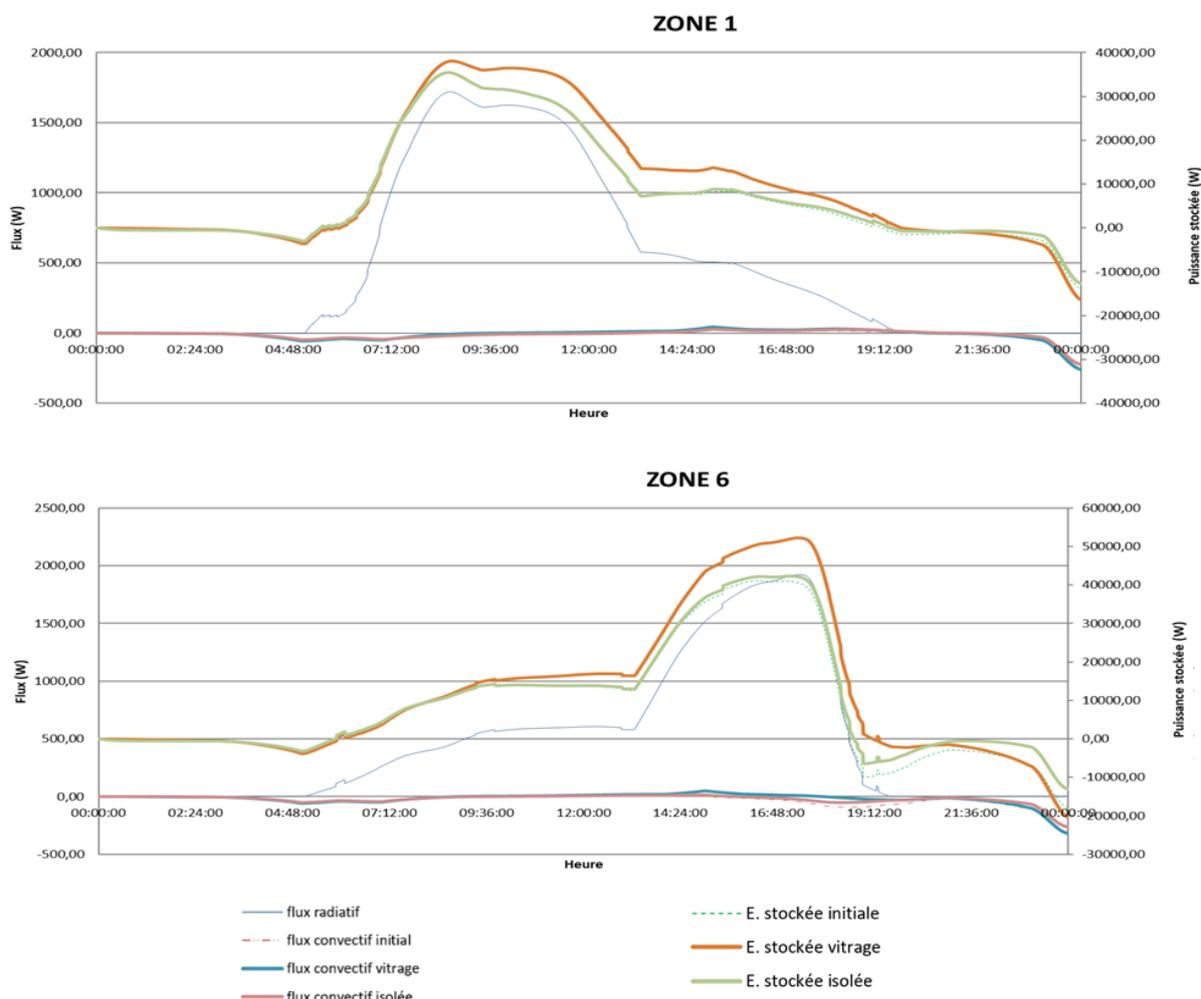


Fig. 12. Flux et énergie stockée dans la paroi pour les trois scénarios (zones 1 et 6).

