



Étude et optimisation de la façade pour améliorer le confort hygrothermique dans les salles de lecture

Présenté par : BELAIDI Kenza

Sous la direction de : Dr KHADRAOUI Mohamed Amine

Dr BENALLAOUA Siham	MAA	Président de jury
Dr KHADRAOUI Mohamed Amine	MCA	Rapporteur
Dr BOUCHEFIRAT Nour El Houda	MAA	Examineur
Mme LABRECHE Samia	MAA	Invité

Date de soutenance : 15/06/ 2025

Année Universitaire : 2024 - 2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : BELAIDI
Prénom : Kenza
Matricule : 202033000759
Spécialité et/ou Option : Architecture
Département : Architecture
Faculté : Technologie
Année universitaire : 2024/2025

Et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Étude et optimisation de la façade pour améliorer le confort hygrothermique dans les salles de lecture

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
29/03/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes règlementaires)

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, avant tout,

À mes très chers parents, leur soutien sans faille tout au long de ces années. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance et de mon profond respect.

À ma grand-mère bien-aimée, dont la tendresse, la bienveillance ont marqué mon cœur et m'ont guidée dans les moments les plus durs.

À mon frère et mes deux sœurs, pour leur présence rassurante, leurs encouragements sincères et leur affection constante.

À ma meilleure amie, véritable sœur d'âme, pour son écoute et sa présence lumineuse à chaque étape de ce parcours.

À mes enseignants et encadrants, pour leur accompagnement éclairé, leur expertise précieuse et leur disponibilité, qui ont été déterminants dans la réalisation de ce mémoire.

À tous les membres de la Maison de la Culture de Bejaïa, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité, et leur contribution précieuse à cette recherche.

Enfin, À tous ceux qui ont su, à leur manière, nourrir mon courage, ma persévérance et ma foi en ce travail.

Remerciements

« Louange à Allah, Seigneur de l'univers »

*Je m'adresse à **DIEU, Le Tout-Puissant**, pour Le remercier de m'avoir accordé la force, la patience, la persévérance et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Mr KHADRAOUI MOHAMED. A**, mon encadrant, pour le temps, l'attention et l'engagement qu'il a consacrés à mon travail. Ses conseils avisés, et la confiance qu'il m'a accordée ont été d'un immense soutien tout au long de ce parcours.*

*Je remercie également Madame **ATTAR Selma**, ma professeure d'atelier et tous les membres du corps académique, pour leur accompagnement bienveillant, leurs remarques constructives dont j'ai bénéficié tout au long de l'année.*

*Ma gratitude la plus sincère va à **ma grand-mère, à ma mère, à mon père, à mon frère et à mes deux sœurs**, pour leur patience et leur présence constante. Leur soutien moral et affectif a été la base solide sur laquelle j'ai pu m'appuyer.*

*Je remercie ma meilleure amie, **Meriem Zerrarga**, avec qui j'ai partagé chaque étape de ce parcours académique. Nous avons grandi ensemble à travers cette expérience, et je suis honorée de soutenir à ses côtés.*

*Enfin, mes chaleureux remerciements à **mes collègues et amis, Melissa Hamitouche et Ghilas Bouache**, pour leur précieuse camaraderie, leur soutien et tous ces moments vécus ensemble.*

À tous, je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Résumé

En Algérie, de nombreuses salles de lecture souffrent d'un inconfort hygrothermique manifeste, particulièrement dans les régions à climat méditerranéen comme la ville de Béjaïa. Cette situation résulte principalement d'un manque d'adaptation architecturale aux conditions climatiques locales, notamment au niveau des façades, qui jouent un rôle central dans les échanges thermiques et hydriques. Ces dysfonctionnements affectent directement le bien-être, la concentration et les performances cognitives des usagers.

Face à ce constat, cette recherche vise à étudier et à optimiser les performances hygrothermiques des façades des salles de lecture à Béjaïa, à travers l'analyse de leurs composants opaques et vitrés. L'objectif est de proposer des solutions architecturales durables permettant d'améliorer le confort des usagers tout en réduisant la dépendance aux systèmes mécaniques de chauffage et de climatisation.

La méthodologie adoptée repose sur une triple approche : bibliographique, empirique et numérique. Une enquête de terrain (questionnaires, entretiens et mesures in situ) a été menée dans les salles de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa pour évaluer le ressenti des usagers et les conditions réelles de température et d'humidité. Parallèlement, une simulation numérique via le logiciel ArchiWizard a permis de tester diverses configurations de façades, matériaux isolants et types de vitrages afin d'évaluer les performances hygrothermiques.

Les résultats confirment l'impact significatif des matériaux de façade et des ouvertures sur le confort intérieur. L'utilisation d'isolants performants et de vitrages adaptés améliore sensiblement les conditions thermiques et hydriques. Cette étude aboutit à une série de recommandations concrètes pour la conception de façades adaptées au climat méditerranéen, contribuant ainsi à un environnement de lecture plus sain, confortable et écoénergétique.

Mots clés

Confort hygrothermique, façade architecturale, salle de lecture, climat méditerranéen, isolation thermique, vitrage performant, simulation numérique, efficacité énergétique.

ملخص

في الجزائر، تعاني العديد من قاعات المطالعة من انعدام الراحة الحرارية والرطوبة، خاصة في المناطق ذات المناخ المتوسطي مثل مدينة بجاية. وترجع هذه الوضعية أساسًا إلى غياب التكيف المعماري مع الخصائص المناخية المحلية، خصوصًا على مستوى الواجهات التي تلعب دورًا محوريًا في التبادلات الحرارية والرطوبة. وتؤثر هذه الاختلالات بشكل مباشر على رفاة المستخدمين وتركيزهم وأدائهم المعرفي.

أمام هذا الواقع، تهدف هذه الدراسة إلى دراسة وتحسين أداء الواجهات من الناحية الحرارية والرطوبة في قاعات المطالعة ببجاية، وذلك من خلال تحليل مكوناتها المعتمدة والشفافة. الهدف الأساسي هو اقتراح حلول معمارية مستدامة تحسّن من راحة المستخدمين وتقلّل من الاعتماد على أنظمة التدفئة والتبريد الميكانيكية.

ترتكز المنهجية المعتمدة على مقارنة ثلاثية: بحث نظري، تحقيق ميداني، ومحاكاة رقمية. تم إجراء دراسة ميدانية (استبيانات، مقابلات، وقياسات مباشرة) داخل قاعات المطالعة بدار الثقافة ببجاية من أجل تقييم شعور المستخدمين والظروف الفعلية للحرارة والرطوبة. بالتوازي، أُجريت محاكاة رقمية باستخدام برنامج ArchiWizard لاختبار أداء تشكيلات مختلفة من الواجهات، والمواد العازلة، وأنواع الزجاج.

أكدت النتائج التأثير الكبير لمواد الواجهات ونوع الفتحات على الراحة الداخلية. فقد أثبت استخدام العزل الحراري الفعال والزجاج المناسب أنه يُحسن بشكل ملموس من الظروف الحرارية والرطوبة. وتُختتم الدراسة بجملة من التوصيات العملية لتصميم واجهات تتماشى مع المناخ المتوسطي، وتُساهم في خلق بيئة مطالعة أكثر راحة وصحة وكفاءة طاقوية.

الكلمات المفتاحية

الراحة الهيجروحرارية، الواجهة المعمارية، قاعة المطالعة، المناخ المتوسطي، العزل الحراري، الزجاج الفعال، المحاكاة الرقمية، النجاعة الطاقوية.

Abstract

In Algeria, many reading rooms suffer from evident hygrothermal discomfort, especially in Mediterranean-climate regions such as the city of Béjaïa. This issue mainly stems from poor architectural adaptation to local climatic conditions, particularly in terms of façades, which play a central role in thermal and moisture exchanges. These shortcomings directly affect users' well-being, concentration, and cognitive performance.

To address this, the present study aims to assess and optimize the hygrothermal performance of reading room façades in Béjaïa by analyzing their opaque and glazed components. The goal is to propose sustainable architectural solutions that enhance user comfort while reducing reliance on mechanical heating and cooling systems.

The adopted methodology is based on a threefold approach: literature review, empirical investigation, and numerical simulation. Fieldwork (questionnaires, interviews, and in situ measurements) was conducted in the reading rooms of the Maison de la Culture in Béjaïa to evaluate user perceptions and real conditions of temperature and humidity. Simultaneously, digital simulations using the ArchiWizard software allowed testing of different façade configurations, insulation materials, and glazing types to evaluate their hygrothermal performance.

The results confirm the significant impact of façade materials and openings on indoor comfort. The use of high-performance insulation and suitable glazing substantially improves thermal and moisture conditions. This study concludes with concrete recommendations for the design of façades adapted to the Mediterranean climate, contributing to healthier, more comfortable, and energy-efficient reading environments.

Keywords

Hygrothermal comfort, architectural façade, reading room, Mediterranean climate, thermal insulation, high-performance glazing, digital simulation, energy efficiency.

Table des matières

Résumé.....	I
المخلص.....	II
Abstract.....	III
Tables des matières.....	IV
Liste des Figures.....	VIII
Liste des tableaux	X
Nomenclature.....	XI

Chapitre introductif

1. Introduction.....	1
2. Problématique.....	5
3. Les hypothèses.....	6
4. Contexte et objectif de recherche.....	7
5. L'analyse conceptuelle.....	8
6. Méthodologie.....	9
7. Structure du mémoire.....	9

Première Partie : Partie Théorique

Chapitre I : Impact de la façade sur le fonctionnement de l'hygrothermie et l'efficacité énergétique

I.1. La façade : définition, fonctionnement et composition.....	11
I.1.1. Définition et rôle des façades dans l'enveloppe du bâtiment.....	13
I.1.2. Fonctions principales d'une façade.....	14
I.1.3. Les critères de sélection d'une façade.....	15
I.1.4. Typologies de façades et leur classification.....	16
I.1.4.1. Façade selon la forme.....	17
I.1.4.2. Façade selon les matériaux de construction.....	17
I.1.4.3. Façade selon le principe de fonctionnement.....	18
I.1.4.4. Façade selon le type de l'enveloppe.....	19
I.1.5. Interaction entre la façade et son environnement.....	20
I.1.6. Impact de l'orientation sur le comportement hygrothermique.....	21
I.1.7. Surfaces vitrées et surfaces opaques.....	21
I.1.7.1. Définition et classification des surfaces vitrées et opaques.....	21
I.1.7.2. Rôle des surfaces vitrées dans l'apport hygrothermique.....	22
I.1.7.3. Influence du type de vitrage.....	23

I.1.7.4. Influence des surfaces opaques.....	24
I.1.7.5. Propriétés thermiques des matériaux.....	25
I.1.7.6. Propriétés thermiques des matériaux courants.....	25
I.1.7.7. Les isolants thermiques.....	26
I.1.7.8. Propriétés thermiques des isolants.....	28
I.1.7.9. Techniques d'isolation thermique.....	28
I.2. L'hygrothermie du bâtiment et son interaction avec les façades.....	28
I.2.1. Définition et principes fondamentaux de l'hygrothermie.....	28
I.2.2. Facteurs influençant l'hygrothermie d'un bâtiment.....	29
I.2.3. Importance de la maîtrise de l'hygrothermie.....	29
I.2.4. Mécanismes de transfert de chaleur.....	30
I.2.4.1. Conductivité et résistance thermique des matériaux.....	30
I.2.4.2. Convection et rayonnement au niveau des façades.....	31
I.2.4.3. Transferts de vapeur d'eau.....	32
I.2.5. Phénomènes d'humidité.....	33
I.2.5.1. Types d'humidité dans un bâtiment.....	33
I.2.5.2. Conséquences des pathologies liées à l'humidité.....	33
I.3. L'efficacité énergétique.....	34
I.3.1. La notion d'énergie.....	34
I.3.2. La consommation énergétique du bâtiment.....	34
I.3.3. La consommation énergétique à l'échelle mondiale et nationale.....	35
I.3.3.1. Tendances mondiales.....	35
I.3.3.2. Consommation du secteur du bâtiment en Algérie.....	35
I.3.3.3. Contraintes énergétiques spécifiques au climat algérien.....	36
I.3.4. L'efficacité énergétique des bâtiments.....	36
I.3.4.1. Définition et importance de l'efficacité énergétique.....	36
I.3.4.2. Stratégies pour améliorer l'efficacité énergétique.....	37
Conclusion du chapitre.....	38

Chapitre II : Le confort hygrothermique et son impact sur l'être humain dans les salles de lecture

II.1. Le confort hygrothermique : définitions et principes.....	40
II.1.1. Définition du confort hygrothermique.....	40
II.1.2. Paramètres environnementaux influençant le confort.....	41
II.1.2.1. Température de l'air et des parois.....	41
II.1.2.2. Humidité relative (HR).....	42
II.1.2.3. Vitesse de l'air.....	43

II.1.3. Paramètres liés à l'individu.....	44
II.1.3.1. Métabolisme.....	44
II.1.3.2. Habillement.....	45
II.1.4. Équilibre thermique de l'occupant avec son environnement.....	46
II.1.5. Les échanges thermiques du corps humain.....	46
II.2. Impact du confort hygrothermique sur le bien-être et la cognition.....	47
II.2.1. Effets psychologiques et sensoriels.....	47
II.2.2. Études et modèles d'adaptation comportementale.....	48
II.2.3. Les approches du confort.....	48
II.2.3.1. Approche analytique (statique).....	49
II.2.3.2. Approche adaptative.....	50
II.3. Les salles de lecture et le confort hygrothermique.....	51
II.3.1. Définition et caractéristiques des salles de lecture.....	51
II.3.2. Évolution du concept de salle de lecture.....	52
II.3.3. Naissance d'un espace bâti destiné à la lecture.....	53
II.3.4. Morphologie et qualité architecturale.....	54
II.3.5. Évolution spatiale des bâtiments en Algérie.....	55
II.3.6. Programmation architecturale contemporaine.....	56
II.3.7. Le confort hygrothermique dans les salles de lecture.....	56
II.3.7.1. Température ambiante stable.....	56
II.3.7.2. Humidité relative maîtrisée.....	57
II.3.7.3. Impacts du confort hygrothermique.....	57
Conclusion du chapitre.....	58

DEUXIÈME PARTIE : PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE III : Étude empirique et Évaluation expérimentale des salles de lecture à Béjaïa

III.1. Présentation de la ville de Béjaïa.....	61
III.1.1. Localisation et contexte géographique.....	62
III.1.2. Contexte climatique et paramètres environnementaux.....	65
III.2. Présentation du cas d'étude.....	67
III.2.1. Description de la salle de lecture.....	67
III.2.2. Constitution hygrothermique de l'enveloppe.....	68
III.3. Étude empirique.....	70
III.3.1. Étude quantitative à travers prise de mesure in situ.....	70
III.3.1.1. Protocole de prise de mesures.....	71
III.3.1.2. Instruments de mesure utilisés.....	72
III.3.1.3. Méthodologie d'analyse des données.....	73
III.3.2. Analyse et interprétation des résultats quantitatifs.....	74
III.4. Étude qualitative (questionnaire utilisateurs)	76
III.4.1. Ressenti thermique et stratégies d'adaptation.....	76
III.4.2. Ressenti hygrométrique et ventilation naturelle.....	77
III.4.3. Systèmes techniques : chauffage et climatisation.....	78
III.4.4. Suggestions et évaluation globale des usagers.....	78
Conclusion du Chapitre.....	79

CHAPITRE V : Simulation et Optimisation numérique du confort hygrothermique dans les salles de lecture à Béjaïa

Introduction.....	81
IV.1. Simulation dynamique hygrothermique.....	82
IV.1.1. Définition de la simulation hygrothermique.....	82
IV.1.2. Historique de la simulation hygrothermique.....	83
IV.1.3. Présentation du logiciel de modélisation ArchiCAD.....	83
IV.1.4. Présentation du logiciel de simulation ArchiWIZARD.....	83
IV.1.4.1. EnergyPlus dans ArchiWIZARD.....	83
IV.1.5. Protocole de simulation.....	84
IV.1.6. Moment de référence pour la simulation.....	85
IV.1.7. Démarche de simulation dynamique avec ArchiWIZARD.....	85
IV.2. Présentation des scénarios de simulation et analyse comparative des résultats.....	86
IV.2.1. Températures extérieures simulées sur l'année.....	86
IV.2.2. Température extérieure simulée le 27 avril 2025.....	87
IV.2.3. Scénario 1 : Mur standard + simple vitrage.....	89
IV.2.4. Scénario 2 : Mur isolé + simple vitrage.....	91
IV.2.5. Scénario 3 : Mur isolé + double vitrage performant.....	93
IV.3. Comparaison synthétique des scénarios.....	95
Conclusion du Chapitre IV.....	96

V.5. Conclusion

Conclusion générale.....	97
Recommandations.....	98
Limites de la recherche.....	98
Perspectives de recherche.....	98
Bibliographie.....	99
Annexes.....	100

Listes des figures

Figure 1.1 : Définition de la façade selon différents acteurs.....	14
Figure 1.2 : Les fonctions de la façade.....	15
Figure 1.3 : Les critères du choix d'une façade.....	17
Figure 1.4 : Typologies de façades selon leur forme.....	17
Figure 1.5 : Façades selon les matériaux de construction.....	18
Figure 1.6 : Façades selon leur principe de fonctionnement.....	18
Figure 1.7 : Façades selon le type de l'enveloppe.....	19
Figure 1.8 : Influence du climat sur les performances d'une façade.....	20
Figure 1.9 : Impact de l'orientation d'une façade.....	21
Figure 1.10 : Surfaces vitrées et surfaces opaques.....	21
Figure 1.11 : Rôle de la surface vitrée dans l'apport de lumière.....	22
Figure 1.12 : Performances thermiques des surfaces vitrées.....	22
Figure 2.1 : L'influence de la température sur le confort.....	42
Figure 2.2 : Taux d'humidité relative idéal selon température.....	43
Figure 2.3 : Zone de confort hygrothermique.....	43
Figure 2.4 : Coupe transversale – Bibl. Sainte-Geneviève.....	53
Figure 2.5 : Plan RDC – Bibl. Sainte-Geneviève.....	54
Figure 2.6 : Salle de lecture – Bibliothèque Alexandrie.....	54
Figure 2.7 : Salle de lecture – Bibliothèque nationale de Chine.....	54
Figure 3.1 : Salle de lecture étudiée à Béjaïa.....	70
Figure 3.2 : Thermo-hygromètre utilisé.....	72
Figure 3.3 : Point de mesure dans la salle.....	73
Figure 3.4 : Évolution des températures int/ext.....	74
Figure 3.5 : Évolution de l'humidité relative.....	75
Figure 3.6 : Répartition des réponses des usagers.....	78
Figure 3.7 : Schéma radar des niveaux de confort.....	79
Figure 4.1 : Résultat simulation – température ext. annuelle.....	86
Figure 4.2 : Température extérieure simulée le 27 avril.....	87
Figure 4.3 : Humidité relative simulée sur l'année.....	87
Figure 4.4 : Humidité relative simulée le 27 avril.....	88

Figure 4.5 : Composition d'un mur standard.....	89
Figure 4.6 : Composition d'un simple vitrage.....	89
Figure 4.7 : Résultat simulation journalière (scénario 1)	90
Figure 4.8 : Composition d'un mur isolé avec laine de verre.....	91
Figure 4.9 : Résultat simulation scénario 2.....	92
Figure 4.10 : Composition d'un double vitrage performant.....	93
Figure 4.11 : Résultat simulation scénario 3.....	95

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Propriétés thermiques des matériaux courants.....	25
Tableau 1.2 : Propriétés thermiques de différents isolants.....	26
Tableau 2.1 : Paramètres environnementaux influençant le confort.....	41
Tableau 2.2 : Valeurs limites recommandées pour la température et l'humidité.....	43
Tableau 2.3 : Comparaison des approches de confort (statique vs adaptative)	49
Tableau 3.1 : Conditions climatiques moyennes à Béjaïa.....	65
Tableau 3.2 : Caractéristiques hygrothermiques de l'enveloppe.....	68
Tableau 3.3 : Données relevées in situ – Température et HR.....	74
Tableau 3.4 : Résultats du questionnaire – confort perçu.....	77
Tableau 4.1 : Caractéristiques hygrothermiques du mur standard.....	89
Tableau 4.2 : Résultats de simulation – Scénario 1.....	90
Tableau 4.3 : Caractéristiques hygrothermiques du mur isolé.....	91
Tableau 4.4 : Résultats de simulation – Scénario 2.....	92
Tableau 4.5 : Caractéristiques du double vitrage performant.....	93
Tableau 4.6 : Résultats de simulation – Scénario 3.....	95
Tableau 4.7 : Synthèse comparative des 3 scénarios.....	96

Nomenclature

Abréviations

RT : Réglementation thermique

UAT : Unité d'analyse thermique

SHD : Simulation hygrothermique dynamique

HVAC : Heating, Ventilation and Air Conditioning (chauffage, ventilation et climatisation)

CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment

ASFERA : Association Scientifique pour l'Énergie, le Froid et l'Air conditionné

IEA : Agence Internationale de l'Énergie

Indices

Ta : Température de l'air ambiant (°C)

Tp : Température des parois (°C)

Text : Température extérieure (°C)

Top : Température opérative (°C)

HR : Humidité relative (%)

M : Métabolisme (W/m²)

R : Résistance thermique (m²·K/W)

C : Chaleur spécifique (kJ/kg·K)

U : Coefficient de transmission thermique (W/m²·K)

Symboles

λ : Conductivité thermique (W/m·K)

ρ : Masse volumique (kg/m³)

ρc : Chaleur volumique (J/m³·K)

ϕ : Flux thermique (W)

Δt : Écart de temps (s)

Q : Quantité de chaleur (J)

ε : Émissivité

α : Absorptivité thermique

CHAPITRE INTRODUCTIF

« La gestion de l'enveloppe d'un bâtiment est un aspect crucial pour garantir que le climat intérieur reste équilibré. En contrôlant comment la chaleur et l'humidité interagissent à travers la façade, nous pouvons créer des espaces confortables et durables tout en réduisant le besoin de systèmes artificiels. »

(Stouhi, 2019)

Chapitre introductif

1. Introduction

La question des enjeux environnementaux a toujours été au cœur des préoccupations humaines, particulièrement en ce qui concerne les conditions climatiques. Depuis les premiers âges de l'humanité, les hommes ont cherché à se protéger des intempéries et des variations climatiques, et ce besoin de protection s'est progressivement transformé en une quête d'adaptation plus poussée, prenant en compte les caractéristiques climatiques de chaque région. Frankopan (2024) souligne que cette adaptation aux changements environnementaux a toujours été un facteur déterminant dans l'évolution des civilisations, influençant leur organisation, leurs techniques et leur rapport au territoire.

Les architectures traditionnelles et vernaculaires témoignent de cette relation instinctive entre l'homme et son environnement naturel, où les techniques de construction étaient en parfaite harmonie avec les conditions climatiques locales, comme l'explique Yeang (2023), cette adaptation à l'environnement est primordiale dans les pratiques actuelles, où l'architecture doit non seulement répondre aux défis du climat, notamment en matière de chaleur et d'humidité, mais aussi exploiter des solutions écologiques pour améliorer le confort hygrothermique et la performance énergétique des bâtiments.

L'évolution des techniques architecturales et des connaissances sur l'environnement a conduit à une meilleure prise en compte de ce confort dans les bâtiments contemporains. Ce concept, au-delà de la simple régulation thermique, englobe désormais la gestion de l'humidité et de la chaleur de manière synergique. Selon Schumacher (2019), l'optimisation des bâtiments passe par des solutions innovantes et intégrées. Il soutient que l'architecture doit non seulement offrir une réponse en termes de température mais aussi respecter des principes de durabilité.

L'Algérie, en raison de sa diversité climatique, se trouve face à des défis architecturaux majeurs, notamment dans la gestion du confort hygrothermique qui se positionne comme un enjeu clé dans les bâtiments. Cette problématique devient d'autant plus importante dans un secteur où la consommation d'énergie est l'une des plus élevées, notamment dans les bâtiments publics et les espaces dédiés à un grand nombre d'utilisateurs,

tels que les salles de lecture. Dans ces espaces, qui continuent d'être conçus selon des normes traditionnelles souvent obsolètes, Hens (2024) met en évidence que ces problématiques de régulation thermique et d'humidité influencent directement le bien-être et la productivité des usagers, tout en générant une surconsommation énergétique.

Au cœur du concept de confort hygrothermique, défini comme un état de satisfaction des occupants vis-à-vis de leur environnement sans ressentir le besoin de modifier leur condition (température ambiante, humidité, ventilation). Cette transition ne se limite pas à des systèmes actifs coûteux mais requiert une approche intégrée, favorisant les stratégies passives pour réguler les conditions intérieures de manière efficace et écologique. Plusieurs études récentes se sont intéressées à l'optimisation de ce confort dans les bâtiments, en abordant des aspects variés allant de la configuration des espaces intérieurs à l'efficacité des systèmes de ventilation et de chauffage.

Cependant, les recherches les plus récentes se concentrent particulièrement sur l'optimisation des façades des bâtiments, un élément crucial de l'enveloppe, bien qu'elles soient souvent perçues principalement sous leur aspect esthétique ou de protection structurelle, Korichi et Bouferit (2021) affirment que les façades jouent un rôle essentiel en régulant les échanges thermiques et hydriques entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. Ils soulignent que l'étude des matériaux composant ces enveloppes est devenue un axe stratégique pour optimiser l'efficacité énergétique et améliorer le confort hygrothermique, une approche alignée avec les tendances actuelles en matière de durabilité.

Dans les salles de lecture, la répartition entre surfaces vitrées et opaques influence directement la gestion du confort intérieur. Les vitrages, bien qu'offrant un apport lumineux bénéfique, peuvent provoquer des surchauffes en été, tandis que les surfaces opaques assurent une meilleure isolation hygrothermique. Des études récentes, telles que celles de Bouchahm et Bourbia (2022) montrent que l'optimisation de cette répartition permet de réduire significativement les besoins en chauffage et en climatisation. Une approche intégrée combinant isolants adaptés, type de vitrage performant et ventilation naturelle est ainsi essentielle pour garantir un équilibre entre confort et performance énergétique.

Bien que plusieurs recherches aient été effectuées sur l'impact des façades et des matériaux qui les composent sur le confort hygrothermique, ces aspects restent souvent

négligés dans des espaces spécifiques tels que les salles de lecture notamment en Algérie. Cette présente recherche cherche à combler cette lacune en se concentrant sur l'optimisation du confort hygrothermique dans ces espaces, en mettant l'accent sur les façades et les matériaux utilisés.

2. Problématiques

Les salles de lecture jouent un rôle central dans les pratiques d'apprentissage. Il est donc pertinent d'interroger leurs conditions hygrothermiques, susceptibles d'influencer le bien-être et la concentration des usagers. L'instabilité thermique, les variations de température au fil de la journée et la mauvaise régulation de la ventilation sont autant de facteurs qui nuisent au bien-être des occupants. Ces désagréments se traduisent par des comportements observables, tels que le déplacement des usagers vers certaines zones pour échapper aux courants d'air ou à l'accumulation de chaleur.

Dans une ville comme Bejaïa, avec un climat méditerranéen, cette problématique est particulièrement perceptible dans les salles de lecture. Nombre d'entre elles souffrent d'un manque d'adaptation aux conditions climatiques locales, entraînant un inconfort hygrothermique récurrent pour les usagers.

Une étude récente menée par Margot Ruiz en 2023, intitulée *Modélisation des transferts hygrothermiques à travers les parois à l'échelle urbaine*, s'est penchée sur l'impact des transferts hygrothermiques dans les bâtiments anciens. Cette recherche a mis en évidence l'importance de considérer les transferts d'humidité et de chaleur à travers les parois pour évaluer le confort thermique et hydrique des occupants.

En Algérie, le confort hygrothermique des bâtiments est principalement assuré par des systèmes de chauffage et de climatisation mécanique. Bien que ces solutions garantissent un minimum de bien-être, elles restent coûteuses et énergivores. Une approche plus durable et mieux adaptée au contexte climatique repose sur l'optimisation des caractéristiques architecturales des bâtiments.

Plusieurs travaux ont montré que les façades jouent un rôle majeur dans la performance hygrothermique des bâtiments. L'étude de Khadraoui et Sriti (2018) souligne que le choix des matériaux de façade, notamment à travers leur inertie thermique, participe à la régulation des conditions intérieures et influe sur le confort des occupants. Par ailleurs, la configuration des ouvertures ainsi que les caractéristiques du

vitrage peuvent constituer également des paramètres déterminants dans ce confort.