Source : Photos de l'auteur.

5.2. Simulations au 21 Décembre

Les résultats des simulations réalisées pour la date du 21 décembre sont donnés dans la figure n°13. D'après ces résultats, la zone 1 orientée Sud-Est atteint son pic de température vers 14.00H tandis que la zone 6 orientée Nord-Ouest n'atteint son pic que vers 17.00H. Toutefois les températures de l'air interne sont hors de la zone de confort mais se rapprochent des 20 °C réglementaires dans le scénario du double vitrage et ceci pour les zones orientées Sud-Est. En revanche, pour les autres zones, les températures de l'air interne restent éloignées de l'intervalle de confort même après les modifications apportées aux vitrages et parois. Ce résultat est attendu, étant donné que les zones orientées Sud-Est profitent d'une durée d'ensoleillement plus importante en comparaison avec celles orientées Nord-Ouest.

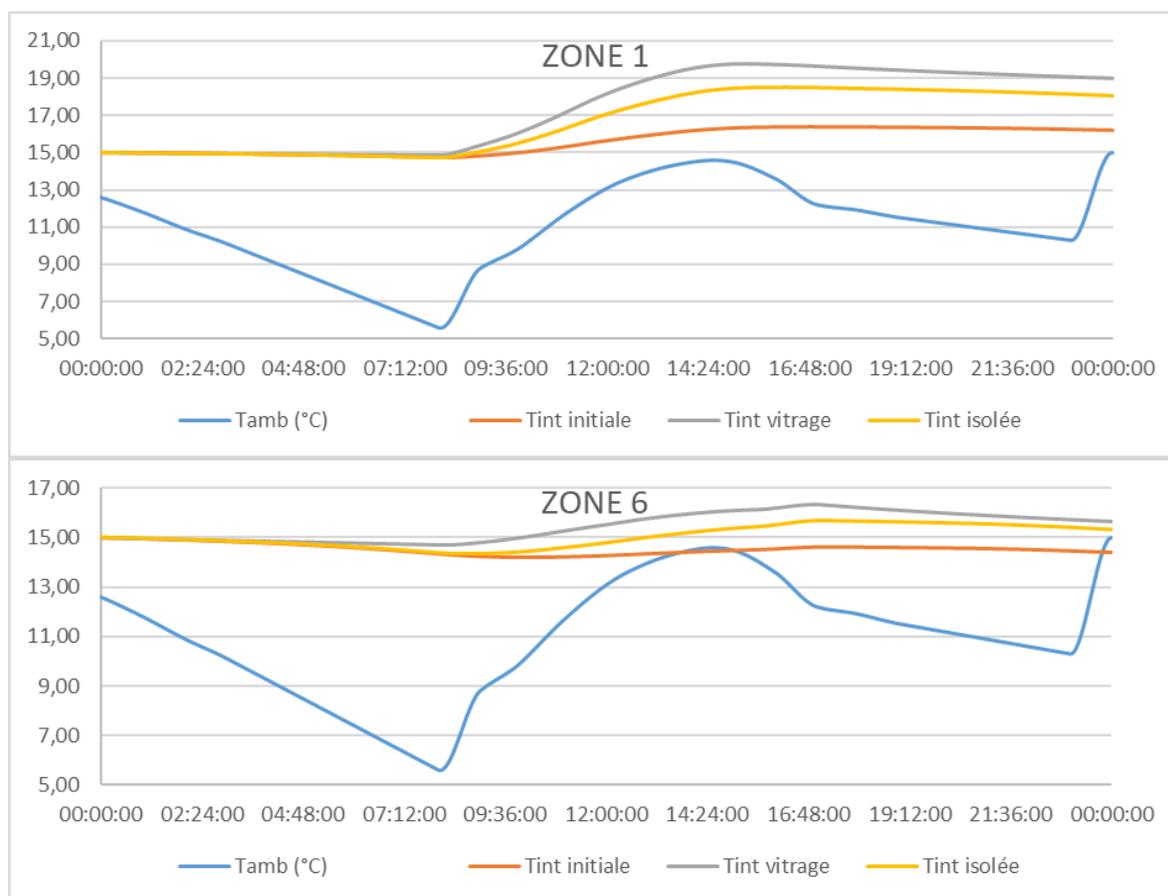


Fig. 13. Les températures internes journalières pour les trois scénarios (zones 1 et 6).
Source : Photos de l'auteure.

Pour les variables de flux et d'énergie stockée, la figure n°14 montre que pour les zones étudiées, l'énergie stockée pour le scénario avec double vitrage est nettement supérieure au scénario initial et au scénario de l'ajout de l'isolant.

Les résultats de l'étude réalisée pour le 21 décembre font apparaitre que la limitation des déperditions thermiques à travers le vitrage par son remplacement par du double vitrage se fait ressentir par l'augmentation de l'énergie stockée pour ce dernier cas en comparaison avec les autres. Cette augmentation de l'énergie stockée permet à son tour de pallier les effets des échanges convectifs entre la face extérieure de la paroi et l'air ambiant.