Malgré cette prise de conscience croissante, les salles de lecture en Algérie, y compris celles de Bejaïa, souffrent encore d'une conception inadaptée, limitant leur capacité à offrir un cadre propice à la concentration et à l'apprentissage. Les questions suivantes nous aideront à mieux résoudre la problématique centrale du thème :

- **Quel est l'impact des façades et de leurs caractéristiques matérielles sur l'optimisation du confort hygrothermique et de l'efficacité énergétique des salles de lecture en climat méditerranéen ?**

Pour appuyer cette problématique d'autres questionnements se doit d'être posée :

- **Comment le choix et la performance des isolants des surfaces opaques influencent-ils la gestion des transferts hygrothermiques dans les salles de lecture ?**
- **Comment le type de vitrages et leurs performances thermiques et hydriques affectent-ils le confort hygrothermique des salles de lecture ?**

3. Hypothèses

L'étude du confort hygrothermique dans les salles de lecture met en évidence des problématiques complexes liées à la conception des façades. Si l'importance des surfaces opaques et vitrées est avérée, plusieurs aspects restent à approfondir. Afin de répondre aux questions précédentes, les hypothèses suivantes sont formulées :

- **L'optimisation des propriétés thermiques et hydriques des surfaces de façade pourrait significativement minimiser les transferts de chaleur et d'humidité, réduisant ainsi les fluctuations hygrothermiques et augmentant l'efficacité énergétique des salles de lecture.**
- **L'emploi d'isolants à faible conductivité thermique et adaptés au climat méditerranéen améliorerait la régulation hygrothermique des surfaces opaques, contribuant ainsi au confort des usagers.**
- **Un choix adapté du type de vitrages pourrait jouer un rôle essentiel dans l'amélioration du confort hygrothermique des salles de lecture tout en réduisant la consommation énergétique.**

4. Contexte et objectif de recherche

La ville de Bejaïa, située au nord-est de l'Algérie, bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et humides ainsi que des hivers doux. Ce contexte climatique influence directement le confort hygrothermique des bâtiments, en particulier des salles de lecture, où les variations de température et d'humidité peuvent impacter le bien-être des usagers.

Face à la nécessité de réévaluer ces infrastructures et de proposer des solutions adaptées aux défis climatiques, cette recherche vise à étudier et optimiser les performances des salles de lecture en termes de confort hygrothermique. L'objectif est d'identifier les leviers d'amélioration et de formuler des recommandations architecturales et techniques permettant d'assurer un cadre plus confortable et écoénergétique et afin d'apporter des réponses concrètes, voici les objectifs fixés :

- Analyser la situation des salles de lecture à Bejaia en termes d'efficacité hygrothermique afin d'identifier et analyser les principales causes d'inconfort en examinant l'impact de l'absence d'isolation et l'inefficacité des systèmes de chauffages et ventilations pour optimiser au maximum le bien être des usagers.
- Evaluer les performances et les gains énergétiques potentiels des façades (les surfaces opaques et vitrées) des salles de lecture à Bejaia afin de l'améliorer.
- Développer un modèle architectural optimisé, intégrant une configuration performante des surfaces vitrées et opaques, visant à améliorer le confort hygrothermique tout en limitant les pertes et les gains thermiques excessifs.
- Utilisation des isolants performants et évaluer leur propriété pour une meilleur optimisation du confort hygrothermique.
- Analyser l'influence du type de vitrage sur les performances thermiques et hydriques des salles de lecture, en étudiant les propriétés des vitrages à haute efficacité énergétique et leur contribution à la réduction des pertes thermiques et hydriques et à la régulation du confort intérieur.
- Fournir des recommandations aux concepteurs sur la conception de façades performantes, en tenant compte du confort hygrothermique et des spécificités climatiques de Bejaïa.

5. Analyse conceptuelle

Ce schéma conceptuel illustre les différentes étapes et relations dans l'optimisation du confort thermique dans les salles de lecture. Il décrit les objectifs de l'étude, les variables indépendantes et dépendantes, et les recommandations pratiques pour améliorer le bien-être des usagers et l'efficacité énergétique.

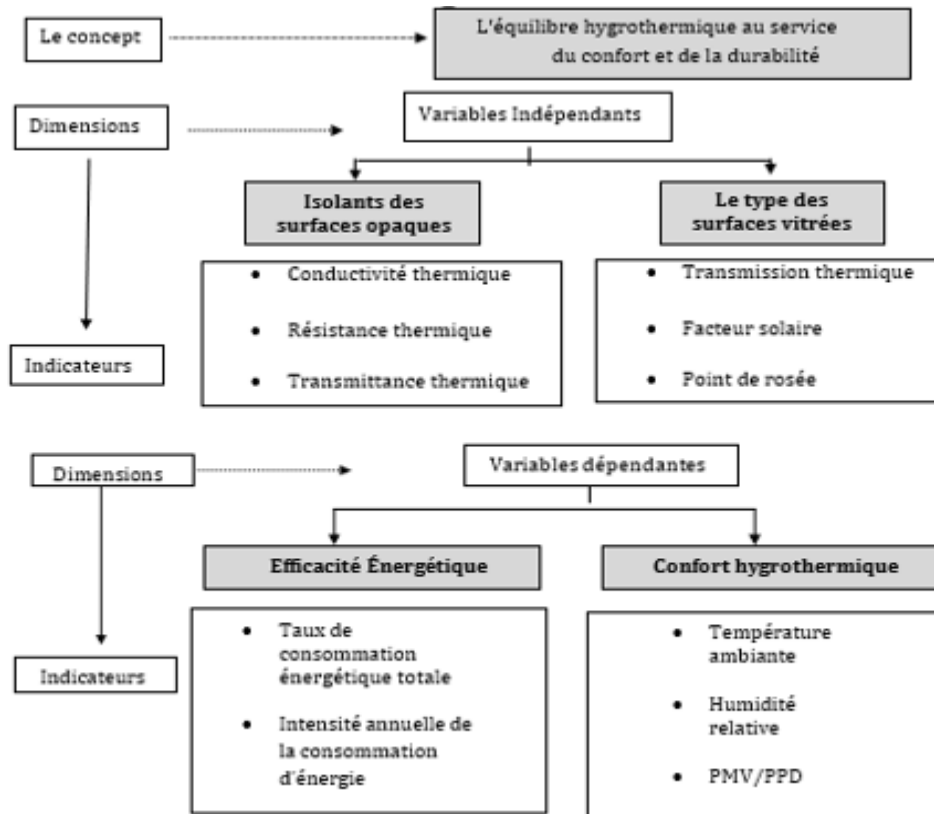


Figure 1 : Schéma de l'analyse conceptuelle (Source : Auteur, 2025)

6. Méthodologie

Pour répondre à la problématique du confort hygrothermique des salles de lecture à Bejaïa, cette recherche adopte une méthodologie combinée. En croisant plusieurs approches – bibliographique, empirique et numérique – nous cherchons à comprendre les enjeux théoriques, pratiques et techniques, tout en fournissant des recommandations adaptées aux spécificités climatiques locales. Chaque approche vient compléter l'analyse sous un angle différent, permettant d'obtenir une vision globale et détaillée de la problématique.

- **Approche Bibliographique** : Cette approche consiste à explorer les connaissances théoriques existantes concernant le confort hygrothermique, en se

concentrant sur les facteurs influençant le bien-être des occupants dans des contextes similaires. Elle inclut l'analyse de recherches antérieures sur les matériaux de façade, l'impact des configurations architecturales, et les principes bioclimatiques applicables aux climats méditerranéens comme celui de Bejaïa. Cette phase permettra de poser les bases théoriques nécessaires à l'analyse et à l'optimisation des façades.

- **Approche Empirique :** L'approche empirique combine des méthodes qualitatives et quantitatives pour recueillir des données directement sur le terrain.
 - **Qualitative :** Des entretiens et des questionnaires seront menés avec les usagers des salles de lecture pour recueillir leurs perceptions sur le confort thermique et les conditions d'utilisation des espaces.
 - **Quantitative :** Des mesures de température, d'humidité et de ventilation seront réalisées sur site à l'aide de multimètres et d'autres instruments. Ces données permettront d'analyser les conditions réelles dans les salles de lecture et de comparer le confort ressenti avec les normes de confort hygrothermique.
- **Approche Numérique :** Cette approche s'appuie sur un outil de simulation tel qu'**ArchiWizard**, qui utilise **EnergyPlus** comme moteur de calcul, qui permettra de modéliser différentes configurations de façades et d'évaluer leur performance thermique. En simulant l'impact de divers matériaux, de l'orientation des façades et des configurations des surfaces opaques et vitrées, cette méthode fournira des prédictions précises sur l'efficacité énergétique et le confort thermique dans les salles de lecture, permettant de tester les solutions les plus efficaces avant leur mise en œuvre.

7. Structure du Mémoire

Ce mémoire se compose de quatre chapitres principaux, chacun abordant une facette spécifique du confort hygrothermique dans les espaces de lecture. La structure est conçue pour explorer à la fois les fondements théoriques, la méthodologie d'évaluation pratique et l'optimisation des conditions hygrothermiques à travers des simulations. Cette organisation permet une approche complète du sujet, allant de l'analyse théorique à la mise en œuvre pratique des solutions.

Chapitre Introductif : ce chapitre introduit le contexte de la recherche sur le confort hygrothermique dans les espaces de lecture, en mettant en lumière les enjeux spécifiques

liés à la température et l'humidité. Il présente également la problématique, les objectifs du mémoire, les hypothèses de recherche ainsi que la méthodologie employée pour aborder cette étude.

Chapitre 1 : Impact de la façade sur le fonctionnement de l'hygrothermie et l'efficacité énergétique : ce chapitre s'intéresse d'abord au rôle des façades dans la régulation des échanges thermiques et hydriques, en expliquant les phénomènes de transfert et les désordres pouvant en découler. Il explore ensuite les implications de ces échanges sur le comportement hygrothermique global du bâtiment. Enfin, il aborde les enjeux liés à la performance énergétique, notamment en Algérie, afin de mettre en lumière les leviers d'optimisation possibles dans la conception architecturale.

Chapitre 2 : Le confort hygrothermique et son impact sur l'être humain dans les salles de lecture : ce chapitre se concentre sur le confort hygrothermique dans les salles de lecture, en abordant sa définition et ses principes fondamentaux. Il examine les échanges thermiques entre le corps humain et son environnement, ainsi que les facteurs influençant ce confort, qu'ils soient liés à l'individu ou à l'environnement. Enfin, il analyse l'impact de ces conditions sur le bien-être, la cognition et la performance des usagers, tout en proposant des stratégies pour optimiser ces éléments dans les espaces de lecture et d'apprentissage.

Chapitre 3 : Évaluation expérimentale du confort hygrothermique (prise de mesure) : ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale menée sous forme de mesures in situ et d'une enquête utilisateur dans les salles de lecture de la maison de la Culture, choisie comme cas d'étude. Dans une première partie, il décrit le protocole empirique élaboré pour la collecte de données, en évaluant quantitativement le confort hygrothermique à travers des mesures des paramètres internes. En parallèle, une enquête par questionnaire est menée auprès des usagers durant la période de prise de mesures afin d'explorer leur perception du confort et d'identifier les éventuels inconforts ressentis.

Chapitre 4 : Simulation et Modélisation numérique du confort hygrothermique : ce chapitre se concentre sur la modélisation numérique des performances hygrothermiques des façades des salles de lecture à l'aide du logiciel ArchiWizard, en s'appuyant sur le moteur de calcul EnergyPlus. L'étude ciblera les surfaces opaques, en évaluant l'apport des isolants thermiques, ainsi que les surfaces vitrées, en analysant le type de vitrage le

plus adapté, ainsi limiter les échanges de chaleur et optimiser la l'humidité afin d'optimiser le confort hygrothermique des salles de lecture.

Conclusion générale : résume les principaux résultats obtenus tout au long du mémoire, en apportant des réponses à la problématique de la recherche. Elle propose également des recommandations pour améliorer le confort hygrothermique dans les bâtiments, en particulier dans les espaces de lecture, et met en avant les perspectives de recherches futures.

La figure 2 illustre un schéma qui synthétise la structure du mémoire.

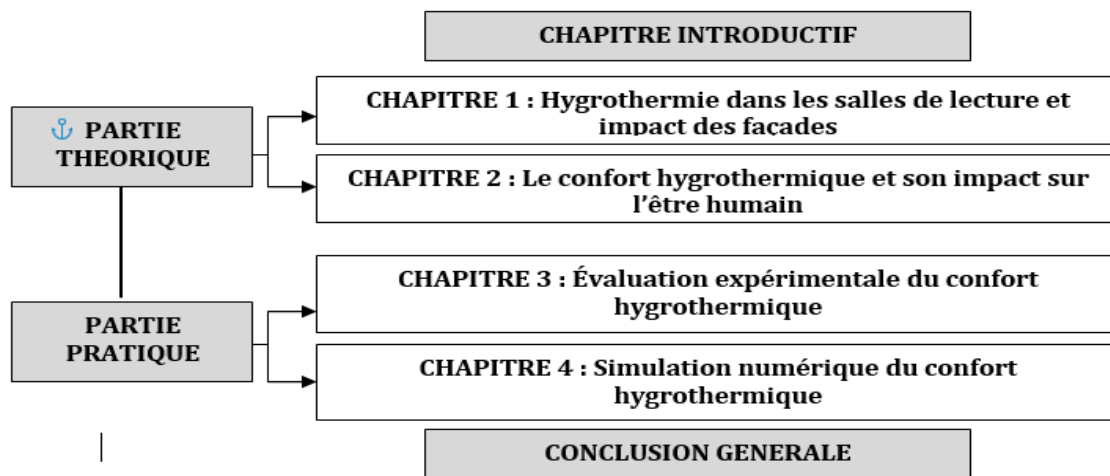


Figure 2 : Structure du mémoire (Source : Auteur, 2025)

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I :

Impact de la façade sur le fonctionnement hygrothermique et l'efficacité énergétique

Trois thèmes principaux seront abordés au cours de ce chapitre : la façade et son rôle thermique et hydrique ainsi que son impact sur l'hygrothermie, en décrivant les transferts de chaleur et d'humidité et pathologie causée par les dysfonctionnements de ces phénomènes ; et l'efficacité énergétique, en décrivant les enjeux énergétiques et la consommation d'énergie, en particulier le cas de l'Algérie. L'objectif est de comprendre comment ces éléments interagissent pour améliorer la conception et la fonctionnalité des bâtiments.

"L'enveloppe du bâtiment n'est plus une barrière statique, mais une interface active qui interagit avec son environnement. Elle peut percevoir, s'adapter et répondre aux conditions climatiques, agissant comme un organisme vivant qui respire, filtre et régule les échanges d'énergie."

Green, Liu, & Al-Hussein (2023)

Introduction

De nos jours et face aux défis environnementaux actuels et à la transition vers des sources d'énergie plus durables, l'optimisation du confort hygrothermique des bâtiments ainsi que leur efficacité énergétique est devenue une priorité absolue incontournable. Les façades jouent un rôle clé dans cette quête de performance en tant qu'interface entre l'environnement extérieur et l'intérieur, elles vont bien au-delà de la simple protection contre les intempéries ou de leur aspect esthétique, elles contrôlent les échanges thermiques et hydriques influençant directement la qualité de vie des occupants et la durabilité des constructions (Perrot, 2023).

L'hygrothermie se penche sur les interactions entre la chaleur et l'humidité et joue un rôle crucial dans la compréhension de l'impact des façades sur l'efficacité énergétique des bâtiments. Une gestion inadéquate de ces phénomènes peut entraîner des problèmes comme la condensation excessive, des infiltrations d'eau ou une détérioration prématurée des matériaux ; ces troubles compromettent la pérennité des structures (Rahm 2022).

En parallèle, la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique des constructions se présente comme une réponse fondamentale aux défis climatiques tant à l'échelle mondiale que locale. Dans des zones telles que l'Algérie où les changements climatiques sont prononcés, il est essentiel de concevoir des façades adaptées aux particularités locales afin de réduire la consommation d'énergie tout en garantissant un confort optimal (Aït-Mokhtar & Belarbi, 2018).

Ce chapitre explore ainsi les interactions complexes entre les façades, les mécanismes hygrothermiques et l'efficacité énergétique, mettant en lumière les principes fondamentaux et les stratégies permettant de répondre aux défis contemporains de la construction durable.

I.1. La façade : définition, fonctionnement et composition

I.1.1. Définition et rôle des façades dans l'enveloppe du bâtiment

La façade est la paroi extérieure verticale d'un bâtiment, jouant un rôle clé dans l'esthétique, la structure et la performance hygrothermique. Interface principale entre intérieur et extérieur, elle influence le confort des usagers et l'efficacité énergétique. Elle incarne également une dimension historique, technique et symbolique en constante évolution. Korman (2022) la décrit comme l'élément central articulant les relations entre intérieur et extérieur, tout en assurant une expression architecturale à la fois fonctionnelle et esthétique.

Le terme "façade" trouve son origine dans le latin "facies " signifiant "visage" ou "apparence". Ce terme a évolué à travers l'italien "facciata" qui désigne spécifiquement la face principale d'un bâtiment, avant d'être adopté en français pour désigner l'enveloppe extérieure visible d'un édifice (Fièvre, 2010).

➤ Définitions selon différentes disciplines et auteurs :

(La figure 1.1) ci-dessous illustre la pluralité de lectures et met en évidence les différentes dimensions attribuées à la façade selon les points de vue, d'après Herant (2004).



Figure 1.1: Définition de la façade selon différents acteurs
(Source : Herant, 2004 - adaptée par Khadraoui, 2017)

La façade peut être appréhendée sous plusieurs angles, chacun révélant une facette de sa complexité et de ses fonctions multiples.

- **Architecturale** : Élément fondamental de la composition, elle est passée d'un support d'ordre à une peau interactive et performante (Koolhaas et al., 2014).
- **Thermique** : Interface régulant les échanges thermiques, elle exige un équilibre entre esthétique et efficacité énergétique (Ibañez-Puy et al., 2018 ; Zemella et al., 2014).
- **Sociologique** : Véritable carte d'identité du bâtiment, elle exprime des valeurs culturelles et esthétique et participe à la structuration de l'espace urbain (Faure, 2007).
- **Ingénierie** : la façade est conçue comme un système complexe où interagissent matériaux, structures et dispositifs technologiques pour garantir sécurité, durabilité et performance environnementale.

Ainsi, la façade se révèle comme un dispositif à la croisée de l'art, de la technique et du social.

I.1.2. Fonctions principales d'une façade

Les façades remplissent plusieurs fonctions essentielles, Chabi (2012) les a regroupées en quatre fonctions principales : **Fonction protectrice, structurelle, transitaire, visuelle (esthétique)**. La figure ci-dessous les présente (figure 1.2)

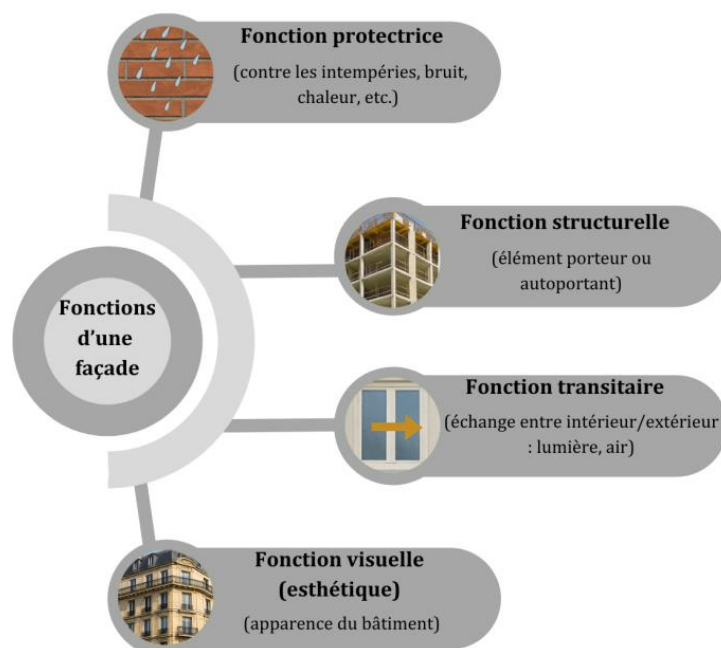


Figure 1.2: Les fonctions de la façade (Source : Chabi ,2012 ; adaptée par l'auteur, 2025)

Ainsi, ces fonctions sont essentielles pour garantir la performance globale d'une façade et son rôle dans le confort, la durabilité et l'esthétique d'un bâtiment :

- **Fonction protectrice** : Protéger le bâtiment contre les agressions extérieures (eau, vent, bruit, chaleur) tout en assurant la sécurité et l'étanchéité.
- **Fonction structurelle** : Participer à la stabilité et à la résistance globale du bâtiment en supportant les charges et en limitant les déformations.
- **Fonction transitaire** : Faciliter les échanges entre l'intérieur et l'extérieur (lumière, air, chaleur) pour garantir confort thermique et qualité de vie.
- **Fonction visuelle (esthétique)** : Assurer l'aspect esthétique et l'intégration harmonieuse du bâtiment dans son environnement tout en reflétant son identité architecturale.

En ce sens, le Brief Filière Façade Bas Carbone publié par le Hub des Prescripteurs Bas Carbone a donné les fonctions de la façade (figure 1.3).

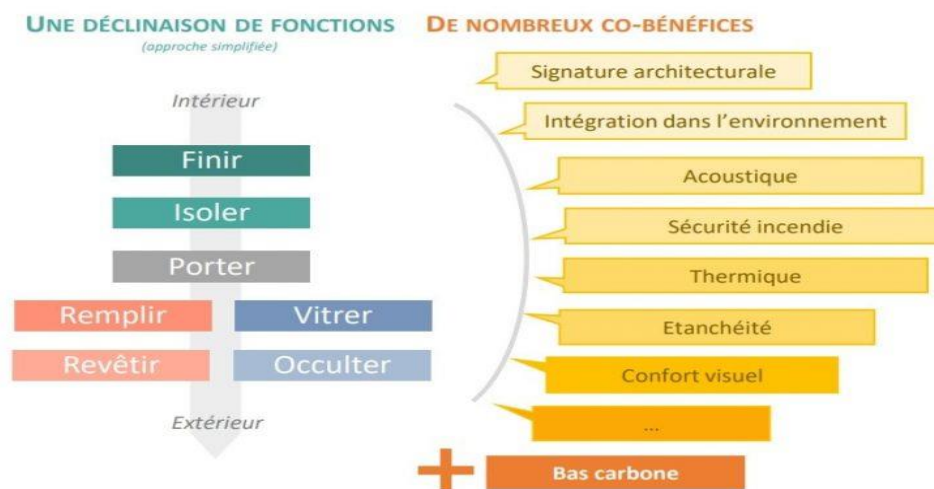


Figure 1.3 : Les fonctions de la façade

(Source : www.terao.fr)

Le schéma met en évidence deux aspects principaux :

- **Les fonctions fondamentales** : Elles couvrent les besoins techniques et fonctionnels de la façade, allant de la protection contre les intempéries à la structuration du bâtiment.
- **Les Co-bénéfices** : Ils montrent comment une bonne conception de la façade peut générer des avantages supplémentaires, tant pour les occupants que pour l'environnement.

I.1.3. Les critères de sélection d'une façade

La façade d'un bâtiment joue un rôle essentiel dans le processus de conception architecturale. Elle ne se limite pas à l'esthétique, mais influence aussi la performance énergétique, l'intégration urbaine et la faisabilité technique du projet. Selon Hall (2010), l'architecte doit prendre en compte plusieurs éléments lors de cette étape, notamment la performance thermique et hydrique, la viabilité économique et les conséquences des choix formels. Nous présentons ci-dessous les critères du choix d'une façade (figure 1.4)

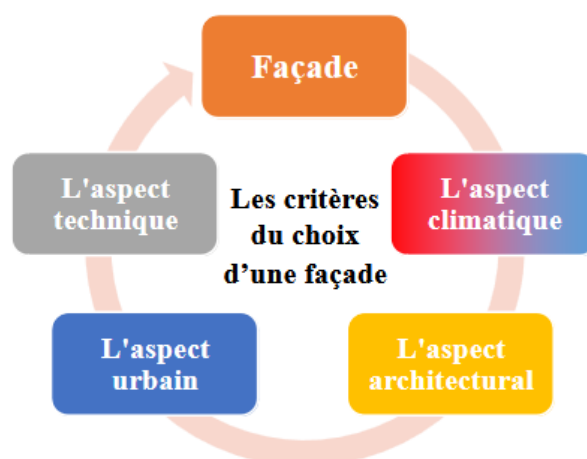


Figure 1.4 : Les critères du choix d'une façade (Source : Khadraoui, 2019)

Le choix d'une façade repose généralement sur quatre grands types de critères :

- **Climatique** : il s'agit d'adapter la façade aux conditions environnementales locales (température, humidité, précipitations, etc.), qui influencent directement le confort intérieur et la durabilité des matériaux.
- **Architectural** : ce critère englobe les dimensions esthétiques, conceptuelles et symboliques, traduisant l'identité du projet.
- **Urbain** : il concerne l'insertion de la façade dans son environnement immédiat (hauteur, alignement, couleurs, textures, obstacles visuels, etc.).
- **Technique** : ce volet touche à la faisabilité de la mise en œuvre, à la compatibilité avec les matériaux disponibles et aux contraintes de construction.

I.1.4. Typologies de façades et leur classification

L'enveloppe d'un bâtiment joue un rôle clé dans ses performances structurelles, hygrothermiques et esthétiques. Les façades peuvent être classées selon différents

critères, notamment leur forme, leur matériau de construction, et leur principe de fonctionnement, ainsi selon le type d'enveloppe.

I.1.4.1. Façade selon la forme

Nous proposons ci-après une classification des différents types de façades en fonction de leurs formes (figure 1.5).

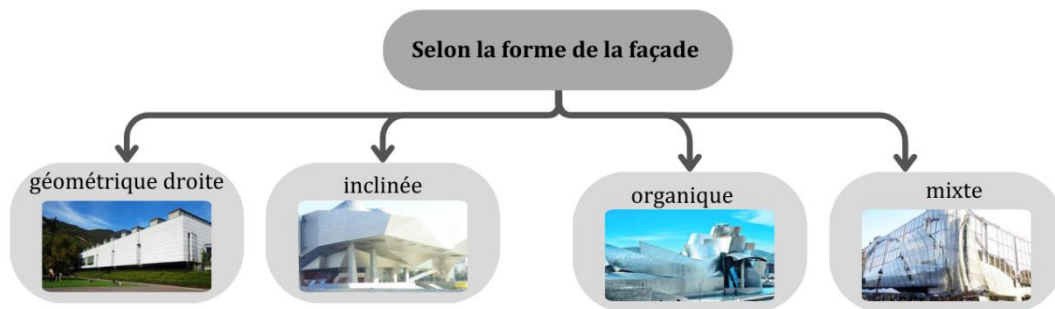


Figure 1.5: Illustration schématique des différentes catégories de façades en considérant leur forme (Source : Khadraoui, 2019 ; version adaptée par l'auteur, 2025)

En fonction de leur configuration formelle, on distingue généralement quatre types de façades : droite, inclinée, mixte et organique (Gönen & Alsan, 2021)

I.1.4.2. Façade selon les matériaux de construction

Nous proposons ci-après une classification des différents types de façades en fonction de leurs matériaux de construction (figure 1.6).

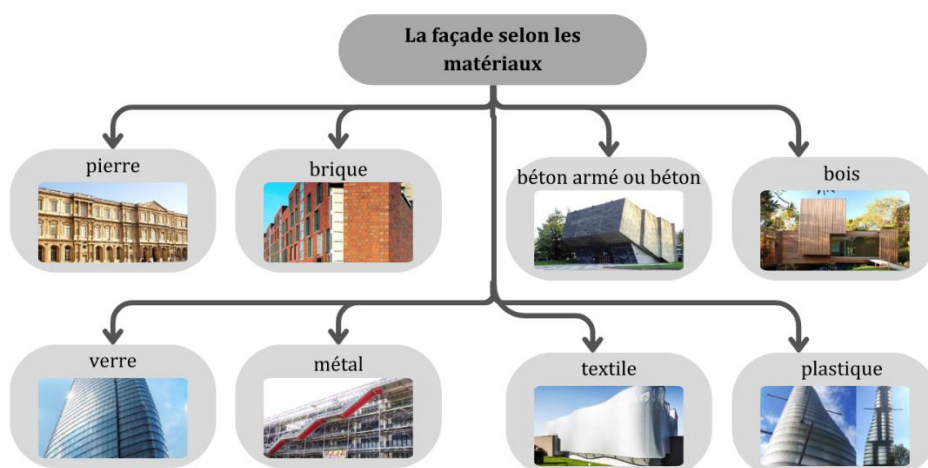


Figure 1.6 : Illustration schématique des différentes catégories de façades en considérant leurs matériaux de construction (Source : Khadraoui, 2019 ; version adaptée par l'auteur, 2025)

En raison de la grande diversité des matériaux disponibles, il est possible de classer les façades selon une variété de types, tels que les façades en béton, en pierre, en verre, en brique, en bois, en textile, etc. (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012).

I.1.4.3. Façade selon le principe de fonctionnement

Nous proposons ci-après une classification des différents types de façades en fonction de leur principe de fonctionnement (figure 1.7).