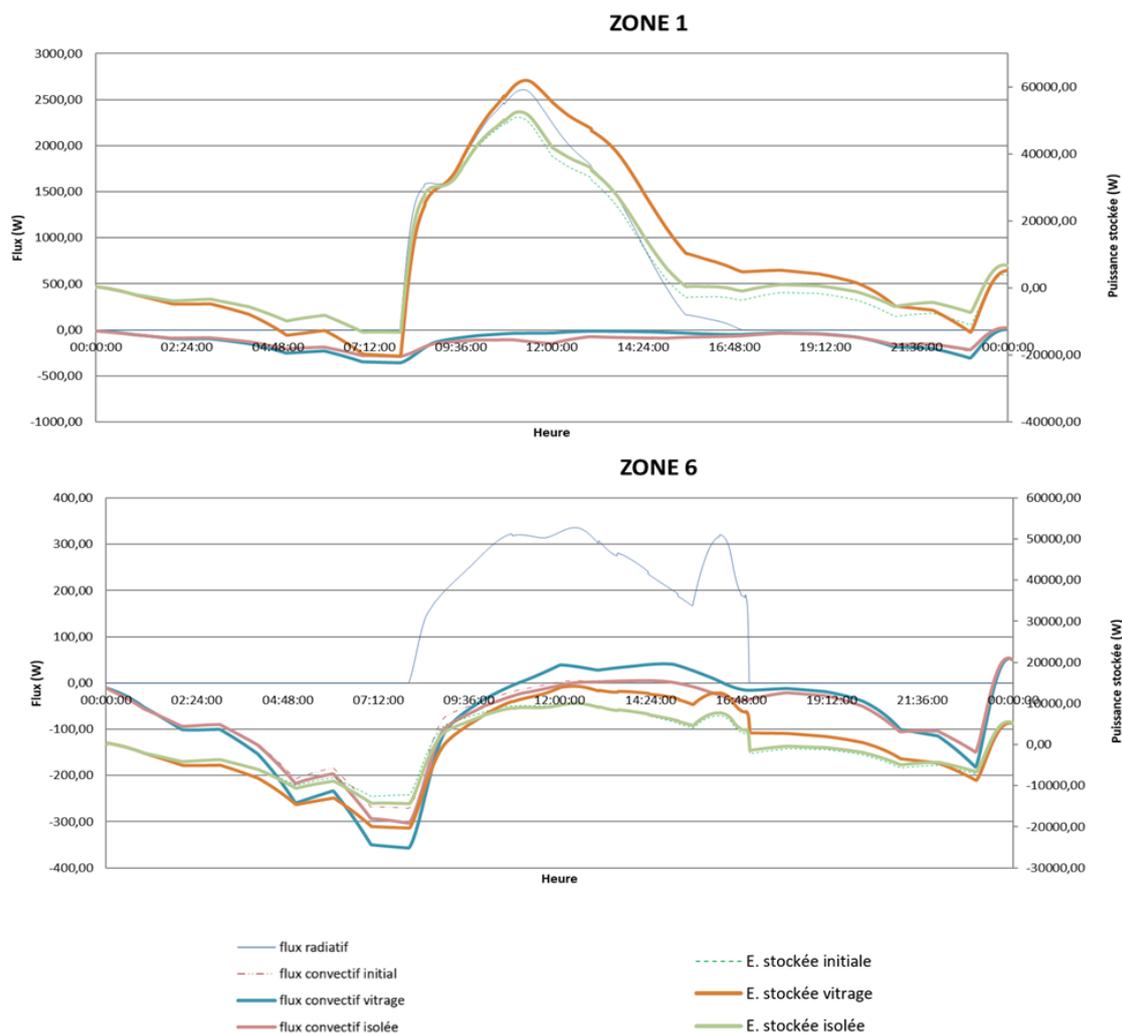


Fig. 14. Flux et énergie stockée dans la paroi pour les trois scénarios.

Source : Photos de l'auteure.

Au terme de cette étude, il ressort que la solution la plus bénéfique pour le bâtiment en matière de confort thermique et de minimisation des besoins thermiques, est le remplacement du simple vitrage par un double vitrage. En effet, cette solution permet de situer la température de l'air interne dans la zone de confort pour le 21 juin et de se rapprocher de cette dernière pour le 21 décembre. De plus, le scénario de remplacement du vitrage s'avère efficace en termes de flux et de quantité d'énergie stockée dans la paroi et ceci est valable pour le 21 juin et le 21 décembre. En conclusion, il faut préciser que le remplacement du vitrage permettrait non seulement d'améliorer les performances thermiques du bâtiment mais aussi de se conformer à la réglementation thermique tunisienne. Pour vérification, nous avons refait un nouvel audit énergétique en modifiant uniquement le type de vitrage. Nous remarquons que le changement de vitrage influe sur les besoins thermiques du bâtiment qui peuvent être à 46 kWh/m² plaçant l'immeuble dans la classe 3 des performances thermiques (voir figure n°15).

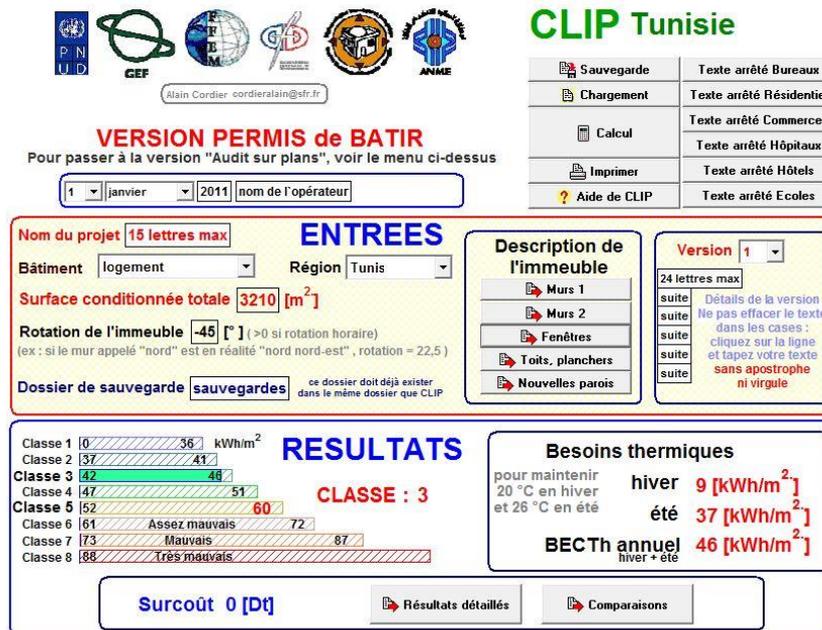


Fig. 15. Présentation des résultats pour l'état actuel sous le logiciel CLIP.