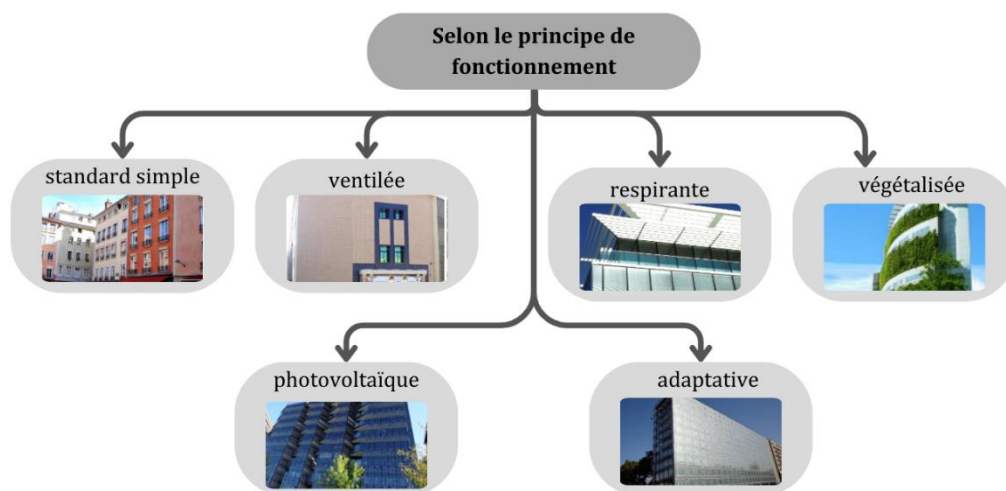


Figure 1.7 : Illustration schématisque des différentes catégories de façades en considérant leur principe de fonctionnement (Source : Khadraoui, 2019 ; version adaptée par l'auteur, 2025)

Les différents types de façades peuvent également être analysés en fonction de leur principe de fonctionnement. De nos jours, la façade ne se limite plus à son rôle traditionnel d'enveloppe protectrice séparant l'intérieur de l'extérieur. Elle assume désormais des fonctions supplémentaires, déterminées par son usage spécifique. Parmi ces nouvelles typologies, on peut citer les façades végétales, photovoltaïques, ventilées, respirante, etc.

I.1.4.4. Façade selon le type de l'enveloppe

Nous proposons ci-après une classification des différents types de façades en fonction du type de l'enveloppe (figure 1.8).

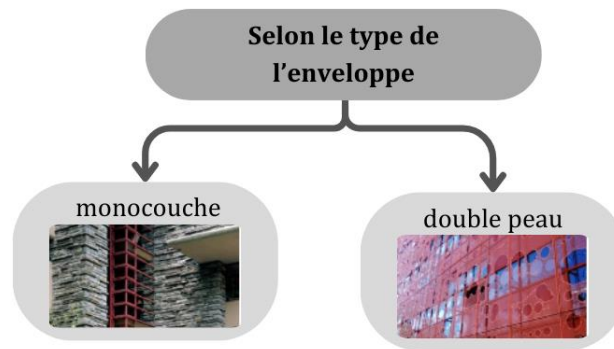


Figure 1.8 : Illustration schématisque des différentes catégories de façades en considérant le type de l'enveloppe (Source : Khadraoui, 2019 ; version adaptée par l'auteur, 2025)

Deux principaux types de façades se distinguent par leur structure et leur influence sur les performances hygrothermiques et énergétiques des bâtiments :

- **Façade monocouche :** Formée d'une seule peau, cette façade agit comme une barrière physique entre l'intérieur et l'extérieur. Cependant, ses capacités en matière d'isolation thermique et acoustique restent limitées, ce qui peut entraîner des pertes énergétiques et des déséquilibres hygrothermiques.
- **Façade double peau :** Composée de deux couches séparées par une lame d'air ventilée, cette façade optimise les transferts thermiques et hydriques. Elle offre une isolation renforcée, réduit la consommation énergétique, améliore le confort acoustique et contribue à une meilleure régulation hygrothermique. De plus, elle s'inscrit dans une démarche environnementale grâce à son esthétique moderne et ses performances durables.

I.1.5. Interaction entre la façade et son environnement

Le climat (température, humidité, vents dominants) impacte fortement la conception des façades, (figure 1.9).



Figure 1.9 : Influence du climat sur les performances d'une façade (Source : <https://www.cercle-promodul.inef4.org/>)

Par exemple :

- Dans un climat chaud, une façade évacuant efficacement la chaleur est préférable.
- Dans un climat froid, une façade bien isolée et à forte inertie thermique est recommandée.

I.1.6. Impact de l'orientation sur le comportement hygrothermique

L'orientation du bâtiment impacte fortement la conception des façades, (figure 1.10).



Figure 1.10 : Impact de l'orientation d'une façade (Source : www.duco.eu/fr)

- Une façade orientée plein sud reçoit plus d'apports solaires.
- Une façade nord est plus exposée au froid et à l'humidité.

I.1.7. Surfaces vitrées et surfaces opaques

I.1.7.1. Définition et classification des surfaces vitrées et opaques : Les surfaces vitrées et opaques constituent les principaux éléments de l'enveloppe du bâtiment et influencent directement son comportement hygrothermique et énergétique, (figure 1.11).

- **Surfaces vitrées :** Parties transparentes ou translucides de l'enveloppe du bâtiment (fenêtres, baies vitrées, verrières), permettant le passage de la lumière et influençant les apports solaires.
- **Surfaces opaques :** Composants non transparents (murs, toitures, planchers), jouant un rôle essentiel dans l'isolation thermique et la gestion des transferts hygrométriques.



Figure 1.11 : Surfaces vitrées et surfaces opaques (Source : <https://support.graphisoft.com/>)

Donc les surfaces vitrées et opaques, éléments clés de l'enveloppe du bâtiment, influencent directement son comportement hygrothermique et énergétique. Tandis que les vitrages gèrent les apports lumineux et solaires, les surfaces opaques assurent isolation thermique et régulation hydrométrique. Un équilibre optimal entre ces deux composants est essentiel pour maximiser confort et efficacité énergétique.

I.1.7.2. Rôle des surfaces vitrées dans l'apport lumineux et hygrothermique

- Rôle dans l'apport de lumière : (figure 1.12)



Figure 1.12 : Rôle de la surface vitrée dans l'apport de lumière

(Source : <http://lab.cercle-promodul.inef4.org/>)

Les surfaces vitrées sont des parties transparentes de l'enveloppe du bâtiment qui permettent à la lumière de passer. Ceci est dû à leur transmittance aux ondes courtes non nulle, permettant aux gains solaires directs de pénétrer dans le bâtiment et de fournir un éclairage naturel. La quantité de lumière naturelle admise dépend de la taille de la surface vitrée (rapport fenêtre/mur) et des propriétés du vitrage (ESSO,2018).

- **Rôle dans la performance thermique** : le schéma ci-dessous représente les performances des surfaces vitrées dans la thermique, (figure 1.13).

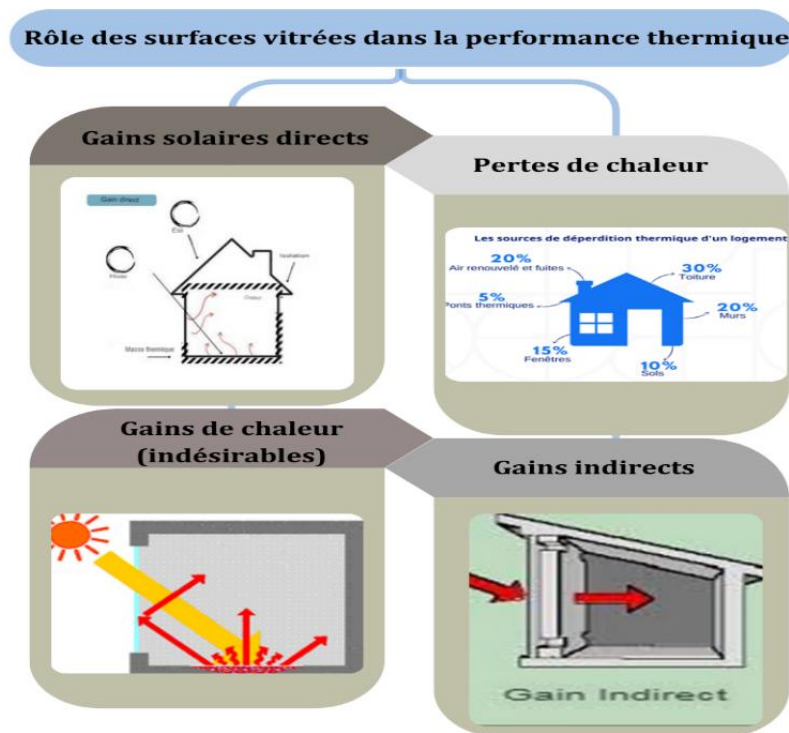


Figure 1.13 : Performances thermique des surfaces vitrées

(Source : Hens ,2007 et Belkacem ,2017 ; version adaptée par l'auteur, 2025)

- **Gains solaires directs** : Les surfaces vitrées laissent entrer le rayonnement solaire, contribuant au chauffage passif. Cela dépend de l'orientation, de la taille des fenêtres et du coefficient de gain solaire (G-win) (Hens, 2007).
- **Pertes de chaleur** : Les vitrages et cadres peuvent causer d'importantes pertes de chaleur, notamment dans les climats froids, surtout avec des façades entièrement vitrées (Hens, 2007).
- **Gains de chaleur indésirables** : En période chaude, les grandes surfaces vitrées peuvent provoquer une surchauffe, augmentant les besoins en refroidissement et la consommation énergétique (Belkacem, 2017).
- **Gains de chaleur indirects** : Le verre absorbe une partie du rayonnement solaire, se réchauffe, puis transfère cette chaleur à l'intérieur par convection et rayonnement thermique (Hens, 2007).

I.1.7.3. Influence du type de vitrage :

Le type de vitrage utilisé a un impact critique sur la performance lumineuse et thermique des fenêtres. Différents types incluent le simple, le double et le triple vitrage, ainsi que les revêtements à faible émissivité (low-e) et les remplissages de gaz (comme l'argon) dans le double et le triple vitrage.

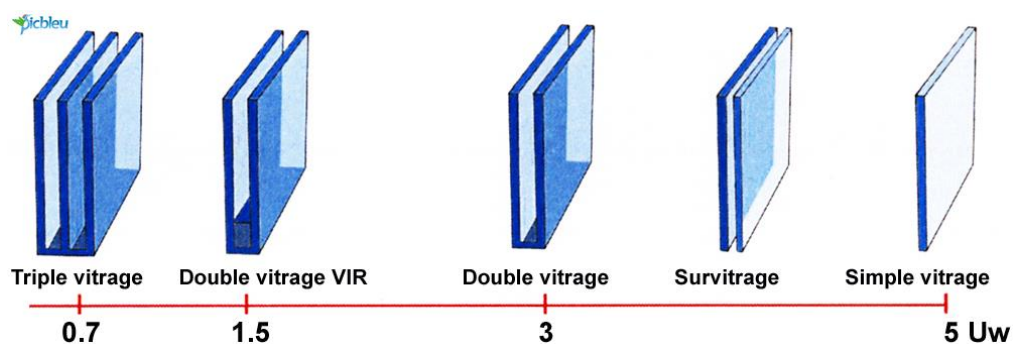


Figure 1.14 : Type de vitrage

(Source : <https://l-isolation-thermique-double-et-triple-vitrage-isolant.com>)

- **Simple vitrage** : Composé d'une seule feuille de verre, il offre une isolation thermique et acoustique très limitée, entraînant des pertes de chaleur importantes.
- **Survitrage** : Solution temporaire consistant à ajouter une seconde couche de verre devant un simple vitrage existant pour améliorer légèrement l'isolation thermique et acoustique.
- **Double vitrage standard** : Deux feuilles de verre séparées par une lame d'air ou de gaz, offrant une meilleure isolation que le simple vitrage tout en restant abordable.
- **Double vitrage VIR (Vitrage à Isolation Renforcée)** : Intègre un film à basse émissivité et un gaz isolant (comme l'argon), réduisant significativement les déperditions thermiques par rapport au double vitrage standard.
- **Triple vitrage** : Trois feuilles de verre séparées par deux lames de gaz isolant, assurant une isolation thermique exceptionnelle, idéale pour les climats froids ou les bâtiments passifs.

I.1.7.4. Influence des surfaces opaques sur l'isolation et l'inertie hygrothermique

Les surfaces opaques assurent l'isolation thermique et l'inertie hygrothermique en limitant les échanges de chaleur grâce à leur résistance thermique. Les matériaux massifs

comme le béton ou la brique stabilisent la température intérieure en stockant la chaleur le jour et en la restituant la nuit (Baker & Standeven, 2021).

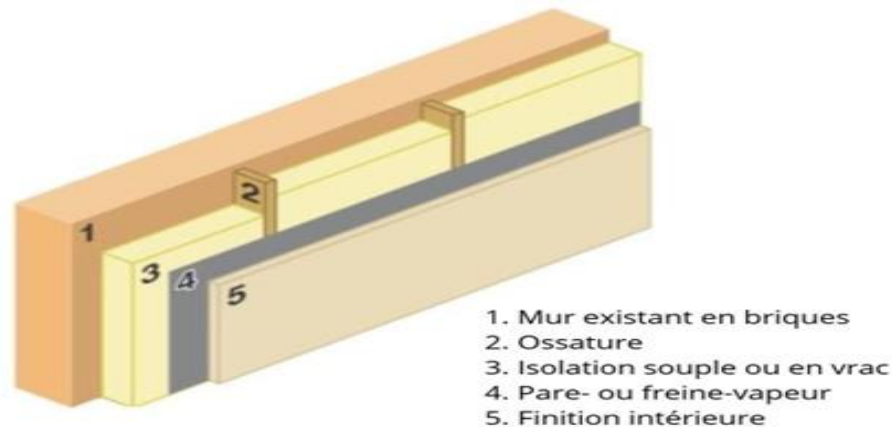


Figure 1.15 : Composition d'une surface opaque –mur- (Source : [//conseils-thermiques.org/](http://conseils-thermiques.org/))

Les performances hygrothermiques des surfaces opaques dépendent de plusieurs éléments constitutifs :

- **La couche extérieure** (enduit, parement, bardage), qui protège contre les intempéries et les radiations solaires ;
- **Le matériau porteur** (brique, béton, pierre), qui influence directement l'inertie thermique ;
- **Les isolants thermiques** (laine minérale, polystyrène, liège, etc.), qui limitent les transferts thermiques ;
- **Les couches de frein vapeur ou pare-vapeur**, qui régulent les transferts de vapeur d'eau et participent à la gestion de l'humidité ;
- **Les finitions intérieures** (plâtre, panneaux bois, etc.), qui peuvent aussi affecter légèrement la régulation hygrothermique.

I.1.7.5. Propriétés thermiques des matériaux : Ces propriétés thermiques se divisent en deux catégories principales :

- **Caractéristiques statiques :** Elles décrivent la réaction d'un matériau face à un flux de chaleur, indépendamment du temps. Cela inclut la conductivité thermique et la capacité thermique (Mansouri, 2003).

- **Caractéristiques dynamiques** : Elles représentent la rapidité avec laquelle un matériau gère les flux de chaleur, notamment à travers la diffusivité et l'effusivité thermique (Mansouri, 2003).

I.1.7.6. Propriétés thermiques des matériaux de construction courants

Le tableau ci-dessous présente les propriétés thermiques de certains matériaux de construction largement utilisés en Algérie :

Tableau 1.1 : Les propriétés thermique de certains matériaux (Source : Izard et Lelong, 2006)

Matériaux de construction		λ	C	ρ	ρC	a	b	vt
Bois	Bois léger	0.15	500	0.3	165	0.0009	4.8	2.2
	Bois lourd	0.2	650	0.7	436	0.0009	10.0	1.7
	Bois très léger	0.1	350	0.8	266	0.0005	5.6	1.5
Mortiers et Plâtre	Mortier	1.15	1950	0.23	449	0.0026	22.7	3.7
	Enduit à la chaux	0.7	1400	0.28	392	0.0018	16.6	3.1
	Enduit extérieur	1.15	1700	0.28	476	0.0024	23.4	3.6
	Enduit plâtre	0.35	1500	0.28	420	0.0008	12.1	2.1
	Plâtre gypse	0.42	1200	0.23	276	0.0015	10.8	2.8
Béton et Brique	Béton	1.51	2350	0.2	470	0.0032	26.6	4.1
	Béton cellulaire	0.16	400	0.24	96	0.0017	3.9	3
	Béton chanvre	0.13	350	0.2	70	0.0019	3	3.1
	Brique 10 cm	0.95	2000	0.2	400	0.0024	19.5	3.5
	Brique pleine	0.34	1000	0.2	200	0.0017	8.2	3
Métaux	Acier	52	7870	0.13	1023	0.0508	230.7	16.3
	Aluminium	230	2700	0.25	675	0.3407	394	42.3
	Cuivre	380	8930	0.11	982	0.3868	611.0	45.1
	Métal	150	8900	0.12	1068	0.1404	400.2	27.2
	Zinc	112	7130	0.11	784	0.1428	296.4	27.4

Les paramètres analysés incluent :

- **λ (conductivité thermique)** : Mesure de la capacité d'un matériau à conduire la chaleur (W/m.°C).
- **C (masse volumique)** : Quantité de matière par unité de volume (kg/m³).
- **ρ (chaleur spécifique)** : Quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un kilogramme de matériau de 1°C (Wh/kg.°C).

- **b (effusivité thermique)** : Capacité d'un matériau à absorber ou restituer rapidement la chaleur ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}/2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).
- **ρc (chaleur volumique)** : Quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un mètre cube de matériau de 1°C ($\text{Wh}/\text{m}^3\cdot^\circ\text{C}$).
- **a (diffusivité thermique)** : Vitesse à laquelle la chaleur se propage dans un matériau (m^2/s).

I.1.7.7. Les Isolants Thermiques

Les matériaux isolants thermiques sont spécialement conçus pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments en minimisant les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur (Theirry & David, 2009). Ces matériaux jouent un rôle clé dans la réduction des besoins en chauffage et climatisation, tout en garantissant un confort thermique optimal.

I.1.7.7. Classification des Isolants Thermiques



Figure 1.16 : Classification des isolants thermiques (Source : <https://www.ecoconso.be/fr/content/6-isolants-ecologiques-sous-la-loupe>)

Les isolants thermiques se répartissent en trois familles : **naturels** (faible impact environnemental), **minéraux** (résistants au feu et durables) et **synthétiques** (très performants mais énergivores), (INSA, 2016).

I.1.7.8. Propriétés Thermiques des Isolants

Le tableau suivant détaille les principales caractéristiques thermiques de certains isolants couramment utilisés dans la construction (Source : Izard et Lelong, 2006). Ces

paramètres permettent d'évaluer leur efficacité et leur adaptabilité aux besoins spécifiques des bâtiments :

Tableau 1.2 : Les propriétés thermique de certains isolants (Source : Izard et Lelong, 2006)

Les isolants		λ	C	ρ	ρC	a	b	vt
Minérales	Laine de roche	0.04	25	0.26	7	0.0063	0.5	5.8
	Laine de verre	0.04	12	0.23	3	0.0149	0.3	8.8
	Verre cellulaire	0.05	130	0.23	30	0.0017	1.2	3
Naturels	Laine de chanvre	0.04	25	0.39	10	0.0040	0.6	4.6
	Laine de mouton	0.04	20	0.33	7	0.0061	0.5	5.6
	Panneau de liège	0.04	120	0.39	47	0.0009	1.4	1.2
Synthétique	Polystyrène expansé	0.04	25	0.38	10	0.0041	0.6	4.6
	Polystyrène extrudé	0.03	35	0.33	12	0.0025	0.6	3.6
	Polyuréthane	0.03	35	0.23	8	0.037	0.5	4.4

- **Conductivité thermique (λ)** : Mesure la capacité d'un matériau à limiter les transferts de chaleur, exprimée en $W/m \cdot ^\circ C$.
- **Masse volumique (C)** : Représente la densité du matériau, mesurée en kg/m^3 . Elle influence la légèreté et la maniabilité de l'isolant.
- **Chaleur spécifique (ρ)** : Indique la quantité d'énergie nécessaire pour modifier la température d'un kilogramme de matériau de $1^\circ C$, exprimée en $Wh/kg \cdot ^\circ C$.
- **Effusivité thermique (b)** : Évalue la capacité d'un matériau à absorber ou restituer rapidement la chaleur, mesurée en $J \cdot s^{-1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.
- **Chaleur volumique (ρc)** : Quantifie l'énergie requise pour élever la température d'un mètre cube de matériau de $1^\circ C$, exprimée en $Wh/m^3 \cdot ^\circ C$.
- **Diffusivité thermique (a)** : Caractérise la rapidité avec laquelle la chaleur se propage dans le matériau, mesurée en m^2/s .
- **Vitesse de transfert thermique (VT)** : Indique la vitesse à laquelle la chaleur traverse l'isolant, exprimée en cm/h .

I.1.7.9. Techniques d'Isolation Thermique

L'isolation thermique vise à limiter les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment, contribuant ainsi à un confort thermique durable et à une réduction significative de la consommation énergétique.

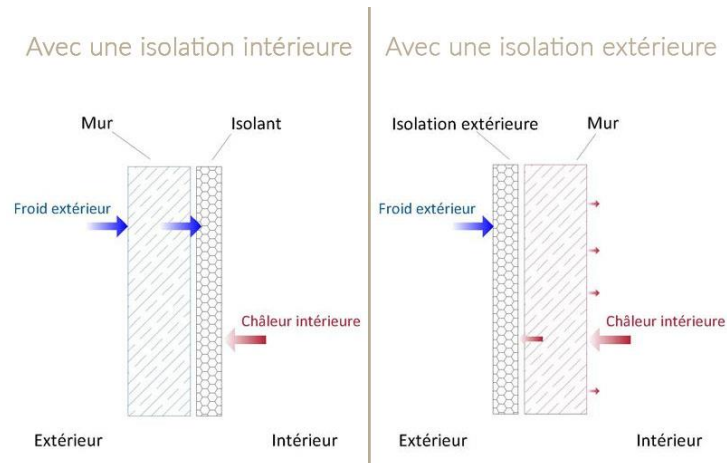


Figure 1.17 : Composition d'une surface opaque –mur- (Source : conseils-thermiques.org/)

Deux méthodes d'isolation existent : **l'isolation par l'extérieur**, plus coûteuse mais plus performante, et **l'isolation par l'intérieur**, moins chère mais réduisant l'inertie thermique et gérant moins bien les ponts thermiques (Jedidi & Benjeddou, 2016).

I.2. L'hygrothermie du bâtiment et son interaction avec les façades

I.2.1. Définition et principes fondamentaux de l'hygrothermie

L'hygrothermie dans le bâtiment désigne l'ensemble des interactions entre la chaleur et l'humidité dans un espace construit. Elle concerne les transferts de chaleur, les variations d'humidité et leurs effets sur le confort intérieur ainsi que sur la performance des matériaux. Une gestion adéquate de l'hygrothermie est essentielle pour assurer un environnement intérieur sain et durable (Malagoni, 2022).

I.2.2. Facteurs influençant l'hygrothermie d'un bâtiment : Les schémas ci-dessous représente les facteurs influençant l'hygrothermie des bâtiments. (Figure 1.18) et (figure 1.19).

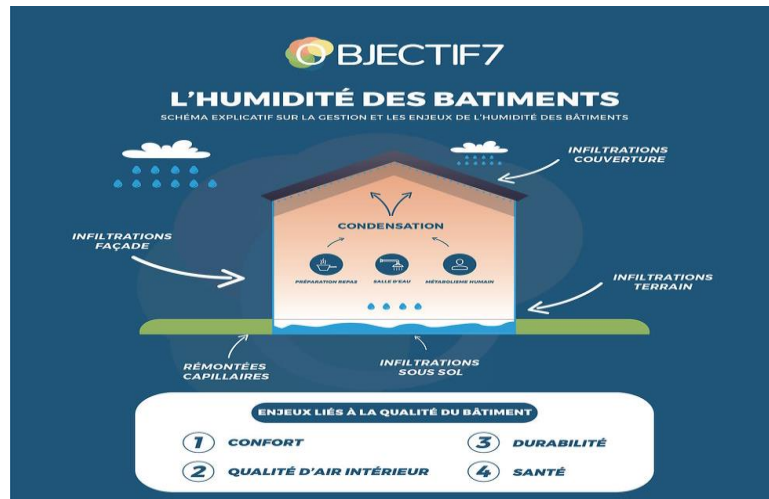


Figure 1.18 : Humidité des bâtiments (Source : www.kampmann.be/)

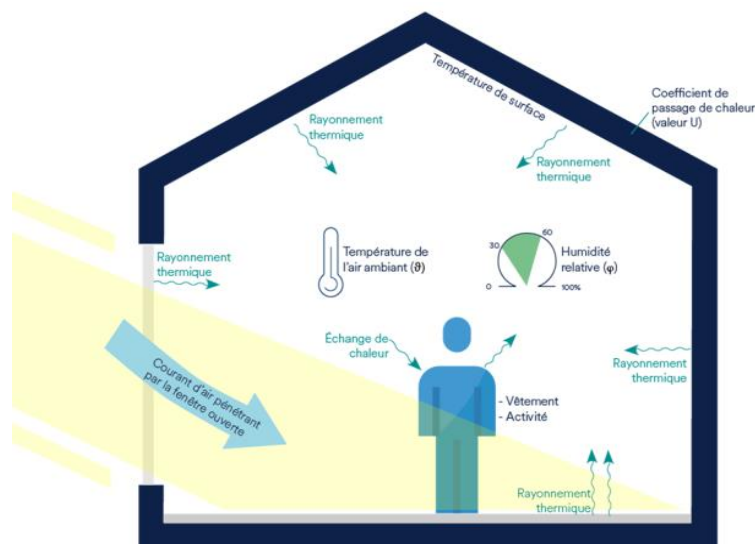


Figure 1.19 : Facteurs influençant la thermique (Source : www.e-education.psu.edu/)

Plusieurs paramètres influencent l'hygrothermie d'un bâtiment, notamment :

- **Les conditions climatiques** : température extérieure, humidité relative, ensoleillement et vents dominants.
- **Les caractéristiques des matériaux** : conductivité thermique, capacité hygroscopique et porosité.

- **L'occupation du bâtiment** : production interne d'humidité par les occupants et leurs activités (respiration, cuisine, douches, etc.)

I.2.3. Importance de la maîtrise de l'hygrothermie pour la durabilité des matériaux : Une gestion adéquate de l'hygrothermie contribue à la pérennité des matériaux et des structures en limitant les phénomènes de dégradation liés à l'humidité, tels que la corrosion des armatures, l'altération des revêtements et la formation de moisissures. Elle permet également d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment en réduisant les besoins en chauffage et en climatisation (Piot, 2009).

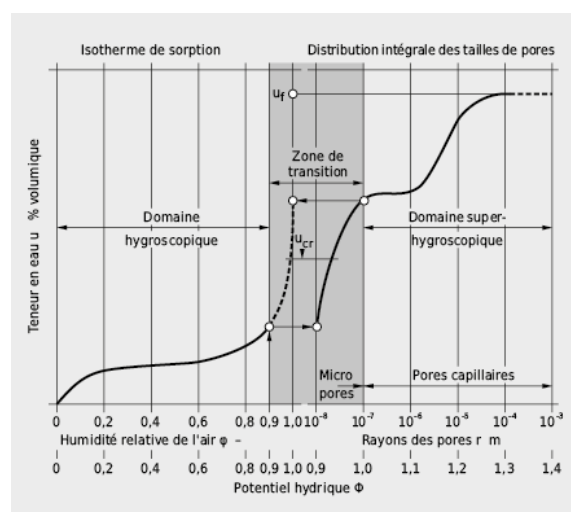


Figure 1.20 : Transport d'humidité et accumulation d'eau dans les matériaux de construction

(Source : <http://enbau-online.ch/bauphysik/fr/>)

- **Domaine hygroscopique** : Absorption d'eau dans les micropores par forces capillaires et forces de Van der Waals.
- **Zone de transition** : Augmentation rapide de l'eau absorbée dans les pores capillaires intermédiaires.
- **Domaine superhygroscopique** : Saturation complète des pores capillaires larges.

I.2.4. Mécanismes de transfert de chaleur et de masse dans les bâtiments

I.2.4.1. Conductivité thermique et résistance thermique des matériaux : définit la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur. Une faible conductivité thermique indique une bonne capacité d'isolation. La résistance thermique, quant à elle, dépend de l'épaisseur et de la conductivité du matériau et joue un rôle clé dans l'isolation des parois et des façades.

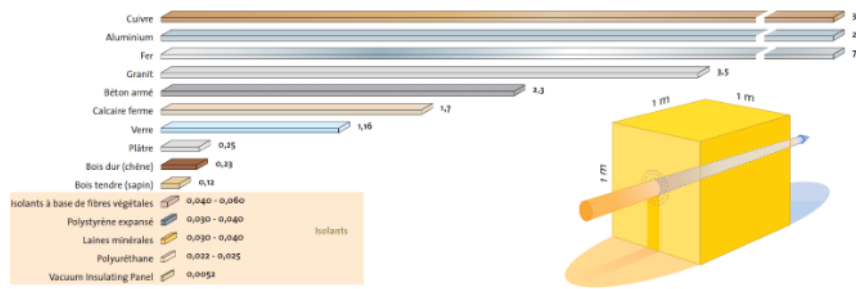


Figure 1.21: La conductivité thermique des matériaux (Source : Saint-Gobain, 2016)

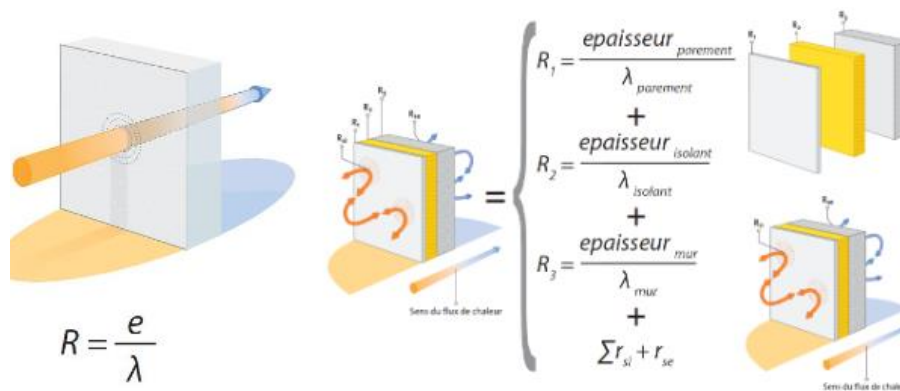


Figure 1.22: La résistance thermique d'une paroi (Source : Saint-Gobain, 2016)

Le schéma illustre la différence de conductivité thermique entre matériaux : les métaux (cuivre, aluminium, fer) conduisent fortement la chaleur, tandis que les isolants (polystyrène, polyuréthane) la conduisent très peu. La résistance thermique est représentée par la longueur des barres, plus elles sont longues, plus la résistance est élevée.

1.2.4.2. Convection et rayonnement au niveau des façades

Les façades sont soumises à des échanges thermiques par :

- **Convection** : transfert de chaleur entre la surface de la façade et l'air ambiant.
- **Rayonnement** : absorption et réflexion du rayonnement solaire et des infrarouges émis par l'environnement urbain.

Une bonne conception des façades permet de limiter les surchauffes en été et les pertes thermiques en hiver.

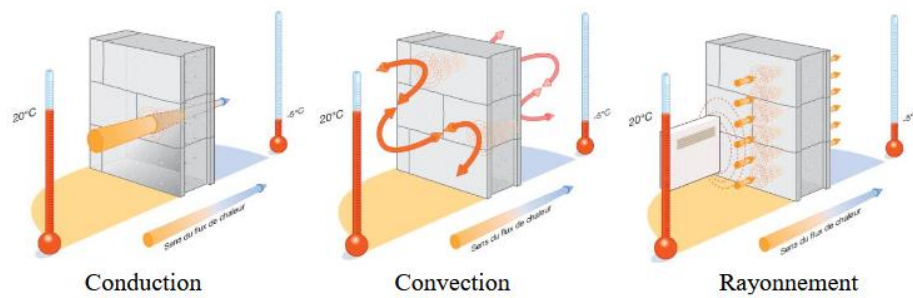


Figure 1.22: les modes de transfert de chaleur à travers une paroi. (Source : Saint-Gobain, 2016)

L'air chaud extérieur rayonne et transmet sa chaleur vers la paroi par rayonnement et conduction, tandis que l'air froid intérieur absorbe cette chaleur, créant des cycles de convection dans les deux espaces. La paroi joue un rôle central en limitant le transfert thermique entre l'intérieur et l'extérieur grâce à ses propriétés isolantes.

I.2.4.3. Transferts de vapeur d'eau à travers l'enveloppe du bâtiment

La vapeur d'eau migre à travers les parois en raison des différences de pression de vapeur entre l'intérieur et l'extérieur. Une mauvaise gestion de ces transferts peut entraîner de la condensation interstitielle, endommageant les matériaux et réduisant leurs performances thermiques.

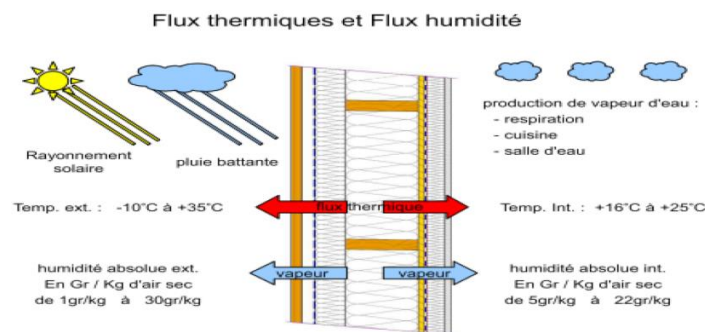


Figure 1.23: Transferts de vapeur d'eau à travers (Source : <https://bet-gaujard.com/>).

Le rayonnement solaire et la pluie influencent la température et l'humidité extérieures, tandis que les activités internes augmentent celles de l'intérieur. La paroi, grâce à ses propriétés isolantes et hygroscopiques, régule les échanges de chaleur et d'humidité entre les deux.

I.2.5. Phénomènes d'humidité

I.2.5.1. Types d'humidité dans un bâtiment :

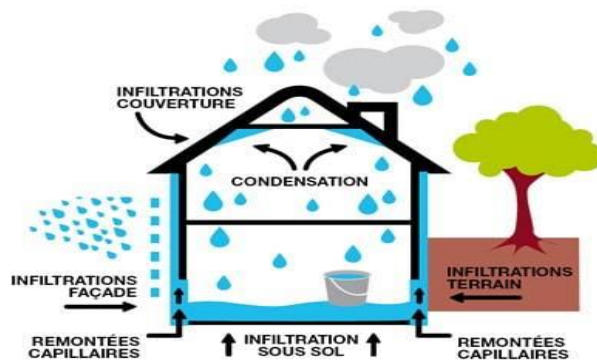


Figure 1.24: Types d'humidité dans un bâtiment (Source : www.belmard-batiment.fr/)

L'humidité dans un bâtiment peut provenir de plusieurs sources :

- **Humidité de construction** : eau résiduelle des matériaux après la mise en œuvre.
- **Humidité ascendante** : migration d'eau depuis le sol par capillarité.
- **Humidité accidentelle** : infiltrations dues à des fuites ou des ruptures de canalisations.
- **Humidité de condensation** : accumulation de vapeur d'eau sur des surfaces froides.

I.2.5.2. Conséquences des pathologies liées à l'humidité sur les façades



Figure 1.25: Altération des revêtements (Source : www.belmard-batiment.fr/).

Les pathologies liées à l'humidité peuvent inclure :

- **Altération des revêtements** : écaillage, cloquage, décollement de peintures et enduits.

- **Affaiblissement des matériaux** : corrosion des armatures, dégradation du béton et des bois.
- **Diminution de la performance thermique** : augmentation des pertes énergétiques et inconfort thermique.

I.3. L'efficacité énergétique des bâtiments

I.3.1. La notion d'énergie : L'énergie est une grandeur physique essentielle qui exprime la capacité d'un système à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il interagit. Elle est soumise à la loi de conservation, selon laquelle l'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre. Dans le domaine du bâtiment, l'énergie joue un rôle crucial pour assurer le chauffage, la climatisation, l'éclairage et le fonctionnement des équipements électriques. (ADEME, 2023)

I.3.2. La consommation énergétique du bâtiment et ses différentes catégories

La consommation énergétique d'un bâtiment peut être classée en plusieurs catégories :

- **Consommations de base** : englobent l'énergie utilisée pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage, les auxiliaires électriques et la production d'eau chaude sanitaire.
- **Consommations spécifiques** : concernent les équipements et appareils utilisés par les occupants (appareils électroménagers, éclairage extérieur, etc.).
- **Consommations liées aux transports** : incluent les ascenseurs, les systèmes de transport internes aux bâtiments et les déplacements des occupants.

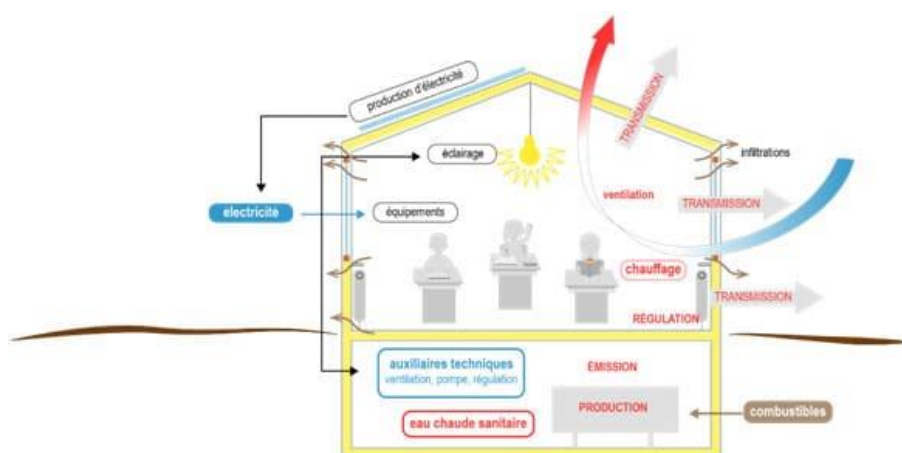


Figure 1.26: Exemple de consommation énergétique (Source : energieplus-lesite.be /)

Le schéma montre le flux énergétique d'un bâtiment : sources (combustibles, électricité), usages (chauffage, ventilation, éclairage, équipements), pertes par transmission et infiltration, ainsi que les systèmes auxiliaires comme la régulation et la production d'eau chaude sanitaire.

I.3.3. La consommation énergétique à l'échelle mondiale et nationale

I.3.3.1. Tendances mondiales en matière de consommation énergétique

La consommation énergétique mondiale a connu une croissance exponentielle au cours des dernières décennies. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2013), la consommation énergétique mondiale a été multipliée par plus de 2,4 entre 1973 et 2015. Cette augmentation est liée à la croissance démographique, au développement économique et à l'urbanisation accrue.

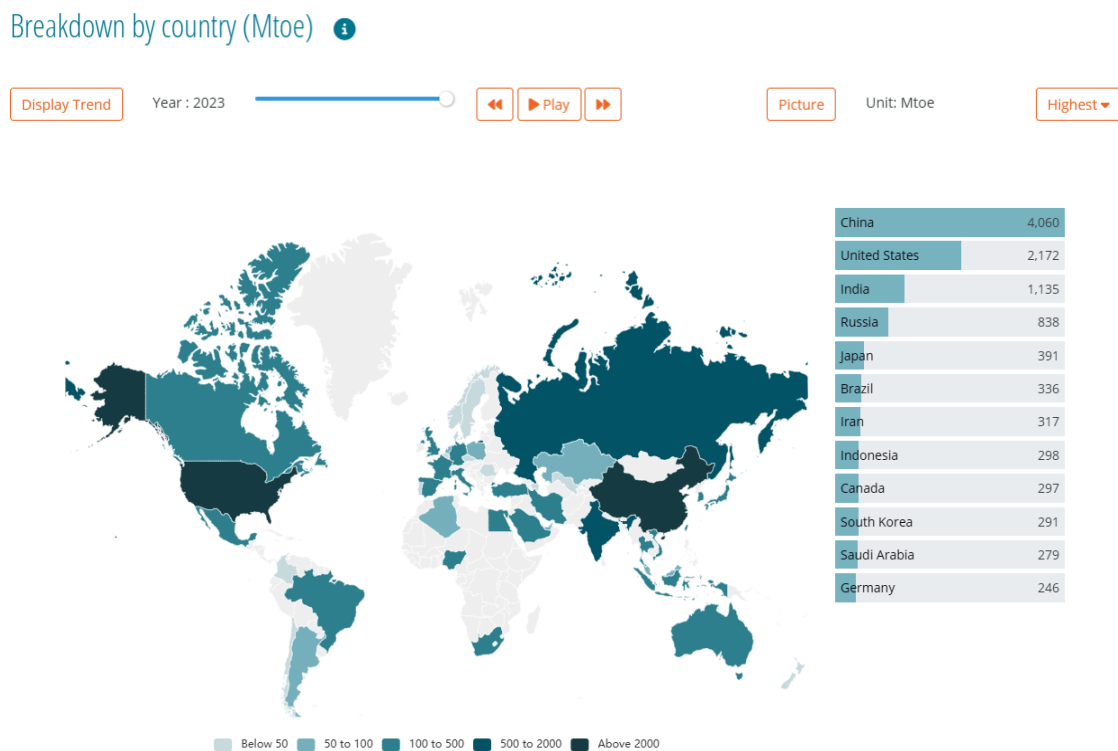


Figure 1.27: La consommation énergétique au niveau mondial en 2023 (Source : The Global Energy Statistical Yearbook4, 2024)

Le schéma de 2023 montre la consommation énergétique mondiale par pays (en Mtoe), avec une carte colorée et un classement dominé par la Chine, les États-Unis et

l'Inde. Il met en évidence les fortes disparités entre régions et souligne les enjeux de transition énergétique.

I.3.3.2. Consommation énergétique du secteur du bâtiment en Algérie

En Algérie, le secteur du bâtiment représente le premier consommateur d'énergie. Selon le CERFE (2021), il a absorbé 43 % de la consommation énergétique finale nationale entre 2010 et 2019, surpassant les secteurs du transport et de l'industrie. Cette consommation est due principalement au chauffage, à la climatisation et à l'éclairage.

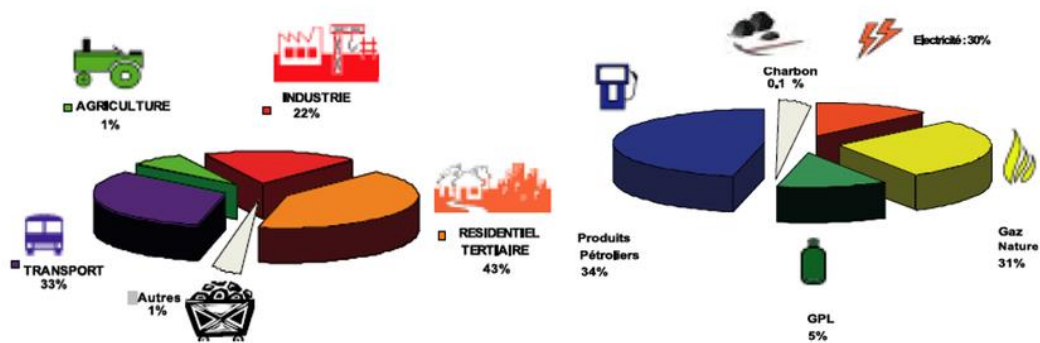


Figure 1.28: Consommation d'énergie en Algérie en 2017 (Source : APRUE 2017)

En 2017, la consommation énergétique en Algérie reposait surtout sur les énergies fossiles, avec une forte demande dans les secteurs résidentiel-tertiaire, transport et industrie, soulignant les défis de diversification énergétique.

I.3.3.3. Contraintes et enjeux énergétiques spécifiques au climat algérien

Le climat algérien, caractérisé par des températures élevées en été et des hivers froids dans certaines régions, impose des défis en matière d'efficacité énergétique. L'utilisation excessive de la climatisation en été et du chauffage en hiver entraîne une forte consommation d'énergie, nécessitant une optimisation des bâtiments pour réduire cette dépendance.

I.3.4. L'efficacité énergétique

I.3.4.1. Définition et importance de l'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique des bâtiments consiste à optimiser la consommation d'énergie en améliorant l'isolation, en utilisant des systèmes efficaces et en adoptant des sources d'énergie renouvelables. Elle permet de réduire les coûts énergétiques, de diminuer l'empreinte carbone et d'améliorer le confort des occupants (ADEME, 2023).

I.3.4.2. Stratégies et solutions pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments

: L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments repose sur trois grandes stratégies : les solutions passives, les solutions actives et la gestion intelligente de l'énergie. Parmi les éléments clés influençant la performance hygrothermique du bâtiment, l'isolation des surfaces opaques et le choix du vitrage jouent un rôle fondamental dans la réduction des déperditions énergétiques et l'optimisation du confort hygrothermique.

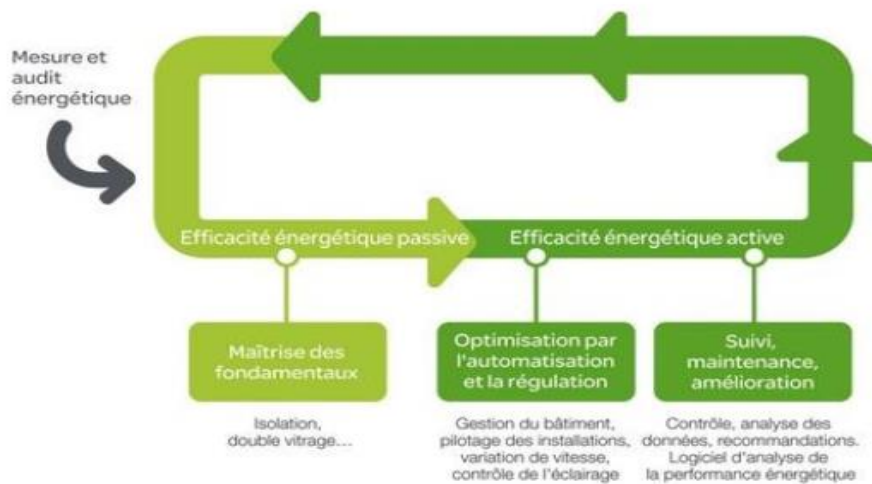


Figure 1.29: Solutions passives et actives de l'efficacité énergétique des bâtiments

(Source : www.schneider-electric.com)

Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence le rôle essentiel de la façade dans la gestion des transferts thermiques et hydriques, ainsi que dans l'efficacité énergétique des bâtiments. Interface entre l'intérieur et l'extérieur, la façade influence directement le confort thermique, la durabilité du bâtiment et sa consommation énergétique. Les propriétés des matériaux (conductivité thermique, perméabilité à la vapeur, etc.) jouent un rôle clé dans ces performances. Une conception optimisée permet de réduire les besoins en chauffage, climatisation et ventilation, contribuant ainsi à une meilleure efficacité énergétique et à une baisse des émissions de gaz à effet de serre. Des solutions innovantes, comme les doubles peaux ventilées ou les façades actives, offrent des opportunités pour améliorer ces performances, mais nécessitent une mise en œuvre rigoureuse pour éviter les pathologies. Ce chapitre souligne l'importance d'une approche intégrée pour concevoir des façades performantes, tout en préparant le terrain pour explorer des innovations techniques dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II :

Le confort hygrothermique et son impact sur l'être humain dans les salles de lecture

Ce chapitre explore le concept de confort hygrothermique, en mettant l'accent sur son importance dans les salles de lecture. Nous aborderons d'abord la définition et les principes fondamentaux du confort hygrothermique, y compris les échanges thermiques entre le corps humain et son environnement, avant d'examiner les paramètres influençant ce confort, qu'ils soient liés à l'individu (métabolisme, habillement) ou à l'environnement (température, humidité, ventilation). Enfin, nous analyserons l'impact spécifique du confort hygrothermique sur le bien-être, la cognition et la performance des utilisateurs dans les salles de lecture, ainsi que les stratégies pour garantir des conditions optimales dans ces espaces dédiés à la concentration et à l'apprentissage.

Introduction

Le confort hygrothermique constitue un élément central dans la conception des espaces intérieurs, particulièrement dans les salles de lecture où il joue un rôle déterminant pour le bien-être des occupants et leur capacité à se concentrer. Ce concept peut être défini comme l'ensemble des conditions thermiques et hygrométriques qui permettent aux individus de ressentir un confort optimal dans un environnement donné. Contrairement au confort thermique, qui se focalise uniquement sur la température, le confort hygrothermique inclut également l'humidité de l'air, un facteur clé influençant à la fois la perception de la chaleur et la qualité de l'air intérieur (Brager, 2001).

Dans les espaces dédiés à la lecture et à l'étude, tels que les bibliothèques et les salles de lecture, le maintien d'un climat intérieur hygrothermique adéquat est essentiel pour favoriser la concentration et la performance cognitive des usagers. Une mauvaise régulation de ces paramètres peut entraîner divers désagréments, notamment une sécheresse excessive de l'air pouvant irriter les voies respiratoires, une humidité trop élevée générant une sensation de lourdeur, ou encore des fluctuations de température perturbant l'attention des lecteurs. Par ailleurs, ces conditions peuvent également affecter la conservation des documents et du mobilier, soulignant ainsi l'importance d'une gestion rigoureuse du climat intérieur (ASHRAE, 2017).

Les recherches récentes menées dans le domaine du confort hygrothermique montrent que la perception du confort varie en fonction de plusieurs facteurs, incluant les paramètres environnementaux (température, humidité, ventilation, matériaux de construction), les caractéristiques physiologiques des individus (métabolisme, habillement) et les interactions entre le corps humain et son environnement immédiat. Dans le cas des salles de lecture, où l'activité physique est principalement statique, les usagers sont plus sensibles aux variations de température et d'humidité, ce qui renforce la nécessité de mettre en œuvre des stratégies de régulation adaptées (Humphreys & Nicol, 2018).

Ce chapitre analyse le confort hygrothermique, ses principes, les facteurs qui l'influencent, son impact sur le bien-être en salle de lecture, et propose des solutions pour optimiser le confort et l'efficacité énergétique des bâtiments.

II.1. Le confort hygrothermique

II.1.1. Définition et principes du confort hygrothermique

Le confort hygrothermique se définit comme l'ensemble des conditions de température et d'humidité permettant d'assurer le bien-être des occupants dans un espace intérieur (Fanger, 1970). Cette définition repose sur une interaction complexe entre les paramètres environnementaux (température, humidité, ventilation) et les caractéristiques individuelles (métabolisme, habillement). Selon Fanger, cet équilibre est atteint lorsque les individus ne ressentent ni froid ni chaleur excessive, permettant ainsi une activité mentale et physique optimale. Des modèles adaptatifs, tels que ceux proposés par Humphreys et Nicol (2002), complètent cette approche en mettant l'accent sur la capacité des individus à s'adapter aux variations climatiques.

L'image (figure 2-1) compare deux situations dans une maison ayant une température ambiante de 20 °C

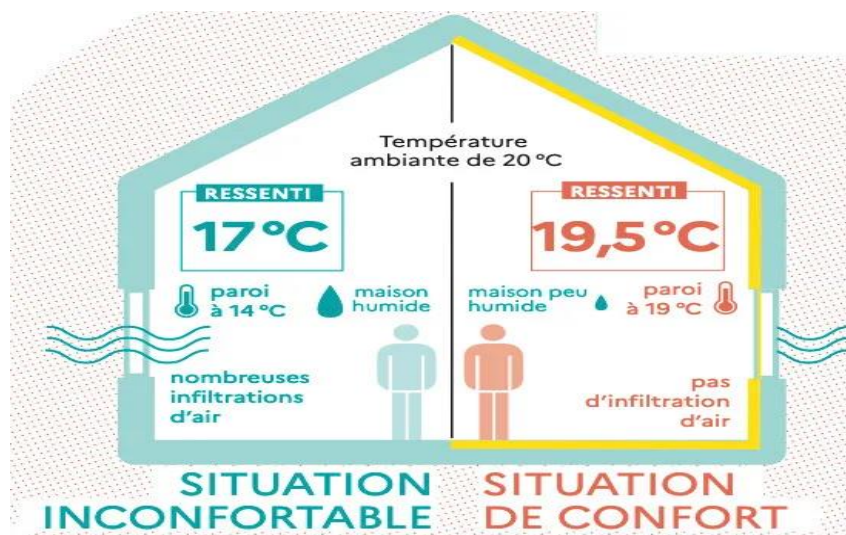


Figure 2.1: Confort hygrothermique (Source : www.notretemps.com/vie-pratique/)

- **Situation inconfortable :** Température ambiante de 20°C, mais paroi froide (14°C), humidité élevée et infiltrations d'air, ce qui fait ressentir une température effective de 17°C.
- **Situation de confort :** Même température ambiante (20°C), mais paroi chaude (19°C), faible humidité et absence d'infiltrations, ce qui fait ressentir une température effective de 19,5°C.

Le confort dépend non seulement de la température ambiante, mais aussi des conditions de l'environnement (humidité, infiltration d'air, température des surfaces).

II.1.2. Facteurs environnementaux influençant le confort hygrothermique

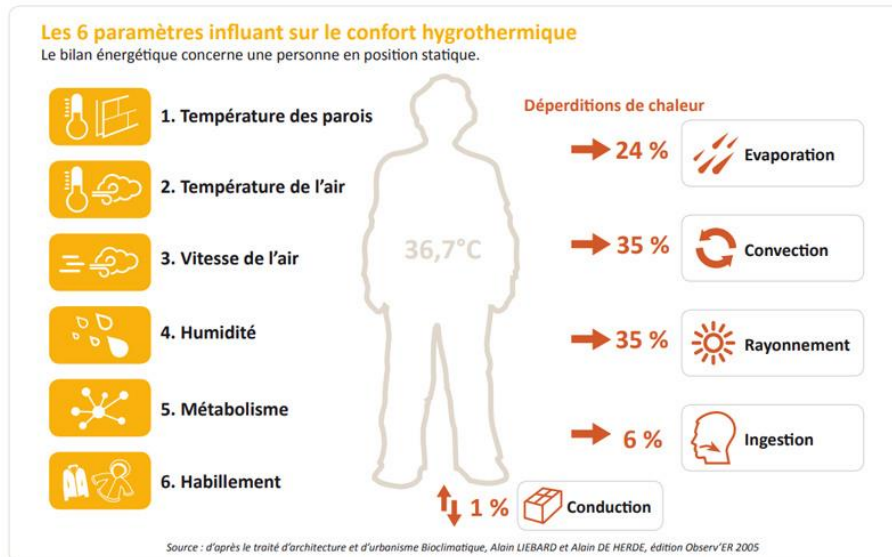


Figure 2.2: Facteurs environnementaux influençant le confort hygrothermique

(Source : www.materiaux-naturels.fr/blog/87-confort-thermique)

II.1.2.1. Température ambiante de l'air et la température des parois

La **température ambiante** de l'air est le paramètre le plus influant sur la sensation thermique de l'habitant, appelée aussi température résultante sèche, car elle est mesurée sans prise en compte de l'humidité contenue dans l'air.

La **température des parois (T_p)** représente la température moyenne de toutes les parois internes. Ce paramètre influe sur la température opérative ainsi que sur le confort tactile par l'effet de la paroi froide ou la paroi chaude.

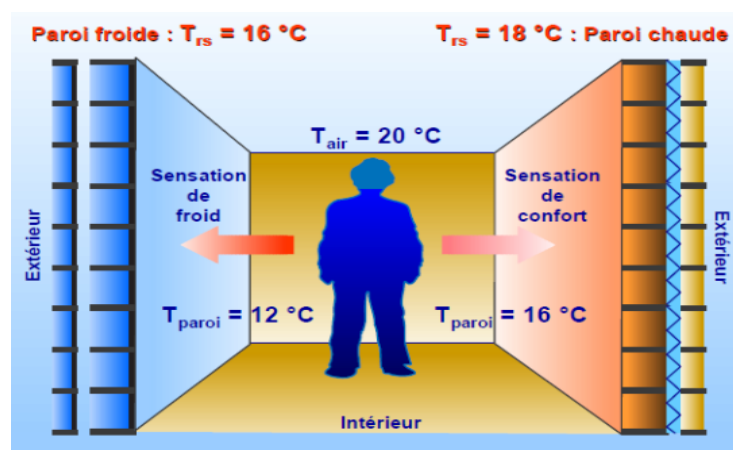


Figure 2.3: L'influence de la température de l'air et des parois sur la température de confort. (Source: <https://home-expert.fr/le-confort-hygrothermique/>)

II.1.2.2. Humidité relative (HR)

L'humidité relative indique la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport à sa capacité maximale. À 60 % d'humidité, une température de 20 °C peut être ressentie comme 30 °C. Une augmentation de 10 % d'humidité élève significativement la température perçue, gênant la régulation thermique naturelle du corps (Balandraux, 2007).

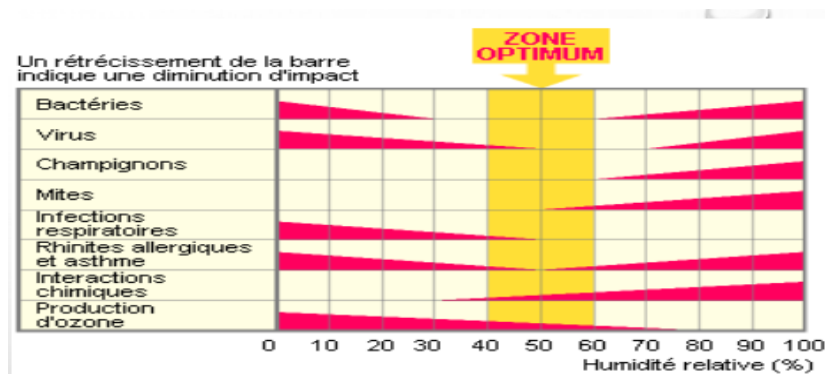


Figure 2.4: Le taux d'humidité relative (Source : <https://home-expert.fr/>)

La plage du taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique se situe entre 40 et 60 %. Les problèmes liés à l'humidité commencent hors de la plage d'humidité (de 40 à 60 %) avec deux manières :

- Un taux d'humidité inférieur à 30 %
- De hauts niveaux d'humidité (au-delà 70 % hr)

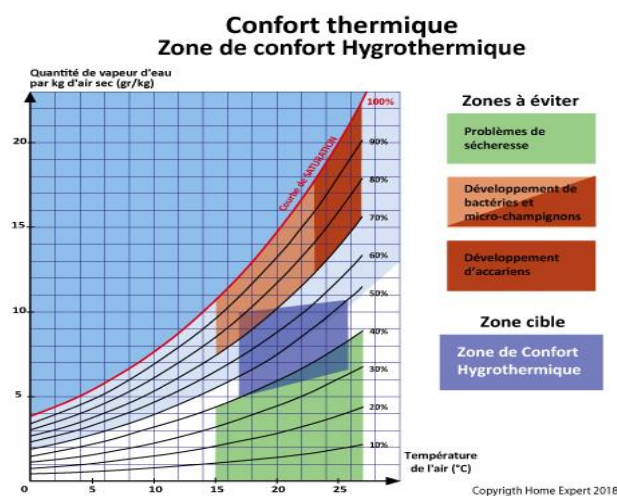


Figure 2.5: Le taux d'humidité relative idéal en fonction de la température ambiante.