Source : Photo de l'auteure.

Conclusion

L'enjeu de cet article consiste à dégager le potentiel d'une réhabilitation possible grâce aux résultats obtenus à l'aide d'outils quantitatifs physiques. Dans un premier lieu, le corpus étudié a été situé dans son contexte historique, urbain, architectural et ambiantal. Ensuite, sur la base des simulations thermiques effectuées à deux dates différentes et significatives, nous avons pu déduire que la solution de remplacement du simple vitrage par du double permet de se conformer à la réglementation thermique tunisienne tout en atteignant un niveau de confort thermique satisfaisant. Il a été aussi démontré que l'ajout d'un isolant thermique n'aurait pas beaucoup d'effet sur le confort et les besoins thermiques du bâtiment au regard de la grande inertie thermique des murs de l'immeuble (mur en moellon de 50 cm d'épaisseur) ainsi que la présence effective des brises-soleil qui constituent un composant important de régulation thermique. Dans le cadre de cet article, nous développons particulièrement les résultats du diagnostic physique et comme perspective future, nous envisagerons un croisement avec ceux du volet sensible. En effet, le recours aux outils d'évaluation de sciences sociales nous permettra de cerner les différents modes de vie et d'usage et de dresser un diagnostic ambiantal complet.

Faute de temps, le scénario combinant à la fois l'ajout d'isolant et le changement de vitrage n'a pas pu être étudié. Il serait judicieux d'envisager également cette perspective comme continuité de ce travail. Même si aller vers ce genre de solution pourrait peut-être permettre d'encore mieux se conformer à la réglementation thermique tunisienne actuelle, qui reste très normative et figée, il ne faut pas oublier que l'isolation peut affecter l'équilibre hygrothermique de la paroi en modifiant la capacité de séchage de la paroi, d'où le risque d'une condensation interstitielle et l'apparition de moisissure.



Dans ce sens, Ghada Jallali³⁰ insiste sur les limites des démarches environnementales purement normatives mais surtout sur les écarts observés entre les réglementations, les simulations et la réalité des consommations énergétiques, des comportements et des usages : « *Préconisant l'isolation thermique du bâtiment et une étanchéité à l'air, elles se heurtent à un mode d'habiter qui privilégie la porosité entre l'extérieur et l'intérieur par la mise en œuvre d'espaces intermédiaires régulant la porosité entre la sphère publique et la sphère privée* »³¹.

La solution de remplacement du vitrage est qualifiée comme non invasive et permet d'impacter sur la consommation énergétique du bâtiment tout en respectant d'une part les spécificités architecturales de l'immeuble mais aussi d'un autre côté, l'équilibre qui régnait entre l'homme et son habitat. Succinctement, les résultats présentés dans le cadre de cette recherche, permettent d'avancer l'importance de la mise au jour des potentialités ambiantales originelles pour une réhabilitation durable sans intervention lourde mais surtout sans isoler l'habitant de son contexte extérieur.

Bibliographie

AA, 1955, « Tunisie : Habitat urbain de type européen », numéro 60, pp. 90-92.

AA, 1955, « Le développement naturel de la ville de Tunis, zone nord El Menzah », numéro 60, pp. 89.

Arrêté conjoint du ministre de l'équipement, de l'habitat et de l'aménagement du territoire et du ministre de l'industrie, de l'énergie et des petites et moyennes entreprises du 1er juin 2009.

ASHRAE, 2009, Handbook Fundamentals.