(Source : <https://home-expert.fr/>)

Le schéma illustre la zone de confort hygrothermique, qui représente les conditions optimales de température et d'humidité pour le bien-être humain. La courbe rouge (Courbe de saturation) montre l'équilibre entre température et humidité relative, tandis que les zones colorées indiquent des conditions à éviter :

- **Zones vertes** : Problèmes de sécheresse (humidité trop basse).
- **Zones orange** : Développement de bactéries et microchampignons (humidité élevée).
- **Zone bleue** : Zone cible de confort hygrothermique, où la température et l'humidité sont équilibrées pour un confort optimal.

II.1.2.3. La vitesse de l'air

La vitesse de l'air (v_{air}) est un paramètre qui influe sur les échanges de la chaleur par convection et augmente l'évaporation de la surface de la peau, elle est mesurée en (m/s). A partir de la vitesse de 0,2 m/s, qu'un courant d'air peut être ressenti par un individu.

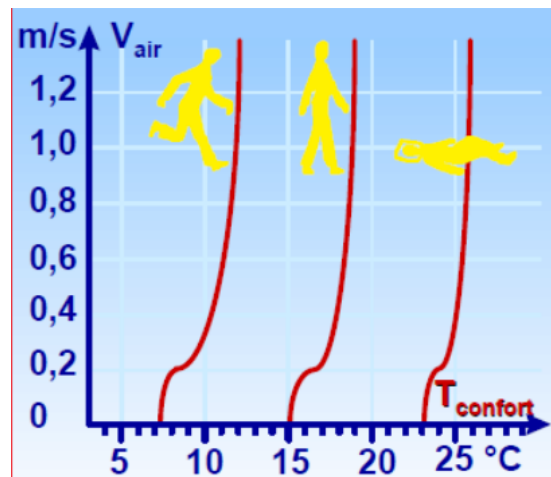


Figure 2.4: Température de confort pour différentes vitesses de l'air et un habillement moyen
(Source :Fanger,1970)

La figure met en relation la vitesse de l'air et la sensation de confort. Les courbes représentent les températures de confort déterminées statistiquement pour différents niveaux d'activité, une tenue d'intérieur d'hiver et une humidité relative de 50 %.

II.1.3. Les paramètres du confort hygrothermique liés à l'individu

II.1.3.1. Le métabolisme

Le métabolisme correspond à la production de chaleur interne du corps humain, essentielle pour maintenir une température corporelle stable autour de 36,8 °C. Il reflète l'effort physique lié à une activité, rapporté à la surface corporelle, et s'exprime en watts

par mètre carré (W/m^2).

L'homme étant un être homéotherme, sa température interne doit rester constante, généralement entre $36,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $37,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ au repos, avec un inconfort ressenti en dessous de $36,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou au-dessus de $37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lors d'une activité physique, cette plage se déplace légèrement, se situant entre $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

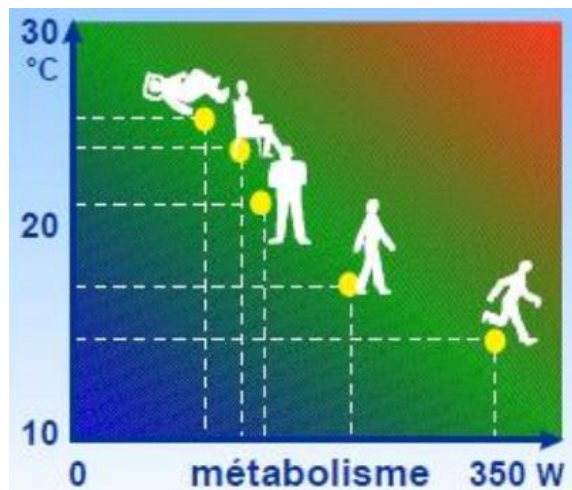


Figure 2.5: Température de confort pour différentes activités (Source : Liébard et De Herde, 2005)

Le métabolisme humain varie selon l'âge, le sexe et l'activité physique. Dans une salle de lecture, où l'activité physique est réduite, la sensation de froid peut être plus marquée qu'en milieu dynamique (Parsons, 2014). Un ajustement précis des paramètres hygrothermiques est donc nécessaire pour maintenir un confort optimal.

II.1.3.2. L'habillement

L'habillement, ou isolation vestimentaire, représente une résistance thermique influençant les échanges de chaleur entre la peau et l'environnement. Exprimée en "Clo" ($1\text{ Clo} = 0,155\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$), cette résistance varie selon les vêtements portés. La température de la peau d'une personne habillée se maintient généralement entre $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $34,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec un inconfort apparaissant en dessous de $32,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou au-delà de $34,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Mazari, 2012 ; Lavoye et al., 2015).

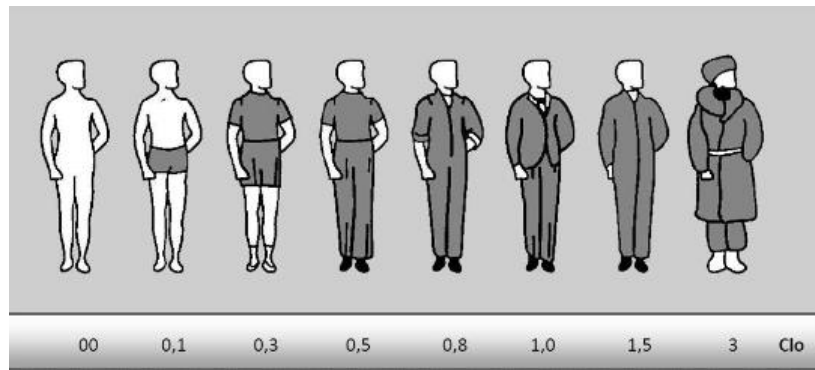


Figure 2.5: Valeurs de l'isolement vestimentaire de différents vêtements

(Source : Mazari, 2012)

L'habillement joue un rôle clé dans la régulation thermique individuelle. En fonction des saisons et des conditions climatiques, les occupants adaptent leur tenue vestimentaire pour maintenir leur bien-être thermique (Holopainen, 2012). Dans les espaces publics comme les salles de lecture, un contrôle stable de la température intérieure permet de limiter les besoins d'adaptation vestimentaire.

II.1.4. L'équilibre thermique de l'occupant avec le bâtiment et son environnement

Le choix inapproprié des éléments de l'enveloppe peut créer des conditions thermiques inconfortables, avec des pertes et des gains thermiques selon les saisons. L'intégration harmonieuse d'un bâtiment dans son environnement influence non seulement les conditions thermiques, mais aussi le comportement des occupants, tels que l'ouverture des fenêtres ou l'utilisation des équipements.

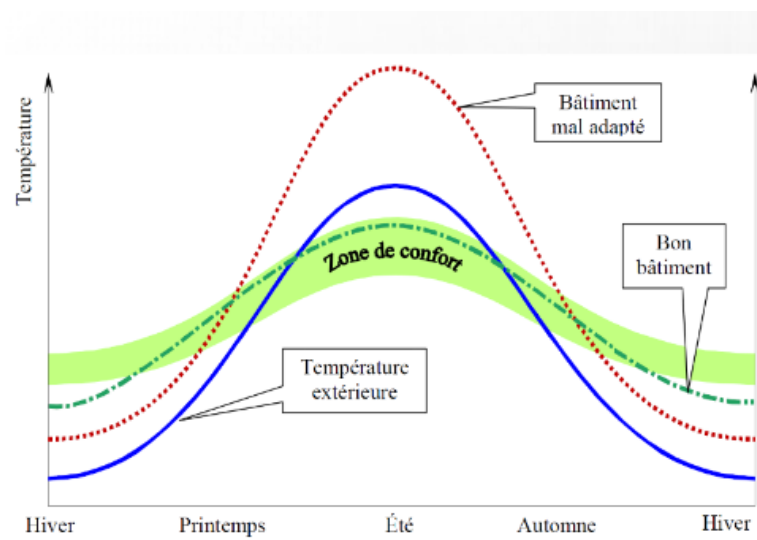


Figure 2.7: L'évolution des températures dans deux bâtiments au cours de l'année

Sans chauffage et sans climatisation (Source : Roulet, 2004)

La figure 2.8 présente les échanges de chaleurs effectués entre le corps et l'ambiance.

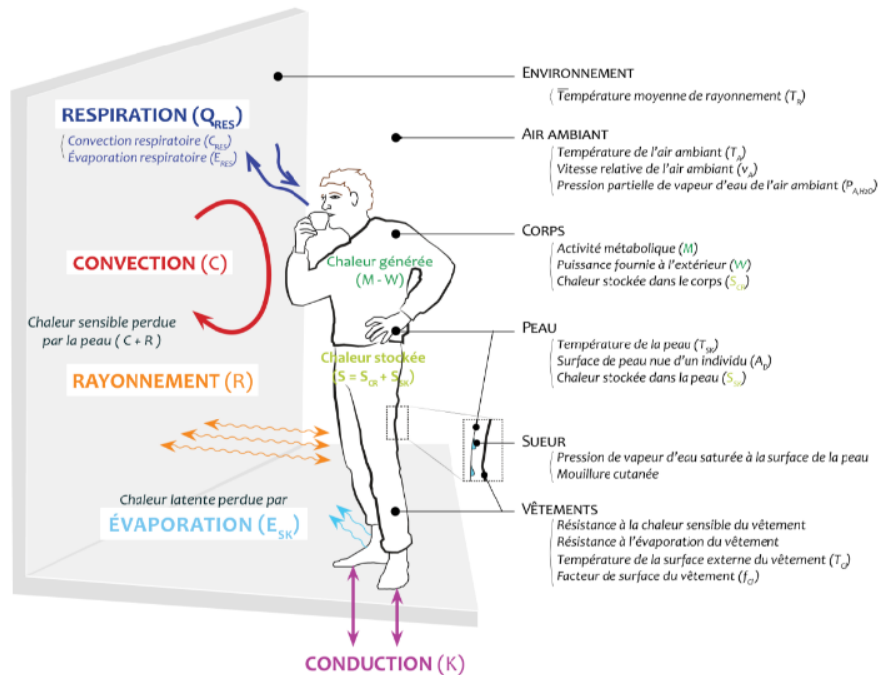


Figure 2.8: Les échanges thermiques entre le corps et son environnement

(Source : Batier, 2016)

Dans tout type d'environnement thermique, le corps humain échange de la chaleur avec son milieu extérieur par deux voies principales : la peau et la respiration (Mazari, 2012). Ces transferts thermiques impliquent des mécanismes complexes.

Au niveau de la peau, la chaleur est dissipée de plusieurs manières : par convection, conduction, rayonnement et évaporation de la transpiration. Le flux thermique total à la surface cutanée (Q_{SK}) résulte donc de la somme de ces quatre processus :

$$Q_{SK} = C + R + K + E_{SK}$$

Où chaque terme correspond respectivement aux échanges par convection (C), rayonnement (R), conduction (K) et évaporation (E_{SK}).

Par ailleurs, une partie de la chaleur est aussi échangée par la respiration. Ces échanges respiratoires (Q_{RES}) se produisent eux aussi sous deux formes : la convection de l'air expiré (C_{RES}) et l'évaporation de l'humidité respiratoire (E_{RES}). Leur relation est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{RES} = C_{RES} + E_{RES}$$

Cependant, d'après Batier (2016), les pertes thermiques liées à la respiration sont bien moins significatives que celles provenant de la surface corporelle.

II.2. Impact du confort hygrothermique sur le bien-être et la cognition

II.2.1. Effets psychologiques et sensoriels du confort

Un environnement hygrothermique bien régulé influence directement la perception sensorielle et le bien-être psychologique des usagers. Une température inadaptée peut entraîner de la fatigue, une baisse de vigilance et un inconfort général (Pellerin & Candas, 2003). De même, une humidité mal contrôlée peut provoquer des irritations respiratoires ou un sentiment d'oppression (Mishra & Ramgopal, 2013).

II.2.2. Études et modèles d'adaptation comportementale

Les modèles d'adaptation comportementale, tels que ceux développés par Fanger (1970) ou Nicol et Humphreys (2002), démontrent que les individus ajustent leur environnement (fenêtres, vêtements, ventilation) pour maintenir leur confort thermique et hydrique. Dans leur environnement, où ces ajustements sont souvent limités, une régulation optimisée du climat intérieur est essentielle.

II.2.3. Les approches du confort

Dans la littérature scientifique, on trouve que les chercheurs ont élaboré plusieurs indices afin d'évaluer le niveau du confort thermique des occupants. Le (tableau 2.1) montre quelques indices liés au confort thermique.

Tableau 2.1 : Les indices liés au confort thermique

(Source : Jedidi et Benjeddou, 2016)

Indice	Auteur
Température opérative (Top)	(Winslow, Herrington et Gagge 1937)
Rapport de l'acceptation thermique (TAR)	(Robinson, Turrell et Gerking 1945)
Indice du stress thermique (HSI)	(Belding et Hatch 1955)
Vote moyen prévu (PMV) et PPD	(Fanger 1970)
Température équivalente physiologique (PET)	(Höppe 1999)

Deux perspectives complémentaires : On peut distinguer deux approches principales pour évaluer le confort thermique : **l'approche analytique** (ou statique) et

l'approche adaptative. Ces méthodes, bien que différentes dans leurs principes, se complètent pour offrir une vision globale.

II.2.3.1. L'approche analytique (statique)

Cette méthode repose sur des études en laboratoire, notamment dans des chambres climatiques, où les conditions environnementales sont strictement contrôlées.

Elle se concentre sur les aspects physiques et physiologiques, en analysant les échanges thermiques entre le corps humain et son environnement.

➤ Les indices PMV et PPD

Tableau 2.2 : La sensation thermique exprimée selon l'échelle de l'ASHRAE

(Source : Jedidi et Benjeddou, 2016)

L'échelle de l'ASHRAE	Sensation thermique
+3	Chaud
+2	Tiède
+1	Légèrement tiède
0	Neutre
-1	Légèrement frais
-2	Frais
-3	Froid

- **PMV (Predicted Mean Vote) :** Indice développé par Fanger en 1970 pour mesurer la sensation thermique moyenne ressentie par un groupe de personnes. Il utilise une échelle allant de -3 (froid extrême) à +3 (chaud extrême), avec une valeur neutre (0) correspondant à un confort idéal.
- **PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) :** Complément du PMV, cet indice quantifie le pourcentage de personnes insatisfaites, même lorsque le PMV est égal à 0 (environ 5 %).

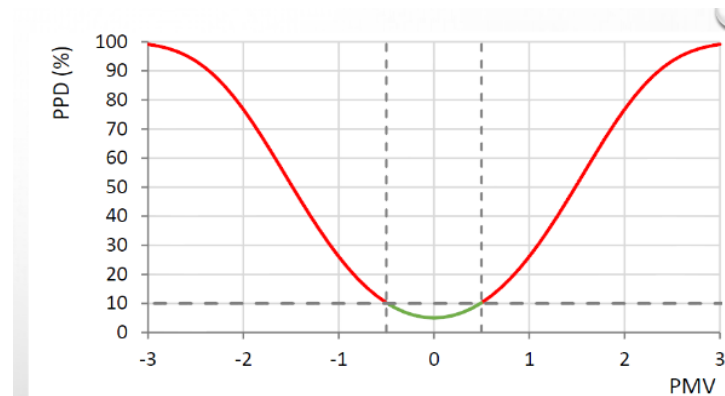


Figure 2.8: La répartition du PPD en fonction du PMV (Source : Batier, 2016)

➤ **PMV/PPD**

- Le PMV égal à 0 exprime une sensation idéale du confort thermique, il y a toujours un pourcentage de 5 % des personnes

Insatisfaites par rapport à l'environnement thermique comme le démontre l'axe du PPD.

- Pour ramener le PPD à une valeur maximale de 10 % (ce qui est généralement l'objectif à atteindre dans un bâtiment), le PMV doit se situer entre -0,5 et + 0,5.

- **Limites de l'approche analytique** : Bien qu'elle soit efficace dans des environnements stables et contrôlés, cette méthode montre ses limites dans des conditions réelles où les paramètres varient constamment. Elle ne prend pas en compte les comportements humains ni les adaptations individuelles.

II.2.3.2. L'approche adaptative

- **Définition et principes** : L'approche adaptative, à la différence de l'approche analytique, étudie les ajustements comportementaux, physiologiques et psychologiques des occupants face aux variations climatiques, en s'appuyant sur des enquêtes de terrain pour comprendre comment ils retrouvent leur confort.
- **Mécanismes d'adaptation** : Face à l'inconfort, les individus adoptent des comportements adaptatifs tels que modifier leur habillement, ouvrir des fenêtres ou utiliser des ventilateurs et chauffages. Ces ajustements incluent aussi des réactions psychologiques, influencées par l'habitude et la perception subjective du climat extérieur.

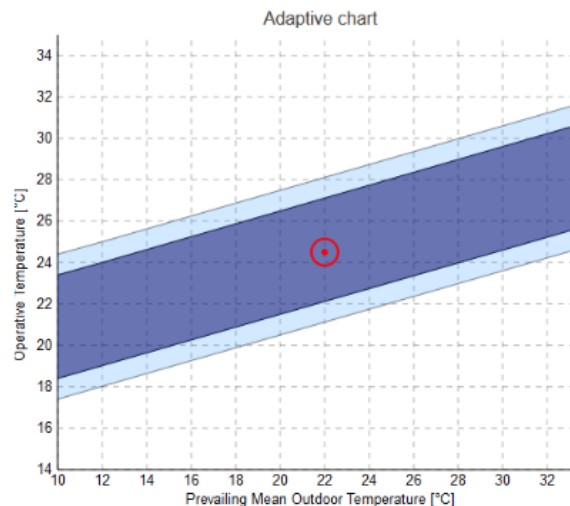


Figure 2.9: Diagramme du confort thermique adaptatif selon la norme ASHRAE

(Source : Auteur, 2017 - tiré de : www.comfort.cbe.berkeley.edu)

- **Le modèle adaptatif selon la norme ASHRAE 55-2017 :** Ce modèle établit un diagramme liant la température extérieure à la température intérieure perçue, avec deux zones de confort : 80 % de satisfaction en zone claire et 90 % en zone foncée.

- **Trois processus d'adaptation :** Selon De Dear et al. (1997), l'adaptation thermique repose sur trois mécanismes interconnectés :

1. **Adaptation comportementale :** Ajustements pratiques (vêtements, ouvertures, etc.).
2. **Adaptation physiologique :** Réponses corporelles naturelles (transpiration, régulation de la température corporelle).
3. **Adaptation psychologique :** Perception influencée par l'expérience et le contexte.

I.2.4. Complémentarité des deux approches

L'approche analytique étudie le confort thermique de manière physique et physiologique dans des conditions stationnaires, tandis que l'approche adaptative intègre les comportements, la psychologie et l'environnement, offrant une vision plus réaliste. Leur complémentarité améliore la compréhension des besoins en confort hygrothermique.

II.3. Les salles de lecture et le confort hygrothermique

II.3.1. Définition et caractéristiques des salles de lecture

Les salles de lecture sont des espaces spécifiques destinés à la consultation, à l'étude et à l'appropriation du savoir écrit. Historiquement, elles accompagnent l'évolution des bibliothèques, en répondant à un double objectif : permettre l'accès direct aux documents et offrir un cadre propice à la concentration intellectuelle, et elle sert d'interface entre le savoir et l'usager, incarnée par l'architecture qui devient support de médiation (Failla, 2015).





Leur rôle s'est étendu avec la démocratisation de la lecture publique : elles servent aujourd'hui également d'espaces de socialisation et d'accueil des différents types de lecteurs, du chercheur au lecteur amateur.

II.3.2. Évolution du concept de salle de lecture

Des scriptoria médiévaux aux bibliothèques ouvertes du XIX^e siècle, l'espace de lecture passe d'une fonction élitiste à un accès public élargi, le (tableau 2.3) résume l'évolution de ces espaces

Tableau 2.3 : Évolution du concept de salle de lecture

(Source : Vandermarcq, 2008 ; version adaptée par l'auteur, 2025)

Période	Figure	Fonction principale	Fonction secondaire
Moyen Âge		Consultation érudite	Conservation du savoir
Renaissance		Accès plus large aux ouvrages	Diffusion culturelle
XIX ^e siècle		Lecture publique démocratisée	Socialisation intellectuelle
XXI ^e siècles		Espace de lecture + espace de vie culturelle	Espaces de rencontre et de coworking

À l'origine, les salles de lecture, comme les scriptoria médiévaux, étaient des

espaces sacrés réservés aux érudits religieux, centrés sur la conservation et la copie des manuscrits (Vandermarcq, 2008).

Avec la Renaissance et l'essor de l'imprimerie au XVe siècle, l'accès aux ouvrages s'élargit progressivement, même s'il reste encore limité aux élites.

Le XIX^e siècle marque un véritable tournant : la salle de lecture devient un espace public, symbole de démocratisation du savoir, favorisant la lecture libre et silencieuse (Vandermarcq, 2008 ; Battles, 2003).

Aujourd'hui, à l'ère du numérique, les salles de lecture évoluent en espaces hybrides, combinant livres, technologies et nouveaux usages sociaux.

II.3.3. La naissance d'un espace bâti destiné à la lecture

La Bibliothèque Sainte-Geneviève (1851), réalisée par Henri Labrouste, marque une révolution dans l'architecture des salles de lecture. Labrouste introduit l'usage de la structure métallique et de grandes baies vitrées, créant une nef ouverte, lumineuse et dégagée, loin des bibliothèques sombres et cloisonnées d'autrefois (Bertrand, 2016 ; Middleton, 2005).

À travers cette conception, il affirme une nouvelle vision : faire de la salle de lecture un espace de partage du savoir, ouvert et accueillant. Cette approche influencera durablement l'architecture des bibliothèques modernes (Yonnet, 2000).

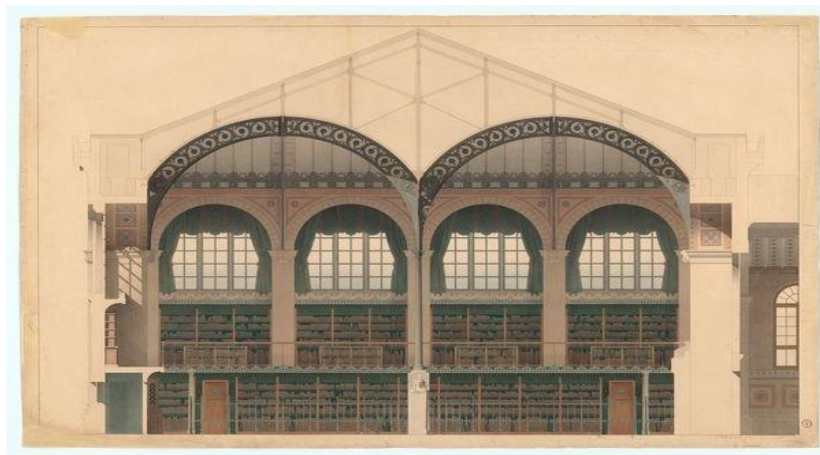


Figure 2.10: Coupe transversale de la salle de lecture de la Bibliothèque Sainte-Geneviève

(Source : www.citedelarchitecture.fr)

La coupe transversale de la salle de lecture de la Bibliothèque Sainte-Geneviève montre comment la lumière naturelle, la ventilation naturelle, la structure métallique et

les matériaux en pierre contribuent à un confort thermique et hygrothermique optimal. Ces éléments favorisent la régulation de la température, réduisent la chaleur artificielle et assurent une circulation d'air efficace, créant ainsi un environnement agréable pour la lecture.

II.3.4. Typologies de salles de lecture à travers le monde

Les salles de lecture adoptent des formes diverses selon les époques, les cultures et les besoins des usagers. Quelques exemples emblématiques : (figure 2.11), (figure 2.12) et (figure 2.13).

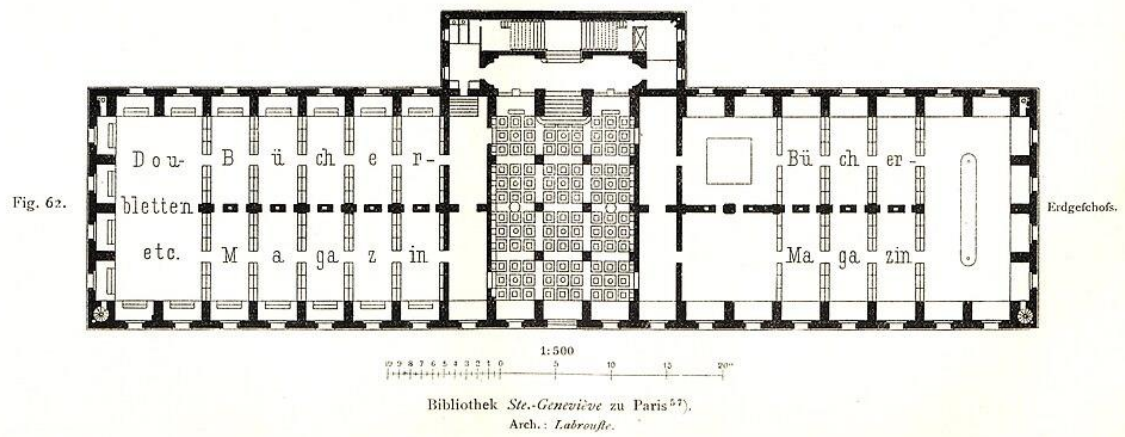


Figure 2.11: Plan RDC de la salle de lecture de la Bibliothèque Sainte-Geneviève
(Source: Bibliothek_Sainte-Genevi_ground_floor_plan.jpg)

Bibliothèque Sainte-Geneviève (Paris, France) : salle longue, voûtée, baignée de lumière naturelle grâce aux grandes baies vitrées, utilisant une structure métallique innovante (Bertrand, 2016).



Figure 2.12: Salle de lecture de la Bibliothèque Alexandrie
(Source : depositphotos.com/fr/)

Bibliothèque Alexandrina (Alexandrie, Égypte) : immense salle circulaire en pente douce, éclairée par la lumière naturelle filtrée à travers une toiture inclinée (Snøhetta Architects, 2002).



Figure 2.13: Salle de lecture de la Bibliothèque nationale de Chine

(Source : beautifullibraries.wordpress.com/)

Bibliothèque nationale de Chine (Pékin) : espaces monumentaux, mélange d'architecture traditionnelle et moderne, grande modularité intérieure pour lecture individuelle et en groupe (Xu, 2008).

II.3.5. Évolution spatiale des bâtiments de salles de lecture en Algérie

L'évolution des salles de lecture en Algérie reflète les mutations sociales, technologiques et architecturales du pays. Jusqu'à la fin du XX^e siècle, les bibliothèques algériennes présentaient généralement des plans rigides : de grands espaces cloisonnés, peu de lumière naturelle, et un accès limité principalement réservé aux étudiants ou aux chercheurs. L'architecture privilégiait la conservation des ouvrages plutôt que le confort de lecture des usagers (Mebarki, 2014).

Depuis les années 2000, sous l'effet des politiques de modernisation culturelle et éducative, on observe une transformation profonde. Les bibliothèques récentes, notamment les médiathèques régionales, intègrent :

- Une plus grande ouverture à la lumière naturelle : façades vitrées, patios intérieurs, toitures filtrantes pour limiter l'éclairage artificiel ;
- Une meilleure accessibilité : accès PMR (Personnes à Mobilité Réduite), aménagements ergonomiques, circulation fluide entre les espaces

- Une adaptabilité fonctionnelle : salles de lecture flexibles, cloisons amovibles, espaces modulables pour accueillir conférences, ateliers ou expositions.

II.3.6. Programmation architecturale des salles de lecture

Selon Failla (2015), la programmation architecturale contemporaine des salles de lecture évolue autour de trois grands principes :

- **Diversification des espaces** : La salle de lecture n'est plus un espace homogène. Elle se fragmente en plusieurs zones spécialisées :
 - Espaces silencieux pour la lecture individuelle,
 - Espaces collaboratifs pour le travail de groupe,
 - Zones multimédias intégrant ordinateurs et supports numériques,
 - Espaces de détente favorisant la lecture informelle.
 - **Accessibilité et modularité** : Failla insiste sur l'importance d'une architecture flexible et inclusive :
 - Les parcours sont pensés sans obstacles,
 - Les espaces peuvent être reconfigurés facilement pour accueillir des événements variés (expositions, conférences, ateliers).
- Cette adaptabilité est nécessaire pour suivre les évolutions rapides des usages.
- **Intégration des technologies numériques** : La salle de lecture contemporaine doit intégrer pleinement les outils numériques :
 - Bornes de consultation,
 - Wi-Fi généralisé,
 - Espaces équipés pour la lecture de supports électroniques (e-books, tablettes).