AMPHOUX Pascal, 1990, « Vers une théorie des trois confort » . Annuaire 90, Département d'Architecture de l'EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, pp. 27-30.

CHASLIN François, 1992, « Jean Renaudie. 1925-1981 », Encyclopaedia Universalis.

COCCIA. Emmanuel, 2021 « Philosophie de la maison. L'espace domestique et le bonheur » (Filosofia della casa. Lo spazio domestico e la felicità), traduit de l'italien par Léo Texier, Rivages, Paris, pp. 206.

DHOUIB MORABITO Hounaida, 2010, La reconstruction en Tunisie de 1943 à 1947 . Thèse de doctorat, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Paris.

FIJALKOW Yankel, 2017, « Du confort au bonheur d'habiter », Sciences et bonheur, n°2, Paris, pp. 17-26.

³⁰ Architecte diplômée de l'Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis et docteure en architecture et chercheuse au sein de l'Equipe de Recherche sur les Ambiances (ERA) de l'Ecole Doctorale Sciences et Ingénieries Architecturales de l'Université de Carthage.

³¹ Ghada Jallali, 2022, « Filtrage ambiantal pour une architecture durable, penser les démarches environnementales au prisme de la porosité » », Thèse de doctorat, Ecole nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis.



- FIJALKOW Yankel, 2016, *Sociologie du logement*, La Découverte, Que sais-je ? .
- FIJALKOW Yankel, 2019, « Normes de chauffe et transition énergétique : les transactions des habitants », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 27, n° 4, pp. 410-421.
- FURET Catherine, 1999-2000, *Techniques et architecture*, n°446, pp. 57.
- GHARBI Salma, 2017, *Identification et caractérisation des ambiances d'un quartier d'habitat collectif de la période de la Reconstruction tunisienne de l'après-guerre. Cas du quartier d'El Menzeh 1* , Thèse de doctorat, Ecole nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis.
- HAUMONT Bernard, 2005, MOREL Alain, *La société des voisins, Partager un habitat collectif* , Édition de la Maison des Sciences de l'Homme.
- HEIDEGGER Martin, 2013, *Bauen, Wohnen, Denken, Vorträge und Aufsätze*, Stuttgart.
- JALLALI Ghada, 2022, *Filtrage ambiantal pour une architecture durable, penser les démarches environnementales au prisme de la porosité*, Thèse de doctorat, Ecole nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis, 2022.
- LEFEBVRE Henry, 2003, « L'habitat pavillonnaire Preface D'Henri Lefebvre », collection *Habitat et sociétés*, Edition l'Harmattan, p. 188.
- PAQUOT Thierry, 2007, « Introduction. 'Habitat', 'habitation', 'habiter', précisions sur trois termes parents », dans Paquot, Lussault, Younès, in *Villes, territoires et philosophie*, La Découverte, pp. 7-16.
- PINSON Daniel, 2016, « L'habitat, relevé et révélé par le dessin: observer l'espace construit et son appropriation », *Espaces et sociétés*, Erès, Paris, pp. 40-67.
- RAYMOND Henri, 2001, *Paroles d'habitants: une méthode d'analyse* , Editions l' Harmattan, Paris.
- SEGAUD Marion, BONVALET Catherine, BRUN Jacques, 1998, *Logement et habitat. L'état des savoirs* , La Découverte, Paris.
- SUBREMON Hélène, 2010, « Le climat du chez-soi », in *Ethnologie française*, pp. 707-714.
- TUAN Yi-Fu, 1971, « Geography, Phenomenology and the Study of Human Nature », *Canadian Geographer*, vol. 14, n°2, pp. 193-201.
- ZAININE Mohamed Amine, DAKHLAOUI. Mohamed Ali, MEZNI. Taoufik, GUIZANI, Amen Allah, 2016, « Energetic and economic impact of using bioclimatic design technics and of solar water preheating system integration on tertiary building », in *Journal international de recherche sur les énergies renouvelables*, pp. 109-129.