L'architecture doit ainsi anticiper les besoins futurs, en laissant la place à l'innovation technologique, tout en préservant le confort physique et psychologique des usagers.

II.3.7. Les salles de lecture et le confort hygrothermique

II.3.7.1. Température ambiante stable

Dans une salle de lecture, il est crucial de maintenir une température intérieure autour de 22°C pour assurer un confort thermique optimal.

Selon Filliard (2006), une température trop basse induit une sensation d'inconfort et nuit à la capacité de concentration, tandis qu'une température trop élevée peut générer

somnolence, baisse de vigilance et agacement.

De plus, Pignatta (2014) souligne que les bâtiments éducatifs et culturels, comme les bibliothèques, nécessitent une régulation thermique fine pour éviter des fluctuations de température, qui perturbent l'équilibre thermique corporel des usagers et diminuent leur productivité.

Il est aussi recommandé que cette température soit légèrement variable selon les saisons (+/- 2°C), afin de maintenir un confort adaptatif sans recourir à une climatisation énergivore.

II.3.7.2. Humidité relative maîtrisée

La maîtrise de l'humidité intérieure est également un facteur déterminant pour le confort hygrothermique des lecteurs. Córdoba (2015) indique que le taux d'humidité doit être compris entre 40 % et 60 %, ce qui permet de prévenir :

L'air trop sec (en dessous de 40 %) : cause d'irritations oculaires, de sécheresse de la peau, d'inconfort respiratoire et de fatigue prématurée.

L'air trop humide (au-dessus de 60 %) : ressenti comme lourd, augmentant la sensation de chaleur étouffante, et pouvant favoriser la prolifération de moisissures ou d'acariens, ce qui altère la qualité de l'air intérieur.

Li et al. (2018) précisent que la bonne gestion de l'humidité contribue non seulement au bien-être physiologique des utilisateurs, mais aussi à la protection des ouvrages (livres, manuscrits), très sensibles aux variations hygrométriques.

Dans ce cadre, les systèmes de ventilation naturelle couplés à une régulation mécanique sont encouragés, pour atteindre cet équilibre sans excès d'énergie.



Figure 2.13: Température et humidité relative agréable dans une salle de lecture

(Source : <https://temperatureideale.fr/>)

II.3.7.3. Impact du confort hygrothermique dans les salles de lecture

Le confort hygrothermique, qui regroupe à la fois les conditions de température et d'humidité, est essentiel dans une salle de lecture car il influence directement le comportement et la performance cognitive des usagers.

Un environnement inconfortable, qu'il soit trop chaud, trop froid, trop sec ou trop humide, peut entraîner une baisse de la concentration, une augmentation de la fatigue et une diminution du temps passé à lire ou à travailler sur place (Dujol, 2020 ; Frontczak et al., 2012).

Des études montrent que :

- Une température inadéquate (<20°C ou >26°C) réduit les capacités de mémorisation et la vitesse de lecture (Lan et al., 2011).
- Un taux d'humidité trop faible (<30%) assèche les muqueuses et provoque inconfort et distraction, tandis qu'un taux trop élevé (>70%) augmente la sensation de lourdeur et favorise la prolifération de moisissures, nuisible à la santé (Wargocki et al., 2002).

Le confort perçu dans l'espace influence la satisfaction globale des usagers, leur fidélité et leur propension à recommander la bibliothèque ou la salle de lecture (Dujol, 2020 ; de Dear & Brager, 2002).

Ainsi, le confort hygrothermique n'est pas seulement un facteur de bien-être ponctuel, mais aussi un levier pour optimiser la fréquentation, l'image de la bibliothèque et l'efficacité de l'expérience de lecture.

Conclusion

Ce chapitre a permis d'approfondir la problématique du confort hygrothermique dans les salles de lecture en mettant en lumière ses multiples facettes et son importance capitale pour le bien-être des usagers. Le confort hygrothermique, défini comme l'équilibre entre les conditions thermiques et hygrométriques permettant une sensation de bien-être optimal, repose sur une interaction complexe entre paramètres environnementaux (température, humidité, ventilation) et caractéristiques individuelles (métabolisme, habillement). Dans les salles de lecture, où l'activité est principalement statique, une régulation précise de ces paramètres est essentielle pour favoriser la concentration, la performance cognitive et le confort global des occupants. Les recherches

montrent que des variations même mineures de température ou d'humidité peuvent entraîner des désagréments physiologiques tels que la sécheresse respiratoire, une sensation de lourdeur ou une baisse de vigilance, affectant ainsi négativement l'expérience des lecteurs. L'analyse des approches analytique et adaptative du confort thermique révèle leur complémentarité pour évaluer et optimiser les conditions intérieures. Par ailleurs, l'évolution architecturale des salles de lecture, notamment à travers l'intégration de solutions innovantes telles que les structures métalliques, la lumière naturelle et les systèmes de ventilation, témoigne d'une adaptation progressive aux besoins contemporains. Enfin, la maîtrise des paramètres hygrothermiques ne se limite pas au confort immédiat mais joue également un rôle crucial dans la conservation des documents et l'optimisation énergétique des bâtiments, soulignant ainsi son importance à la fois humaine, fonctionnelle et environnementale.

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE III :

Étude empirique du fonctionnement hygrothermique des salles de lecture à Béjaïa

Dans ce chapitre, il sera d'abord question de présenter le contexte climatique de la ville de Béjaïa ainsi que le cadre d'étude, à savoir la salle de lecture de la Maison de la Culture. Le protocole méthodologique mis en œuvre y sera également exposé. L'analyse quantitative portera sur le suivi du comportement hygrothermique de la salle à travers des mesures in situ réalisées sur une période représentative. Parallèlement, une approche qualitative sera menée à l'aide d'un questionnaire diffusé auprès des utilisateurs de la salle. L'interprétation conjointe des résultats permettra d'évaluer l'influence de l'enveloppe bâtie et éventuellement la façade sur le confort hygrothermique et la perception des usagers.

***"Measurement is the first step that leads to control and eventually to improvement.
If you can't measure something, you can't understand it."***

H. James Harrington

Introduction

Les salles de lecture, en tant qu'espaces de concentration et d'échange intellectuel, doivent offrir un environnement propice à l'apprentissage et à la lecture prolongée. Le confort hygrothermique dans ces espaces est un élément clé pour garantir une expérience optimale aux utilisateurs. Ce confort, souvent négligé, dépend de plusieurs facteurs liés à l'enveloppe du bâtiment, notamment les matériaux de construction et la conception des façades. En effet, la capacité d'un bâtiment à maintenir une température agréable et une humidité relative confortable dépend directement de la manière dont les façades interagissent avec l'environnement extérieur. La qualité de l'isolation et le choix du vitrage sont des éléments cruciaux dans cette régulation. Un vitrage mal adapté ou une isolation insuffisante peuvent entraîner des variations thermiques importantes, affectant directement le confort des occupants. Il est donc essentiel de maîtriser ces paramètres pour garantir un équilibre entre efficacité énergétique et bien-être des usagers. Ce chapitre se penche sur l'analyse du fonctionnement hygrothermique de la salle de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa, en tenant compte de ces éléments clés dans la conception du bâtiment.

III.1. Présentation de la ville de Béjaïa

III.1.1. Localisation et contexte géographique

Béjaïa est une ville côtière située dans la région nord-est de l'Algérie, sur les rives de la mer Méditerranée (Figure 3.1).

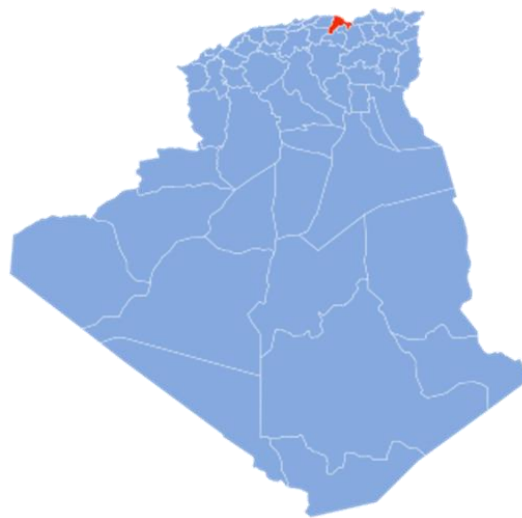


Figure 3.1: Situation de la ville de Béjaïa

(Source : www.algerie-monde.com/wilayas/bejaia/)

Elle se trouve à environ 230 km à l'est de la capitale, Alger, et est établie au nord de l'embouchure de la Soummam, sur le versant méridional de la montagne de Gouraya. La ville est entourée par les reliefs de la chaîne du Djurdjura, offrant ainsi un paysage contrasté entre montagne et littoral. Cette configuration géographique, conjuguée à la proximité de la mer, détermine un climat influencé par une humidité importante et des températures relativement modérées, des caractéristiques environnementales qui influent sur le confort thermique et la gestion hygrothermique des bâtiments de la région.



Figure 3.2: Délimitation de la commune de Bejaia (Source : Google earth)

Le territoire de la commune de Béjaïa est délimité comme suit :

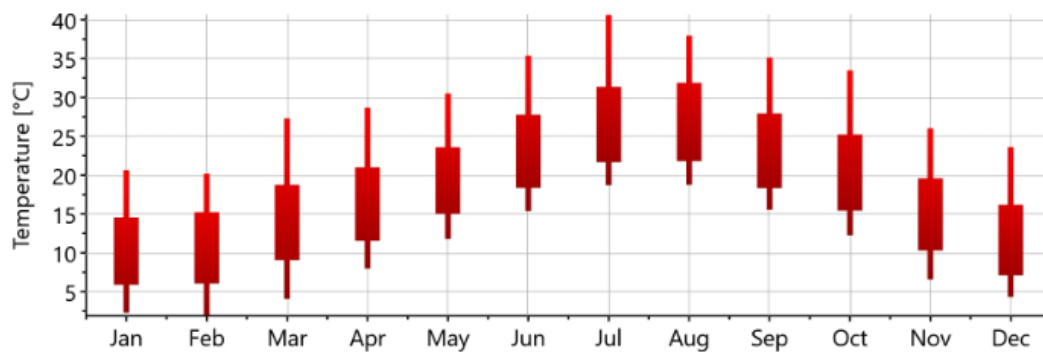
- Au nord et à l'est, il est bordé par la mer Méditerranée ;
- À l'ouest, il limite avec la commune de Toudja ;
- Au sud, il est adjacent aux communes d'Oued Ghir, Tala Hamza et Boukhefifa.

III.1.2. Contexte climatique de la ville de Bejaia

La ville de Béjaïa, située à une latitude de 36,747°N et une longitude de 5,055°E, bénéficie d'un climat méditerranéen, influencé par sa proximité avec la mer Méditerranée. Elle se trouve à une altitude de 15 mètres au-dessus du niveau de la mer.

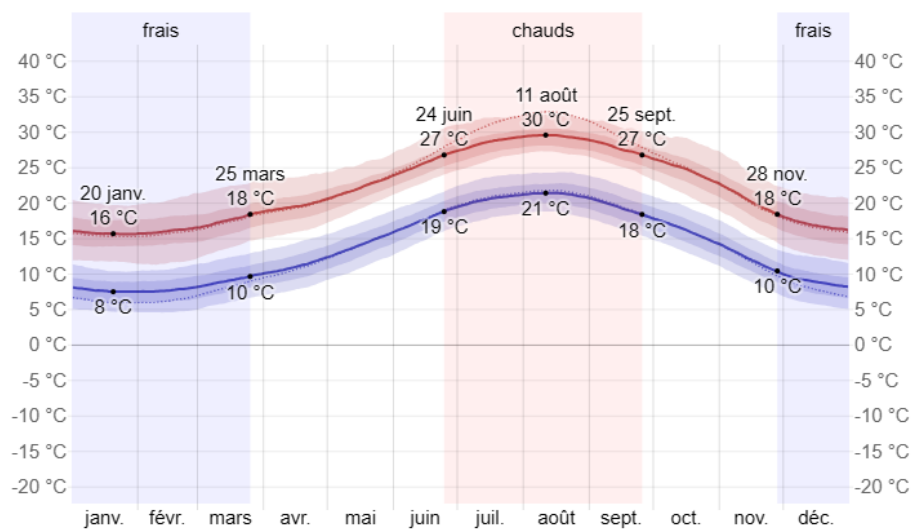
- **Températures :** La (figure 3.3) représente la température mensuelle selon Meteonorm.

Monthly temperature

**Figure 3.3:** Température mensuelle de la ville de Bejaia

(Source : Meteonorm V8.1)

La température annuelle moyenne enregistrée à Béjaïa est de 17,9 °C. Le mois d'août est le plus chaud, avec une moyenne de 26,2 °C, tandis que janvier est le plus froid avec une moyenne de 10,0 °C. Cette amplitude thermique relativement faible est caractéristique des régions littorales, où la mer agit comme un régulateur thermique naturel.

**Figure 3.4:** Température annuelle en 2024 de la ville de Bejaia(Source : <https://fr.weatherspark.com/2025/>)

La courbe montre l'évolution des températures moyennes maximales et minimales à l'aéroport de Béjaïa. On y distingue une période chaude de juin à septembre, avec un pic à 30 °C en août, et une période fraîche de décembre à mars, où les minimales descendent

à 8 °C. Ce climat méditerranéen, à faibles amplitudes thermiques, est favorable à des stratégies bioclimatiques passives.

- **Humidité Relative** : L'humidité relative moyenne annuelle s'élève à 75,7 %. Elle atteint son maximum durant les mois hivernaux, en particulier en janvier (81,7 %), et diminue légèrement en été, tout en demeurant élevée. Cette humidité contribue à accentuer les sensations de chaleur estivale et de fraîcheur hivernale. Voir (Figure 3.4)

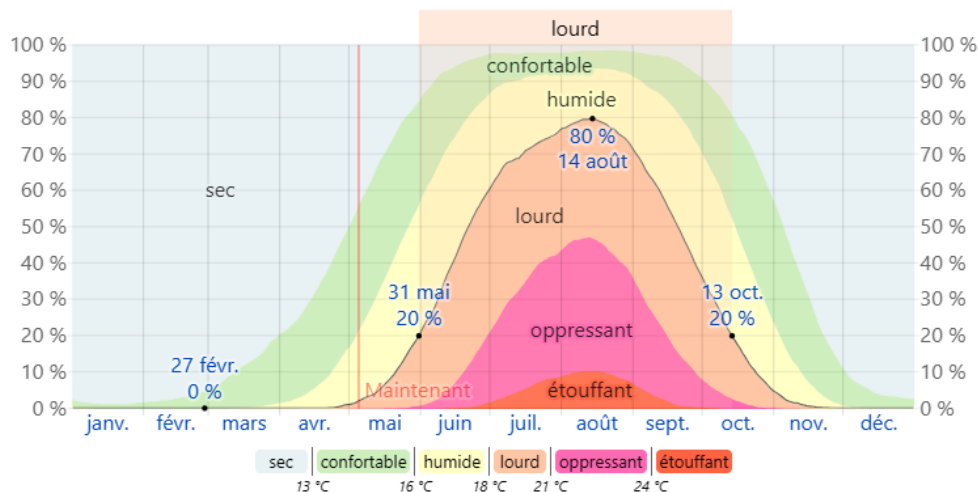


Figure 3.4: Niveaux de confort selon l'humidité de la ville de Bejaia en 2024

(Source : <https://fr.weatherspark.com/2025/>)

Cette courbe montre que Béjaïa connaît une période d'humidité confortable de mai à juin et en octobre. L'humidité devient oppressante entre juillet et septembre, avec un pic à 80 % le 14 août.

➤ **Ventilation Naturelle**

La vitesse moyenne annuelle du vent est relativement faible, avoisinant 2,1 m/s. Les variations saisonnières sont modérées, ce qui limite les effets de ventilation naturelle forcée, mais contribue à maintenir un confort thermique acceptable en période estivale. (Figure 3.5)

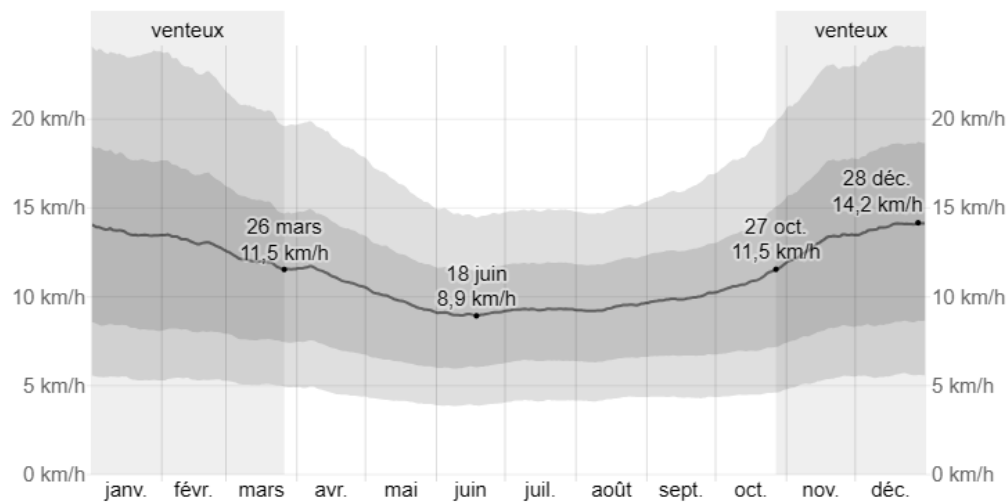


Figure 3.5: Vitesse horaire du vent en 2024 de la ville de Bejaia

(Source : <https://fr.weatherspark.com/2025/>)

À Béjaïa, les vents sont plus forts en hiver (janvier à mars) et en fin d'automne (novembre-décembre), avec un pic à 14,2 km/h en décembre. L'été, notamment en juin, est la période la moins venteuse avec une moyenne de 8,9 km/h.

- **Précipitations :** La (Figure 3.6) représente la précipitation mensuelle de la ville de Bejaia.

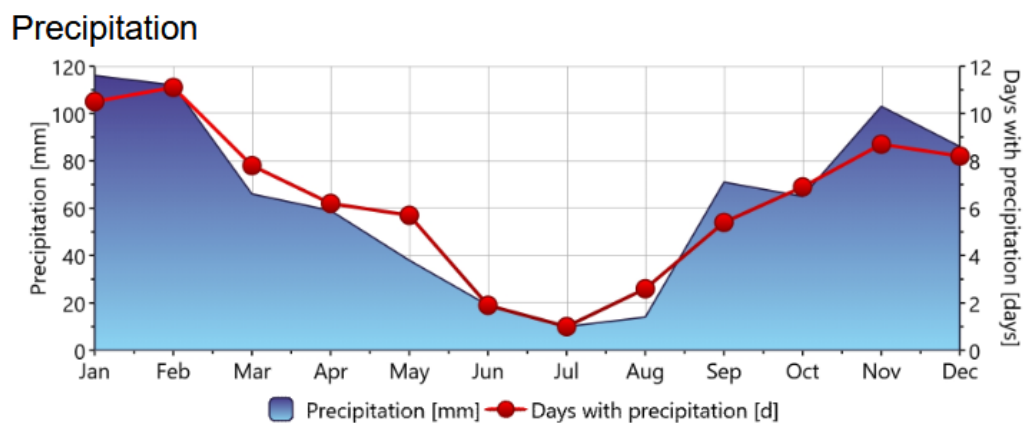


Figure 3.6: Précipitation mensuelle de la ville de Bejaia

(Source : Meteonorm V8.1.0.28251)

Bien que les données précises sur les précipitations annuelles ne soient pas détaillées dans le fichier climatique, il est reconnu que Béjaïa, à l'instar des autres régions

méditerranéennes, connaît des précipitations concentrées principalement en automne et en hiver, caractérisant ainsi un régime pluviométrique saisonnier

Afin d'assurer une évaluation représentative des conditions climatiques de la ville de Béjaïa, il est pertinent de voir les périodes clés de l'année pour les prises de mesures. Le mois de janvier, caractérisé par les températures les plus basses (10,0 °C en moyenne) et un taux d'humidité élevé (81,7 %), permet d'observer les phénomènes liés au confort thermique hivernal et aux transferts d'humidité. À l'opposé, le mois d'août, marqué par les températures les plus élevées (26,2 °C en moyenne) et un fort ensoleillement, constitue la période idéale pour analyser les risques de surchauffe et les performances estivales des bâtiments. Ainsi, la combinaison de ces deux périodes, représentant respectivement les extrêmes hivernaux et estivaux, offre une base solide pour une prise de mesures plus au moins concrète.

III.2. Présentation du cas d'étude

Le site choisi pour cette étude est la Maison de la Culture de Béjaïa, ouverte au public en 1996. Cet établissement culturel et administratif, d'une superficie globale de 6 815 m², se compose d'un rez-de-chaussée et de deux niveaux supérieurs. Conçue pour accueillir une variété d'activités telles que des salles de lecture, expositions, des conférences, des spectacles et des ateliers artistiques, l'architecture du bâtiment se caractérise par une organisation intérieure flexible, permettant d'adapter facilement les espaces aux différents besoins culturels et pédagogiques (voir la figure 3.7).

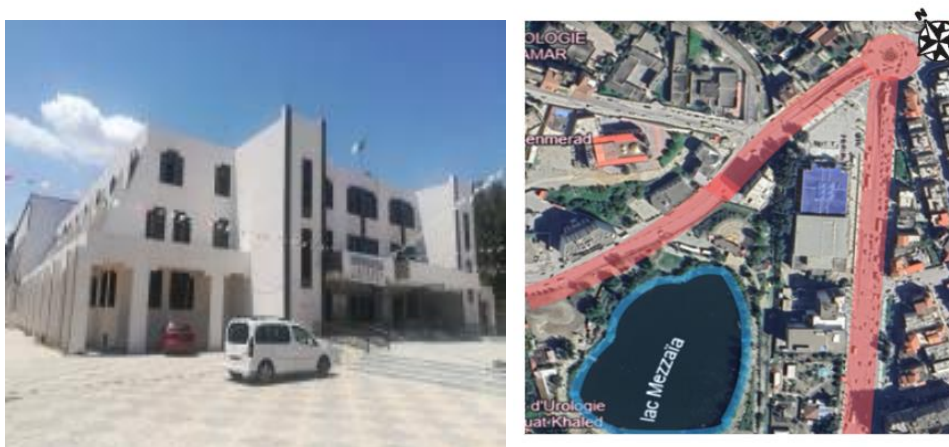


Figure 3.7: Situation de la maison de la culture

(Source : Google earth, 2025 ; version adaptée par l'auteur, 2025)

Située sur le boulevard Krim Belkacem dans le quartier d'Aamriw, la Maison de la Culture est implantée au cœur d'un pôle culturel comprenant également la maison de la radio, la bibliothèque et le théâtre, formant ainsi un ensemble cohérent autour du lac Mézaïa. Ce lac urbain, classé patrimoine naturel en 2001 et intégré au Parc National de Gouraya, constitue une zone humide d'importance écologique, offrant une bouffée d'oxygène au centre-ville de Béjaïa. La proximité immédiate de la Maison de la Culture avec le lac Mézaïa qui influence particulièrement les espaces à proximités.

➤ Description du cas d'étude

La salle de lecture étudiée se situe au premier étage de la Maison de la Culture de Béjaïa, un établissement public dédié à la diffusion du savoir et à l'accueil des activités culturelles. Il s'agit d'un espace fermé, composé de murs standards et équipé de baies vitrées en simple vitrage, permettant un apport de lumière naturelle tout en exposant la salle aux variations climatiques extérieures.

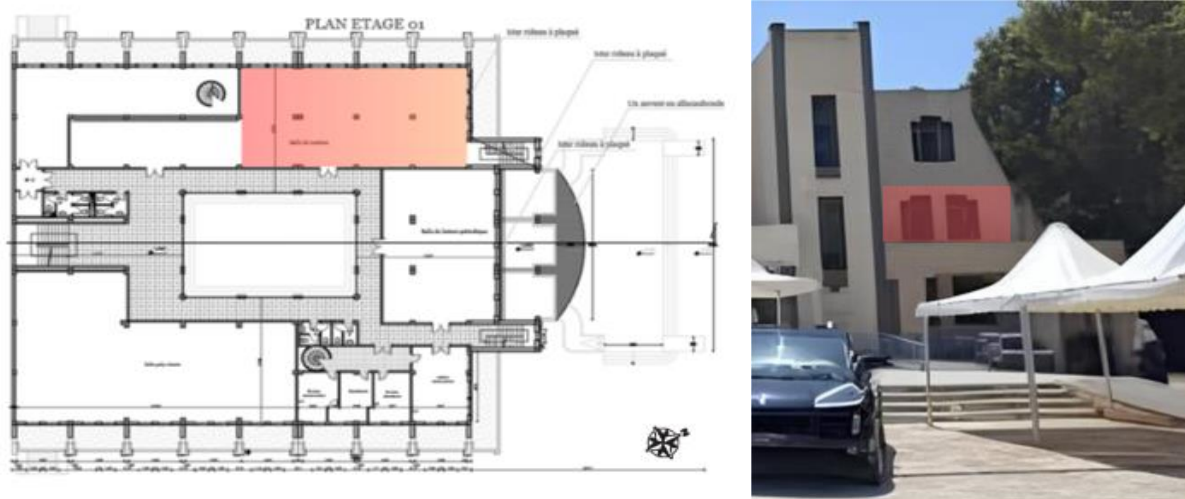


Figure 3.8: Emplacement du cas d'étude (Source : Autocad, 2025 ; version adaptée par l'auteur, 2025)

La salle est orientée vers le nord-est, ce qui lui permet de bénéficier d'un éclairage naturel en début de journée, mais limite les apports solaires directs l'après-midi. Cette orientation, couplée à l'usage de simple vitrage, accentue les pertes thermiques en hiver et réduit les gains solaires utiles en saison froide, ce qui peut affecter le confort des usagers.

➤ Constitution hygrothermique de l'enveloppe de la salle de lecture

Dans le cadre de cette étude, l'analyse hygrothermique de l'enveloppe de la salle de lecture s'appuie sur une approche qualitative et technique des éléments constructifs existants. L'objectif est d'évaluer leur capacité à réguler la température et l'humidité intérieure, en particulier dans un contexte méditerranéen humide comme celui de Béjaïa.

- **La paroi opaque : un mur standard non isolé** : la Figure 3.9 représente la composition du mur de la salle de lecture de la maison de la culture.

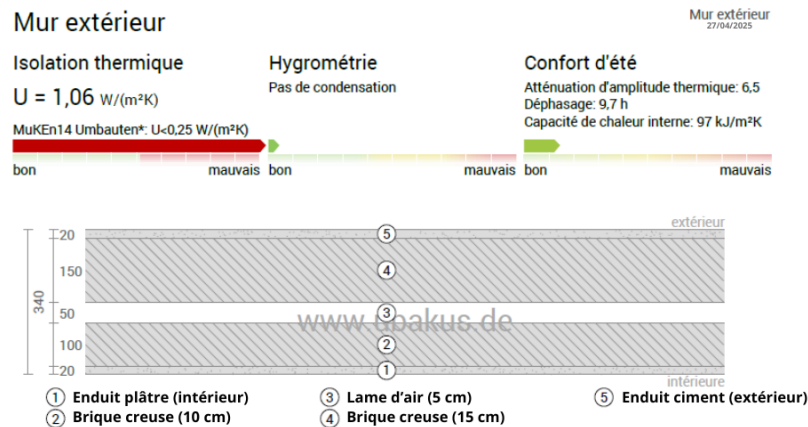


Figure 3.9: Composition du mur extérieur de la salle de lecture de la Maison de la Culture (Source : Ubakus, adapté par l'auteur, 2025)

Le mur de la salle de lecture correspond à une paroi couramment utilisée dans les constructions publiques algériennes. Il ne bénéficie d'aucune isolation thermique ni de traitement spécifique contre l'humidité. Sa composition est la suivante :

Tableau 3.1 : Composition et propriétés hygrothermiques des matériaux constituant l'enveloppe extérieure de la salle de lecture (Source : Tableau élaboré par Auteur (2025).

Valeurs thermiques extraites du Fascicule 1 (DTR C3-2), 2007)

N°	Matériau	Épaisseur (cm)	Conductivité thermique λ (W/m·K)	Capacité thermique C (J/kg·K)	Densité ρ (kg/m³)	Résistance thermique R (m²·K/W)	Remarques hygrothermiques
1	Enduit plâtre (intérieur)	2	0.35	936	1150	0,057	Perméable à la vapeur, favorise respiration murale
2	Brique creuse	10	0.48	936	900	0,208	Masse thermique intérieure, inertie thermique
3	Lame d'air	5	0.047	1000	1	1,064	Isolation thermique efficace, améliore ventilation
4	Brique creuse	15	0.48	936	900	0,313	Masse thermique modérée, perméabilité moyenne
5	Enduit ciment (extérieur)	2	1.40	1080	2200	0,014	Peu perméable à la vapeur, favorise condensation

La paroi montre une composition relativement standard, mais peu optimisée pour un bon confort intérieur en climat méditerranéen humide. Si la lame d'air améliore légèrement la résistance thermique globale, les matériaux utilisés notamment les enduits ciments non respirants limitent la perméabilité à la vapeur d'eau, ce qui peut favoriser les phénomènes de condensation interne.

- **La paroi vitrée : simple vitrage** : La figure 3.10 représente le type de vitrage utilisé dans la salle de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa, à savoir un simple vitrage composé d'une seule plaque de verre d'environ 6 mm d'épaisseur.



Figure 3.10: Composition du vitrage de la salle de lecture de la Maison de la Culture
(Source : Calumen, adapté par l'auteur, 2025)

Ce type de vitrage présente une isolation thermique faible qui entraîne des pertes de chaleur en hiver et une surchauffe en été, provoquant des variations de température inconfortables. Sa faible capacité isolante favorise également la formation de condensation intérieure, particulièrement accentuée dans le climat humide de Béjaïa, ce qui peut causer des problèmes d'humidité, des dégradations matérielles et le développement de moisissures. De plus, ce vitrage n'assure aucun contrôle de la vapeur d'eau, pouvant ainsi contribuer à une accumulation d'humidité intérieure en l'absence d'une ventilation adéquate.

Cette étude se concentre sur le confort hygrothermique, souvent négligé au profit de l'éclairage, afin d'améliorer le bien-être des usagers, préserver les ouvrages et proposer des solutions durables face aux faiblesses hygrothermiques liées au simple vitrage et à l'absence d'isolation.

III.3. Étude Empirique

La première partie de cette étude empirique vise à évaluer l'impact des matériaux isolants utilisés et le type de vitrage des façades sur le confort hygrothermique intérieur. Cette évaluation repose sur des campagnes de mesures portant sur la température extérieure, la température ambiante intérieure et l'humidité relative au sein de la salle de lecture de la maison de la culture de Bejaia. Les relevés sont effectués durant des journées et semaines représentatives des saisons hivernale et estivale, afin de saisir les comportements hygrothermiques du bâtiment sous des conditions climatiques représentatives.

La deuxième partie de l'étude repose sur une approche qualitative, à travers la distribution d'un questionnaire auprès des utilisateurs réguliers de la salle de lecture. Cette enquête vise à recueillir leurs perceptions subjectives du confort hygrothermique, à identifier les inconforts ressentis et à croiser ces données avec les résultats des relevés physiques, pour une analyse plus complète et centrée sur l'utilisateur.

III.3.1. Etude quantitative à travers prise de mesure in situ

- **La semaine représentative de prise de mesures**

La sélection d'une journée représentative et d'une semaine représentative repose sur l'analyse des données météorologiques locales. Ces périodes permettent d'obtenir des relevés hygrothermiques reflétant les conditions climatiques caractéristiques des moments les plus froids et les plus chauds de l'année.

Toutefois, en raison de contraintes de temps et de l'indisponibilité des outils de mesure, il n'a pas été possible de respecter le calendrier initialement prévu. Par conséquent, les relevés ont été effectués en avril, une période où les écarts de température peuvent être importants en raison du réchauffement climatique. Cette alternance entre journées froides et plus chaudes permet néanmoins d'analyser le comportement hygrothermique des façades dans des conditions climatiques variées.

➤ **Protocole de prise de mesures :**

Afin d'évaluer les conditions hygrothermiques des salles de lecture, les mesures ont été réalisées entre mars et avril sur une durée de quatre semaines. L'objectif principal est d'analyser l'impact de l'enveloppe du bâtiment, notamment les façades, sur le confort thermique des usagers.

Les paramètres mesurés sont :

- **Température intérieure de l'air (T_a)** : Évaluation du confort thermique.
- **Température extérieure de l'air (T_{ext})** : Influence des conditions climatiques sur l'intérieur.
- **Humidité relative intérieure (HR_{int})** : Impact sur le bien-être thermique des occupants.
- **Humidité relative extérieure (HR_{ext})** : Influence de l'humidité ambiante extérieure sur les transferts d'humidité et la condensation intérieure.

Les relevés ont été effectués toutes les 2 heures, entre 9h00 et 15h00, dans une seule condition :

- Période hors occupation.

Les conditions imposées pour garantir la fiabilité des mesures sont :

- Absence de chauffage ou climatisation artificielle.
- Priorité donnée à l'éclairage naturel.



Figure 3.11: Salle de lecture (Source : Auteur, 2025)

➤ Instruments de prise de mesure

L'outil utilisé pour ces relevés est un thermo-hygromètre numérique LCD d'intérieur et d'extérieur, modèle HTC-2, capable de mesurer simultanément la température et l'humidité relative.



Figure 3.12: Thermo-hygromètre numérique (Source : Auteur, 2025)

- **Les endroits sélectionnés pour les prises de mesures :**

Le choix des points de mesure a été réalisé selon un seul critère afin d'assurer des relevés représentatifs :

- Centre de la salle afin d'obtenir une vision globale des conditions hygrothermiques à une hauteur de 1,20 m.

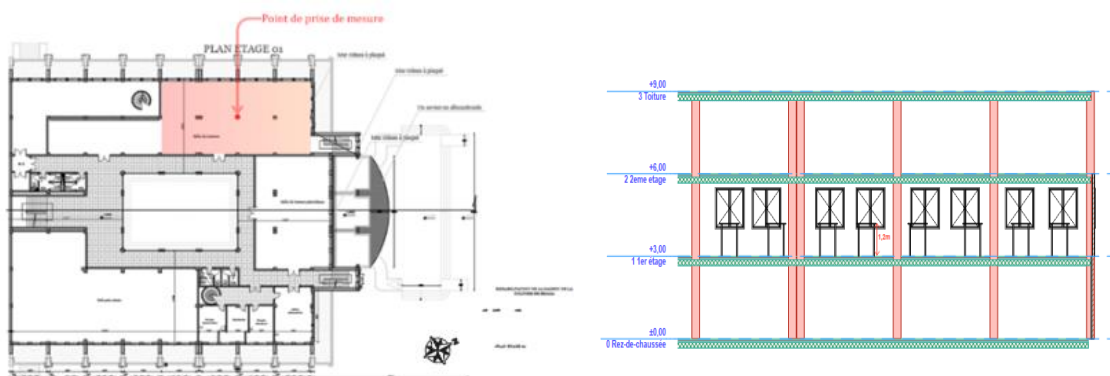


Figure 3.13: Point de mesure dans la salle de lecture (Source : Auteur, 2025)

- **Méthodologie d'analyse**

L'analyse des données repose sur les éléments suivants :

- Comparaison des valeurs relevées avec les normes de confort hygrothermique.

- Évaluation des variations de température et d'humidité en fonction de l'heure et de l'occupation.
- Identification des périodes d'inconfort hygrothermique et des recommandations pour l'optimisation du confort dans la salle de lecture.

Ces résultats permettront de mieux comprendre l'impact des façades sur le confort hygrothermique et de proposer des stratégies d'amélioration adaptées aux conditions climatiques locales.

III.3.2. Analyse et interprétation des résultats de l'étude quantitative

La présente section s'appuie sur les relevés effectués dans la salle de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa, le 27 avril 2025, journée représentative des conditions climatiques de la période printanière. Les données collectées ont été analysées sous forme graphique pour permettre une lecture comparative des évolutions hygrothermiques.

- **Évolution comparative de la température ambiante intérieure (Ta) et de la température extérieure (Text) :** La figure 3-14 illustre l'évolution horaire des températures entre 9h00 et 15h00. La courbe rouge représente la température ambiante intérieure (Ta), mesurée au cœur de la salle de lecture, tandis que la courbe noire correspond à la température extérieure (Text) relevée à l'extérieur de l'établissement. L'objectif de cette représentation est de visualiser la capacité de l'enveloppe du bâtiment à modérer les variations thermiques extérieures, critère central pour le confort hygrothermique des usagers.

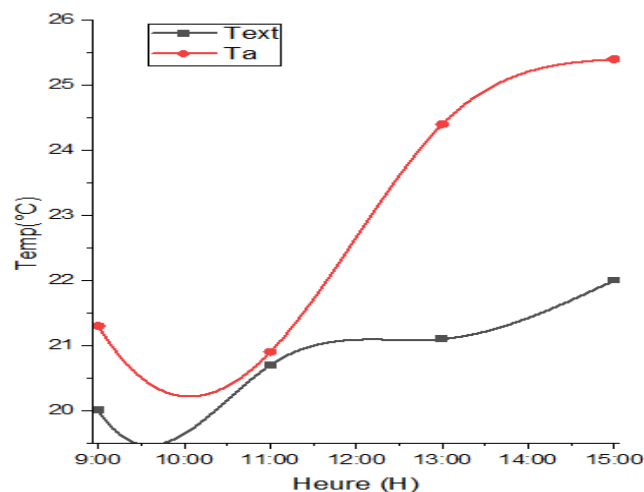


Figure 3.14: Évolution de la Ta et de la Text (°C) en fonction du temps (Source : Auteur, 2025)

À 9h, la température intérieure est légèrement supérieure à celle de l'extérieur, ce qui pourrait indiquer une certaine inertie thermique de l'enveloppe en début de journée.

À partir de 11h, on note une élévation progressive de la température intérieure, atteignant 25,4 °C à 15h, tandis que la température extérieure reste relativement modérée, autour de 22 °C. Bien que la salle de lecture soit orientée nord-est, une orientation généralement moins exposée au rayonnement solaire direct intense et il est possible que le vitrage simple, dépourvu de propriétés de contrôle solaire, laisse tout de même entrer une part significative du rayonnement du matin. Cette pénétration lumineuse, cumulée à une isolation thermique limitée, pourrait expliquer la montée progressive de la température intérieure en milieu de journée. Par ailleurs, le mur standard, même s'il intègre une lame d'air de 5 cm, n'offre pas une résistance thermique suffisante pour freiner les transferts de chaleur depuis l'extérieur, surtout que l'inertie des matériaux utilisés est faible. L'écart entre les températures intérieure et extérieure observé dans le temps semble indiquer une influence notable des caractéristiques de l'enveloppe sur la régulation thermique de l'espace.

- **Évolution comparative de l'humidité relative intérieure (HR int) et de l'humidité relative extérieure (HR ext) :** La figure 3-15, représente un graphe qui illustre l'évolution de l'humidité relative au cours de la journée à l'intérieur et à l'extérieur de la salle de lecture. La courbe grise, représentée par des symboles carrés, correspond à l'humidité relative extérieure (HR ext), tandis que la courbe rouge, marquée par des symboles ronds, indique l'humidité relative intérieure (HR int).

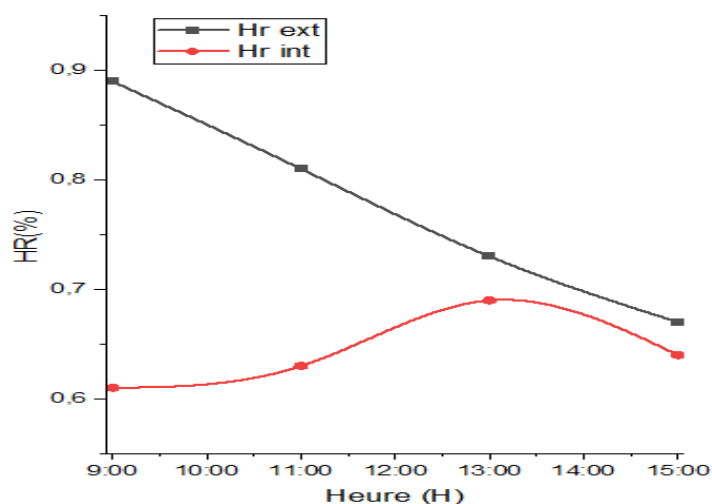


Figure 3.15: Évolution de HR int et de HR ext (%) en fonction du temps (Source : Auteur, 2025)

Les relevés montrent une humidité relative extérieure (HR ext) qui diminue progressivement au fil de la journée, passant de 89 % à 9h à 67 % à 15h. Cette tendance semble cohérente avec le réchauffement de l'air extérieur, qui entraîne généralement une baisse de l'humidité relative. À l'intérieur de la salle de lecture, l'humidité relative reste globalement plus stable, variant entre 61 % et 69 %. On observe néanmoins une légère hausse entre 9h et 13h, atteignant un maximum de 69 %, avant de redescendre à 64 % à 15h. Cette évolution pourrait être influencée par plusieurs facteurs : l'apport de chaleur solaire à travers le simple vitrage, les échanges d'air avec l'extérieur, ou encore le taux d'occupation de la salle. Il est possible que la faible capacité de l'enveloppe à réguler les transferts hydriques, notamment en raison du simple vitrage et de la nature du mur contribue à un équilibre instable entre humidité intérieure et extérieure. La présence d'humidité intérieure persistante, même lorsque l'air extérieur s'assèche, pourrait suggérer un renouvellement d'air limité ou une accumulation d'humidité intérieure difficilement évacuée.

Les mesures relevées in situ dans la salle de lecture de la maison de la culture de Béjaïa confirment certaines hypothèses formulées sur les limites hygrothermiques de son enveloppe. L'augmentation progressive de la température intérieure au fil de la journée, en décalage avec la température extérieure plus modérée, suggère une faible performance thermique, probablement liée au simple vitrage orienté nord-est et à l'isolation limitée du mur avec lame d'air. Parallèlement, la stabilité relative de l'humidité intérieure, malgré une baisse marquée de l'humidité extérieure, pourrait indiquer une capacité réduite à évacuer l'humidité interne, renforçant l'idée d'un renouvellement d'air insuffisant ou d'un manque de régulation hygrorégulatrice des parois. Ainsi, les résultats des mesures sur site tendent à valider les problématiques initiales liées à un confort hygrothermique instable, et soulignent la nécessité d'une optimisation de l'enveloppe pour mieux s'adapter aux conditions climatiques locales de Béjaïa.

III.4. Étude qualitative – Enquête par questionnaire

Dans le prolongement des mesures hygrothermiques réalisées in situ le 27 avril 2025 dans la salle de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa, une enquête qualitative par questionnaire a été menée afin de recueillir la perception réelle des usagers quant au

confort hygrométrique. Cette approche vise à compléter les données physiques par des ressentis subjectifs liés à l'expérience d'occupation prolongée de l'espace.

Un questionnaire anonyme composé de 15 questions (voir Annexe) a été distribué à 30 usagers réguliers de la salle. Après vérification, 24 réponses complètes et cohérentes ont été retenues pour l'analyse. Les questions étaient regroupées en 7 thématiques : informations personnelles, fréquence d'usage, température perçue, humidité, ventilation, placement dans la salle, système de climatisation, et confort global. Les réponses ont été codées sur une échelle de 1 à 5, puis traitées statistiquement et converties en pourcentages.

Les résultats obtenus permettent de croiser les relevés objectifs (température, hygrométrie, ventilation) avec le ressenti réel des occupants, révélant des écarts parfois importants entre les conditions physiques mesurées et le confort perçu.

III.4.1. Interprétation des résultats :

- **Profil des répondants :** Parmi les 24 participants : 75% étaient des étudiants, les autres étant soit des employés ou des usagers occasionnels. En termes de genre, l'échantillon était presque équilibré avec une légère majorité de femmes. Concernant la fréquence de fréquentation, plus de 60% déclaraient utiliser la salle plusieurs fois par semaine, voire quotidiennement.
- **Perceptions thermiques :** À la question « Comment évaluez-vous la température dans la salle ? », les résultats montrent que : 41% des usagers la jugent chaude voire très chaude en été. 33% la trouvent froide en hiver, avec une sensation d'inconfort prolongée en période de basse température. Moins de 25% ont décrit la température comme « confortable » toute l'année.

En période de chaleur, les réponses sur les stratégies d'adaptation varient : 35% sortent temporairement de la salle, 25% ouvrent une fenêtre, et 20% utilisent un éventail ou changent de place. Une minorité ne fait rien.

- **Ressenti hygrométrique et qualité de l'air :** Les réponses montrent une tendance marquée à l'inconfort : 58% jugent l'air « plutôt humide » ou « très humide », notamment lors de journées chaudes. L'humidité perçue est amplifiée par un air stagnant (mentionné par 67% des participants) et une ventilation

naturelle jugée insuffisante par 70% d'entre eux. Seuls 12% estiment que la ventilation est suffisante, et aucun répondant n'a coché « très suffisante ».

- **Influence des ouvertures et des façades** : À la question du positionnement dans la salle : 50% des participants s'installent près des fenêtres, espérant bénéficier de plus de lumière ou de courant d'air. Cependant, la majorité signale que la disposition des ouvertures ne permet pas un renouvellement efficace de l'air, et que la chaleur est concentrée dans certaines zones exposées aux rayons directs.
- **Systèmes techniques**
 - **Concernant la climatisation** : 48% des usagers déclarent ressentir le besoin de l'utiliser systématiquement en été. 35% indiquent qu'ils préfèrent ouvrir les fenêtres, tandis que 17% affirment s'adapter à la chaleur.
 - **Le chauffage est aussi pointé du doigt** : plusieurs répondants notent une inefficacité en hiver, avec une répartition inégale de la chaleur dans l'espace.
- **Évaluation globale du confort et suggestions** : Lorsque les usagers évaluent leur confort général :
 - 63% le trouvent moyen à inconfortable.
 - 12% le jugent très inconfortable.
 - Seuls 2 usagers (soit 8%) l'estiment confortable ou très confortable.

Parmi les suggestions d'amélioration les plus fréquentes :

- Amélioration de la ventilation naturelle.
- Installation de climatisation plus efficace.
- Isolation renforcée des façades.
- Introduction d'un système de contrôle individuel de température.

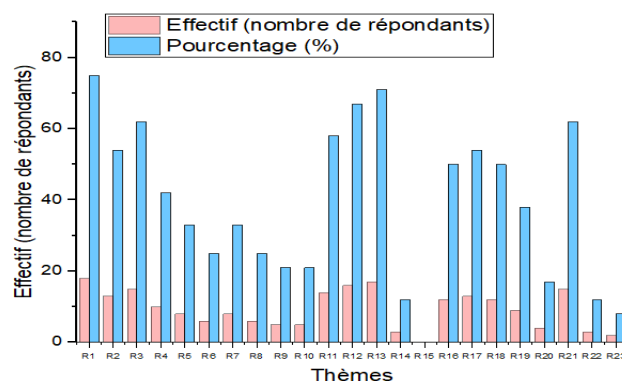


Figure 3.16: Répartition des réponses des usagers par thème : effectifs et pourcentages (%)

(Source : Auteur, 2025)

Le graphique met en évidence une insatisfaction généralisée des usagers concernant le confort hygrométrique et la qualité de l'air dans la salle de lecture. Les principaux problèmes relevés concernent la chaleur excessive, une humidité ambiante jugée inconfortable, ainsi qu'une ventilation jugée insuffisante. Face à ces conditions, les usagers tentent de s'adapter par des moyens individuels, qui s'avèrent souvent peu efficaces. Les éléments architecturaux et techniques, tels que les façades, les ouvertures ou encore les systèmes de chauffage et de climatisation, sont perçus comme inadaptés aux besoins réels des occupants. Il en résulte une forte attente d'amélioration, notamment en ce qui concerne l'isolation thermique du bâtiment, l'optimisation de la ventilation, ainsi que la possibilité pour les usagers de contrôler individuellement la température.

Le schéma radar présenté ci-dessous dans cette étude permet de visualiser de manière synthétique les perceptions individuelles des usagers concernant 15 critères liés au confort hygrothermique dans la salle de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa. Ce schéma résume les réponses de 24 participants à un questionnaire qualitatif, en attribuant à chaque critère une note allant de 1 (très insatisfaisant) à 5 (très satisfaisant). Chaque axe du graphique représente un usager, tandis que chaque courbe correspond à l'un des 15 critères évalués (température, humidité, ventilation, ressenti thermique global, etc.).

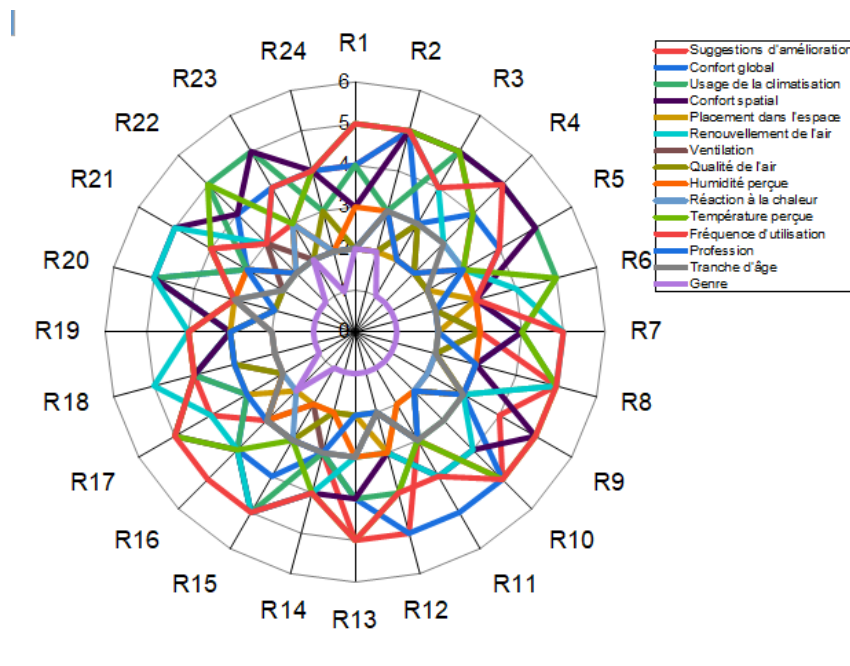


Figure 3.17: Schéma radar des niveaux de confort perçus (Source : Auteur, 2025)

L'analyse du schéma radar révèle plusieurs tendances importantes :

- Des critères structurellement déficients, comme la ventilation naturelle (Q6) et le chauffage (Q15), sont majoritairement évalués en dessous de 3 par presque tous les répondants. Cela confirme un inconfort généralisé lié à la stagnation de l'air et à l'inefficacité thermique en hiver.
- D'autres critères, comme la température générale ressentie (Q1) ou les suggestions d'amélioration (Q11 à Q14), obtiennent des notes plus élevées. Ces résultats traduisent une prise de conscience des besoins d'adaptation architecturale (isolation, vitrage, ventilation).
- Certains critères, tels que l'humidité perçue (Q3) ou la localisation dans la salle (Q7), présentent une variabilité marquée entre les individus, ce qui suggère une influence de facteurs comme l'emplacement, l'orientation des fenêtres ou les conditions horaires.

L'analyse du schéma radar a permis de valider plusieurs hypothèses de l'étude, notamment le rôle essentiel des façades, de l'isolation, et du type de vitrages dans le confort hygrothermique des usagers. Elle confirme que les problèmes perçus par les occupants sont bien liés aux caractéristiques architecturales du bâtiment et non uniquement à un usage inadéquat des équipements techniques.

Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases d'une analyse rigoureuse du confort hygrothermique dans la salle de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa. En croisant les données quantitatives issues des mesures in situ avec les retours qualitatifs des usagers recueillis par questionnaire, il a été possible d'identifier les principales sources d'inconfort perçues, en lien avec les caractéristiques de l'enveloppe bâtie. L'approche méthodologique adoptée, combinant objectivité technique et ressenti subjectif, constitue un socle essentiel pour orienter les réflexions à venir sur les leviers d'optimisation, en particulier au niveau des façades et du système de ventilation. Ces constats viendront alimenter les pistes d'amélioration proposées dans le chapitre suivants.

CHAPITRE IV :

Optimisation numérique du confort hygrothermique de la salle de lecture

Ce chapitre explore l'optimisation numérique du confort hygrothermique de la salle de lecture, en se concentrant particulièrement sur les isolants et le type de vitrage des façades. À l'aide du logiciel ArchiWizard, des simulations thermiques et hygrométriques seront menées pour évaluer l'impact de ces éléments sur la performance énergétique du bâtiment et sur le confort des usagers. L'objectif est d'identifier les solutions les plus efficaces en matière d'isolants et de vitrages, afin de minimiser les pertes thermiques et d'améliorer les conditions de confort intérieur tout en répondant aux exigences environnementales et climatiques locales.

Introduction

La simulation numérique constitue un outil incontournable dans l'analyse et l'optimisation des performances énergétiques et thermiques des bâtiments. Elle permet une compréhension approfondie des phénomènes physiques et une gestion précise des paramètres influençant le confort intérieur. En ce sens, elle représente un levier essentiel pour la conception de bâtiments à la fois performants et confortables, en offrant une approche détaillée de leur comportement dans un contexte climatique réel. Ce chapitre se concentrera sur l'optimisation numérique du confort hygrothermique de la salle de lecture, avec un accent particulier sur les isolants et le type de vitrage des façades. L'étude sera réalisée à l'aide du logiciel ArchiWizard, sur une maquette virtuelle qui servira de modèle de référence, en intégrant les données climatiques spécifiques à la ville de Béjaïa. Cette approche numérique complétera et renforcera les résultats obtenus lors de l'analyse sur site, permettant d'affiner les solutions proposées pour garantir un confort optimal dans la salle de lecture tout en optimisant les performances énergétiques du bâtiment.

IV.1. Simulation dynamique hygrothermique

La simulation hygrothermique est un outil puissant qui permet d'analyser l'interaction entre les paramètres thermiques et l'humidité dans un bâtiment. Contrairement aux simples simulations thermiques, cette approche prend en compte l'humidité relative de l'air, les variations de température, ainsi que la gestion de l'eau dans les matériaux de construction, offrant ainsi une évaluation plus complète du confort intérieur. Ce processus est particulièrement pertinent dans le contexte de la conception d'espaces comme les salles de lecture, où le confort thermique et hygrothermique joue un rôle crucial pour le bien-être des utilisateurs (Glass et al,2013).

IV.2. Historique de la simulation hygrothermique

La simulation hygrothermique est apparue dans les années 1970, en réponse aux enjeux d'efficacité énergétique et de gestion de l'humidité dans le bâtiment. Avec l'évolution des besoins, des outils comme WUFI ont été développés pour modéliser les transferts de chaleur et d'humidité à travers les enveloppes. Aujourd'hui, ces simulations sont essentielles pour concevoir des bâtiments durables et performants. (Kabore,2019).

IV.1.2. Présentation de logiciel de la modélisation « ArchiCAD »

Au moyen du logiciel de modélisation "ArchiCAD" version 26, nous avons réalisé une maquette numérique du modèle faisant l'objet de l'étude, tel que le montre la figure ci-après :

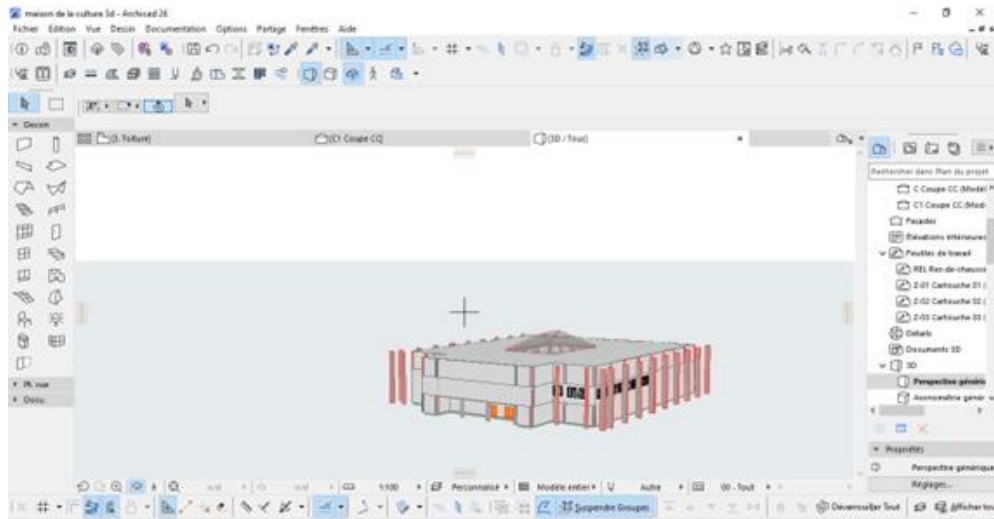


Figure 4.1: Création de la maquette numérique du modèle étudié (Source : auteur, 2025)

Dans le cadre de cette étude, le logiciel ArchiCAD 26, développé par Graphisoft, a été utilisé pour réaliser la maquette numérique du bâtiment étudié. Ce logiciel de modélisation architecturale basé sur la technologie BIM permet de concevoir en 3D tout en intégrant les données techniques nécessaires à l'analyse. La version 26 se distingue par sa fluidité et sa compatibilité avec des outils de simulation comme ArchiWIZARD, ce qui facilite l'exportation du modèle pour les études hygrothermiques. La modélisation a porté notamment sur la salle de lecture, afin de fournir un support précis aux simulations, comme l'illustre la figure ci-après.

IV.1.3. Présentation du logiciel de simulation ArchiWIZARD

ArchiWIZARD est un logiciel de simulation énergétique et hygrothermique utilisé dans le domaine de l'architecture et de l'ingénierie de la construction. Il est conçu pour évaluer et optimiser les performances thermiques, énergétiques et environnementales des bâtiments. Grâce à une interface intuitive et à des outils puissants, ArchiWIZARD permet aux utilisateurs de simuler les conditions réelles d'un bâtiment en tenant compte des facteurs climatiques et des choix de conception architectural.

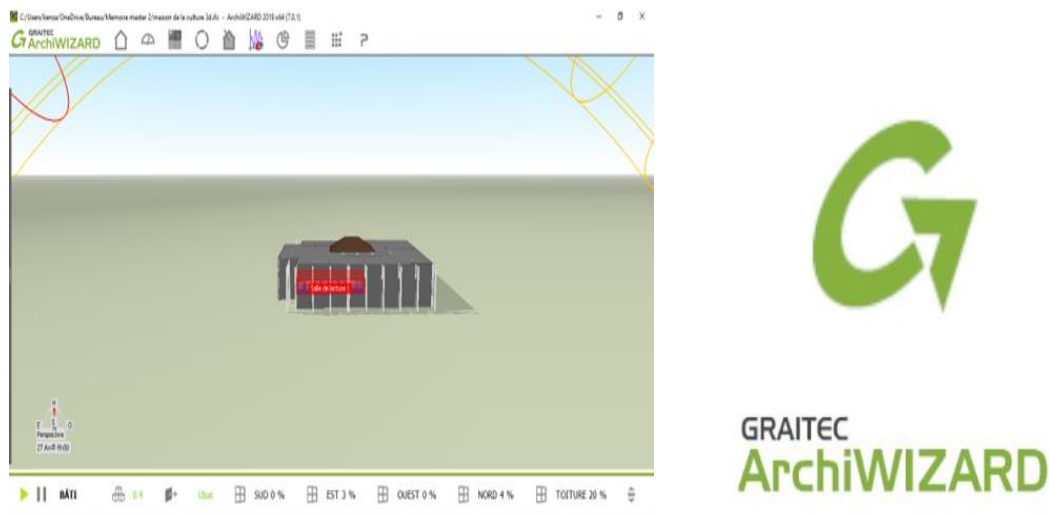


Figure 4.2: Interface du logiciel employé dans la simulation thermique dynamique
« ArchiWIZARD » (Source : auteur, 2025)

IV.1.3.1. EnergyPlus dans ArchiWIZARD

EnergyPlus est un moteur de simulation thermique dynamique développé par le Department of Energy des États-Unis, permettant d'analyser avec précision le comportement thermique d'un bâtiment heure par heure sur toute l'année. Il modélise les échanges de chaleur par conduction, convection et rayonnement, en tenant compte des apports solaires, des gains internes, de l'inertie des matériaux et des conditions climatiques extérieures. Contrairement aux outils statiques, EnergyPlus permet une évaluation fine du confort thermique et de la performance énergétique, essentielle pour concevoir des bâtiments passifs et adaptés aux variations climatiques, en particulier dans des espaces sensibles comme les salles de lecture.

IV.1.4. Protocole de simulation

Dans le cadre de cette étude, la simulation thermique vise à évaluer les conditions hygrothermiques réelles de la salle de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa, un espace à occupation prolongée sensible au confort thermique et à la qualité de l'air intérieur. Contrairement aux approches standardisées et généralisées appliquées à de nombreux équipements publics en Algérie, cette démarche repose sur une observation in situ, couplée à une simulation numérique contextualisée.

La méthodologie adoptée comprend trois étapes principales : La première consiste en la modélisation géométrique fidèle de la salle de lecture à l'aide du logiciel ArchiCAD, en tenant compte des dimensions exactes, des matériaux utilisés dans l'enveloppe, de l'orientation et des ouvertures. La seconde étape est consacrée à la simulation thermique

dynamique via le logiciel ArchiWIZARD, avec une attention particulière portée à l'analyse du confort intérieur selon les données climatiques du jour du 27 avril 2025, date représentative des conditions printanières locales. Enfin, la dernière phase est dédiée à l'analyse des résultats obtenus, notamment les températures de l'air, l'humidité relative, les apports solaires et les périodes d'inconfort, en vue de formuler des propositions d'amélioration passive adaptées au contexte climatique de Béjaïa.

IV.1.5. Moment de référence pour la simulation

La simulation thermique et hygrothermique s'étendra sur toute l'année 2025 (du 1er janvier au 31 décembre), afin de représenter les variations saisonnières du climat méditerranéen humide de Béjaïa. Cette approche annuelle permet d'évaluer la performance globale de l'enveloppe face aux chaleurs estivales, aux froids hivernaux et aux périodes de transition.

En complément, une simulation ponctuelle est prévue le 27 avril 2025 à 13h00, moment représentatif du printemps. Cette date a également été choisie pour coïncider avec une campagne de mesures sur site, permettant ainsi de valider les résultats numériques par confrontation aux données réelles.

IV.1.6. Démarche de simulation hygrothermique dynamique avec ArchiWIZARD

La simulation hygrothermique a été menée dans le but d'évaluer la performance globale de la façade de la salle de lecture en tenant compte à la fois des échanges thermiques et de la gestion de l'humidité, paramètres essentiels dans un espace sensible comme une salle de lecture.

- Voici les étapes essentielles du processus :
- Modélisation du bâtiment dans le logiciel ARCHICAD.
 - Exportation du modèle 3D vers ArchiWIZARD, au format ifc, pour permettre une analyse énergétique détaillée.
 - Paramétrage du climat local, en sélectionnant la ville de Béjaïa et en important son fichier climatique spécifique.
 - Vérification du modèle importé, orientation du projet, vérification des volumes, des ponts thermiques et des jonctions sensibles à l'humidité.
 - Définition de la zone d'étude la salle de lecture, en précisant son usage et son besoin de confort.
 - Intégration des matériaux réels composant l'enveloppe du bâtiment suivie de la configuration des variantes à simuler.

- Lancement des simulations hygrothermiques dynamiques, sur différentes périodes représentatives (journée type et année complète), avec différentes combinaisons mur/vitrage.
- Analyse des résultats obtenus, en termes de température intérieure, taux d'humidité.

IV.2. Présentation des scénarios de simulation et analyse comparative des résultats

Cette section présente l'ensemble des scénarios de simulation hygrothermique élaborés dans le cadre de cette étude, ainsi que les résultats obtenus pour chacun d'eux. Ces simulations ont pour objectif d'évaluer l'impact des choix constructifs (nature des parois opaques et vitrées) sur le confort intérieur de la salle de lecture située à la Maison de la Culture de Béjaïa.

IV.2.1. Températures extérieures simulées sur l'année : La figure ci-dessus illustre l'évolution des températures extérieures simulées sur l'ensemble de l'année pour la ville de Béjaïa, selon le fichier climatique intégré dans le logiciel ArchiWizard. La courbe grise représente la température de l'air extérieur, avec une température moyenne annuelle de 18,0 °C, une température minimale de 2,3 °C et un maximum de 38,0 °C. La température du sol reste constante à 15,0 °C.

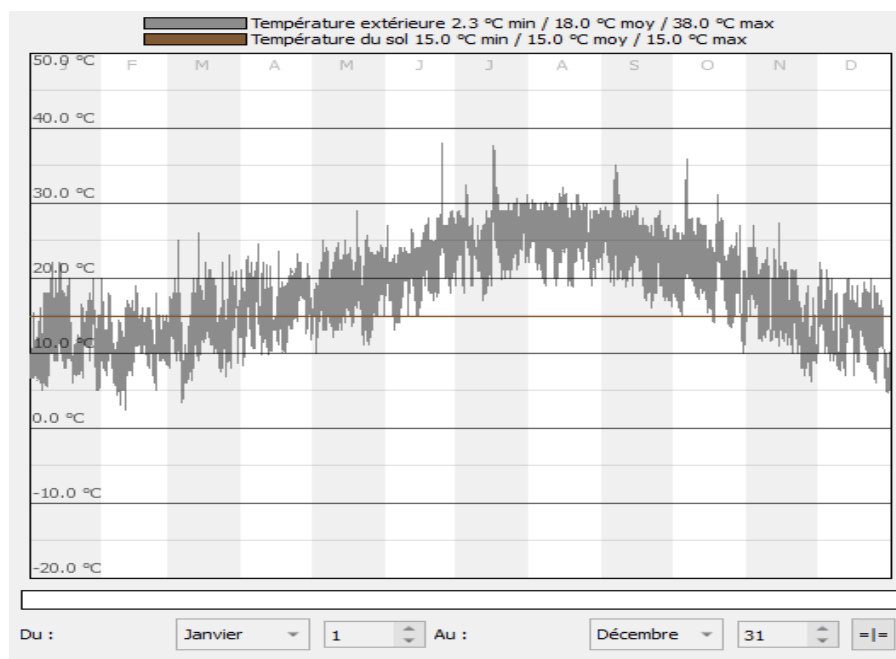


Figure 4.3: Evolution des températures extérieures simulées sur l'ensemble de l'année pour la ville de Béjaïa (Source : auteur, 2025)

Cette courbe confirme le caractère méditerranéen du climat de Béjaïa :

- Hiver doux (décembre à février), avec des minima proches de 2 à 5 °C.

- Été chaud (juin à septembre), avec des pics fréquents dépassant les 30 °C, et un maximum absolu à 38 °C.
- Inter-saisons tempérées (mars-avril et octobre-novembre), avec des températures modérées autour de 15–22 °C.

IV.2.2. Température extérieure simulée le 27 avril 2025 : Cette figure représente l'évolution horaire de la température extérieure le 27 avril 2025.

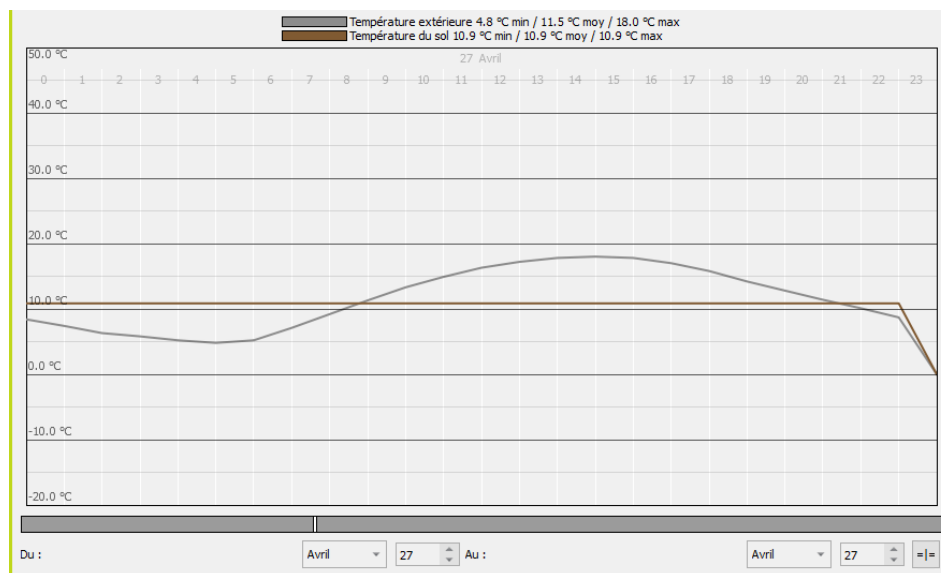


Figure 4.4: Température extérieure simulée le 27 avril 2025 (Source : auteur, 2025)

Les résultats montrent que le modèle reproduit la dynamique thermique du local dans la matinée (écarts compris entre 3 et 5 % à 9h et 11h). En revanche, à 15h, l'écart atteint 13,4 %, probablement en raison de l'absence d'une modélisation précise des apports solaires directs, de l'inertie thermique du mur non isolé, ou de facteurs environnementaux non intégrés (ventilation naturelle, ombrage ponctuel, etc.). Ainsi, bien que les températures simulées soient globalement proches des valeurs mesurées, un écart moyen de l'ordre de 7,3 % est constaté, ce qui reste acceptable dans une simulation.

IV.2.3. Humidité relative simulée sur l'année : La figure montre la variation de l'humidité relative extérieure à Béjaïa sur toute l'année civile, du 1er janvier au 31 décembre. Ces données sont extraites du fichier climatique utilisé dans la simulation.

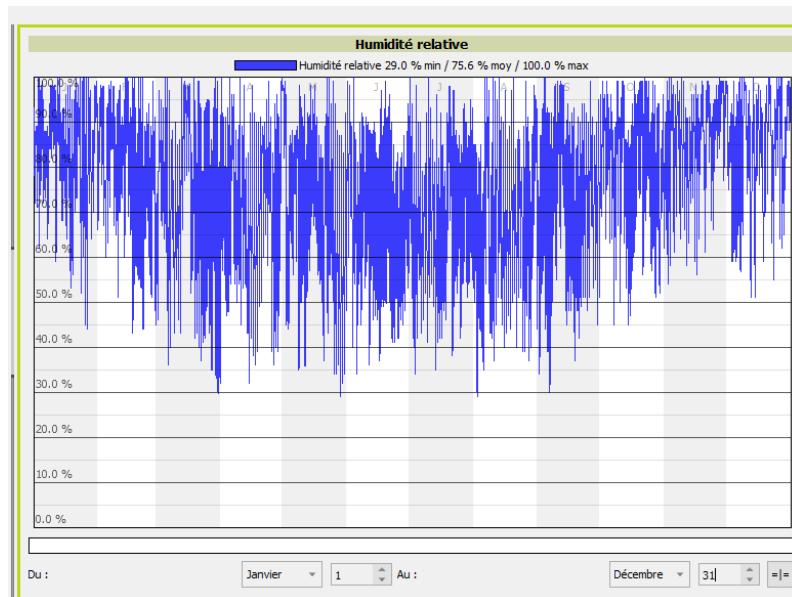


Figure 4.5: Humidité relative simulée sur l'année dans la ville de Bejaia (Source : auteur, 2025)

L'humidité relative extérieure à Béjaïa est globalement élevée tout au long de l'année, avec une moyenne annuelle de 75,6 %, ce qui reflète le climat méditerranéen humide de la région, fortement influencé par la proximité de la mer.

IV.2.3. Humidité relative simulée le 27 avril : La figure ci-dessous illustre l'évolution l'humidité relative climatique extérieure simulée le 27 avril.

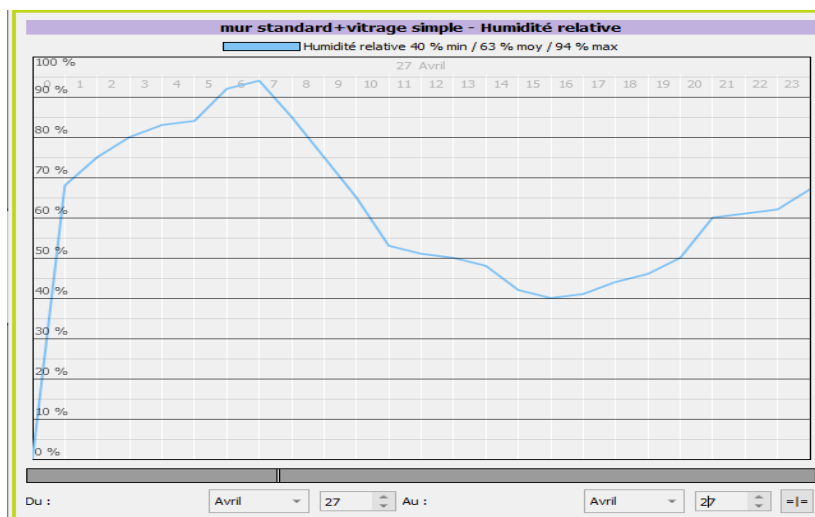


Figure 4.6: Humidité relative simulée le 27 avril dans la ville de Bejaia (Source : auteur, 2025)

On observe un écart moyen de 12,6 % entre l'humidité relative extérieure simulée (63 %) et celle issue des données climatiques réelles (75,6 %). Bien que cet écart dépasse légèrement le seuil de ± 10 % généralement admis pour la validation, il reste raisonnable

au vu des simplifications inhérentes à la simulation.

IV.2.4. Scénario 1 – Mur standard + vitrage simple : Ce premier scénario correspond à la configuration initiale et non optimisée de la salle de lecture, servant de cas de référence pour toutes les comparaisons ultérieures. Il repose sur :

- Un mur standard composé des éléments suivants : Enduit plâtre intérieur – 2 cm / Brique creuse – 10 cm / Lambe d'air – 5 cm / Brique creuse – 15 cm / Enduit ciment extérieur – 2 cm.

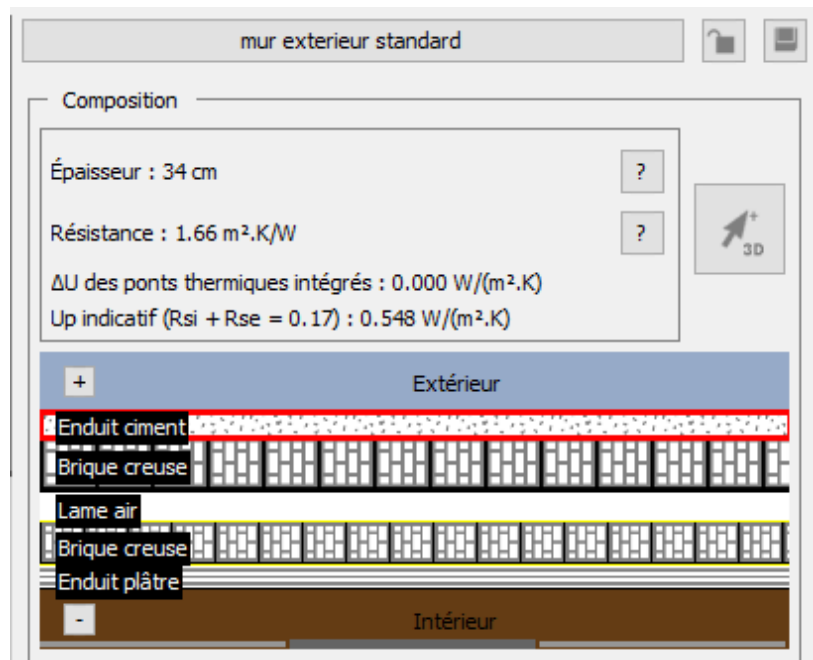


Figure 4.7: Composition d'un mur extérieur standard (Source : auteur, 2025)

- Un simple vitrage de 6 mm d'épaisseur, sans traitement ni gaz isolant :

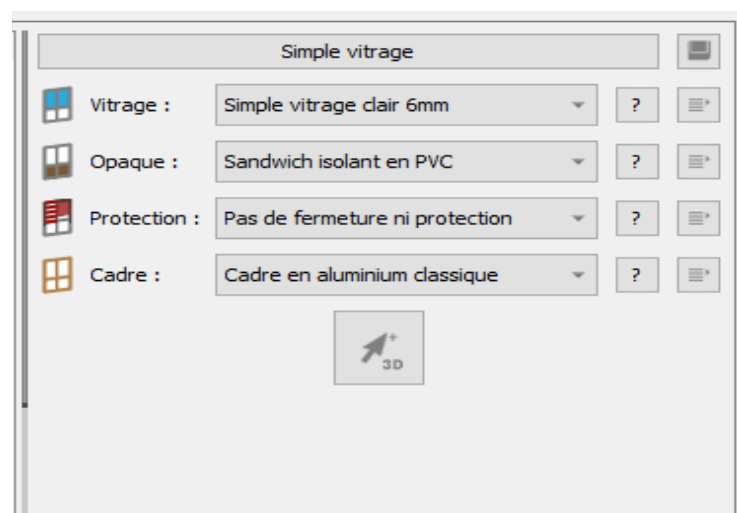


Figure 4.8: Composition d'un simple vitrage (Source : auteur, 2025)

Cette configuration est caractéristique des constructions algériennes traditionnelles, avec une isolation thermique faible, tant sur les parois opaques que

vitrées. Deux simulations ont été réalisées pour ce scénario :

- Une simulation journalière le 27 avril 2025, en lien direct avec les relevés in situ effectués à 09h, 11h, 13h et 15h.
- Une simulation annuelle, pour évaluer le comportement hygrothermique du bâtiment tout au long de l'année.

➤ **Résultats de la simulation journalière (27 avril 2025) :** Le graphe présente l'évolution de la température intérieure dans la salle de lecture pour le 27 avril, dans le cas d'une configuration avec mur standard et vitrage simple.

On observe que la température opérative intérieure (courbe jaune) est quasiment constante autour de 31 °C durant toute la journée. En parallèle, la température extérieure (courbe grise) évolue progressivement de 20 °C vers 27 °C entre 9 h et 15 h, avant de redescendre.

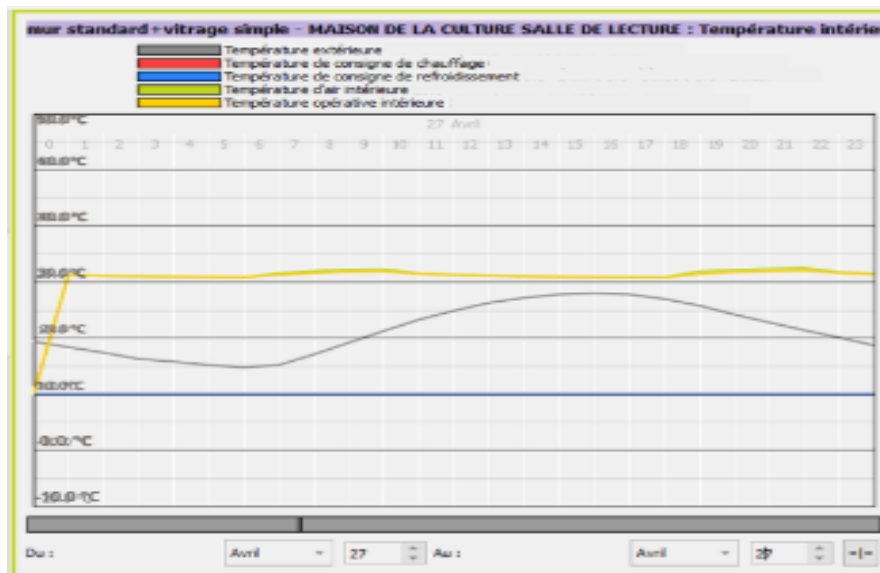


Figure 4.9: Résultat de simulation d'un mur standard +simple vitrage simule le 27 avril
(Source : auteur, 2025)

Cela s'explique par l'absence d'isolation thermique des murs et l'usage d'un simple vitrage, qui laisse entrer une quantité importante de rayonnement solaire sans offrir de régulation thermique.

Le scénario 1, combinant un mur non isolé et un simple vitrage, conduit à une température opérative intérieure simulée d'environ 31 °C, ce qui est largement supérieur aux températures mesurées sur site le 27 avril (comprises entre 21,3 °C et 25,4 °C). Cela traduit une surchauffe exagérée dans la simulation. Mais malgré cet écart important, ce scénario reste essentiel en tant que base de référence, car il permet

d'évaluer l'impact réel des améliorations constructives proposées dans les scénarios suivants.

- **Résultats de la simulation de toute l'année :** La température opérative intérieure simulée sur toute l'année dans ce scénario oscille principalement entre 17 °C et 34 °C, avec une moyenne avoisinant les 27 °C.

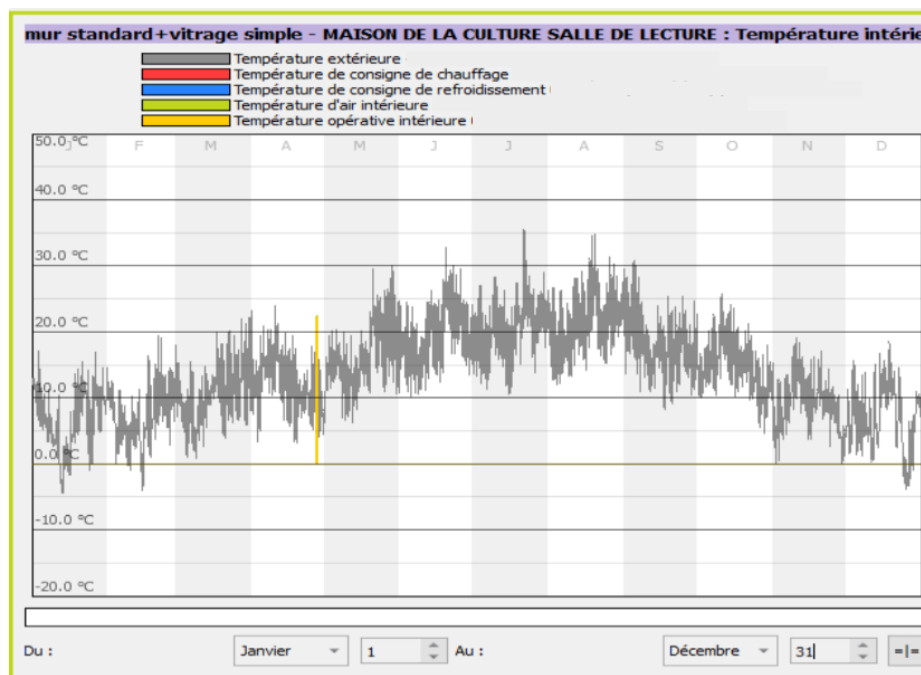


Figure 4.10: Résultat de simulation d'un mur standard +simple vitrage simule toute l'année (Source : auteur, 2025)

Cette configuration montre une importante variabilité thermique, avec :

- Des températures basses en hiver (minima autour de 17 °C en janvier/février),
- Et des surchauffes estivales dépassant les 32 °C, notamment en juillet-août.

Cette tendance reflète l'absence d'isolation thermique et la faible capacité à réguler les apports solaires dans la salle de lecture. Le simple vitrage, combiné à un mur non isolé, laisse fortement passer la chaleur en été et peine à retenir la chaleur en hiver.

IV.2.5. Scénario 2 – Mur optimisé (isolé avec laine de verre recyclée) + simple

vitrage : Ce scénario représente une configuration intermédiaire, dans laquelle seul le mur a été amélioré par l'ajout d'un isolant écologique (laine de verre recyclée), tandis que le vitrage reste simple, comme dans le scénario de base. L'objectif est d'analyser dans quelle mesure une amélioration des parois opaques seule peut impacter le confort thermique, en l'absence d'un vitrage performant.

- **Mur isolé :** Le mur étudié dans ce scénario est une paroi composite optimisée intégrant un isolant écologique. Il conserve la structure de base du mur standard

algérien (enduits, briques creuses), mais remplace la lame d'air centrale par une couche de laine de verre recyclée de 8 cm d'épaisseur. Ce matériau, à très faible conductivité thermique ($\lambda = 0,037 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), améliore significativement la performance thermique de la paroi sans altérer sa masse thermique.

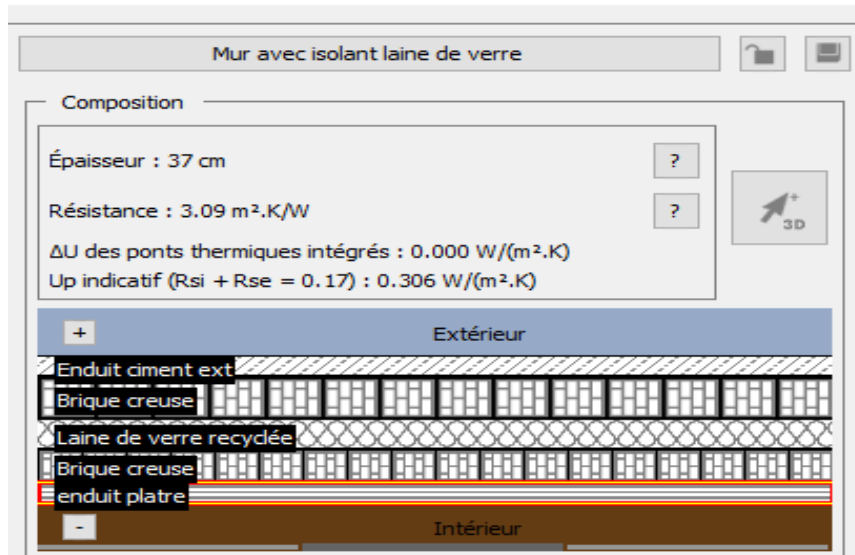


Figure 4.11: Composition d'un mur avec laine de verre recyclée (Source : auteur, 2025)

Le tableau 4.1 ci-dessous présente les caractéristiques thermo physiques détaillées des matériaux composant le mur optimisé avec laine de verre recyclée, utilisé dans le Scénario 2 de la simulation.

Tableau 4.1 : Caractéristiques hygrothermiques du mur isolé
(Source : Règlement Thermique Algérien DTR C 3.1 volume 1)

N°	Matériau	Épaisseur (cm)	λ (W/m·K)	R (m²·K/W)	Densité ρ (kg/m³)	Capacité thermique c (J/kg·K)
1	Enduit plâtre (intérieur)	2	0,35	0,057	1150	936
2	Brique creuse (intérieure)	10	0,48	0,208	900	936
3	Laine de verre recyclée	8	0,037	2,16	24-30	840
4	Brique creuse (extérieure)	15	0,48	0,313	900	936
5	Enduit ciment (extérieur)	2	1,4	0,014	2200	1080

Chaque matériau est décrit à travers quatre propriétés essentielles pour l'analyse hygrothermique :

- Conductivité thermique (λ) : mesure la capacité du matériau à conduire la chaleur (W/m·K)
- Densité (ρ) : masse volumique (kg/m³), utile pour évaluer l'inertie thermique
- Capacité thermique (c) : capacité à stocker la chaleur (J/kg·K)
- Résistance thermique (R) : capacité d'un matériau à s'opposer au transfert de chaleur (m²·K/W).

- **Résultat de simulation – Scénario 2 :** Le graphique ci-dessous présente l'évolution des températures simulées dans la salle de lecture le 27 avril, en configuration avec un mur isolé par 8 cm de laine de verre recyclée et un simple vitrage.

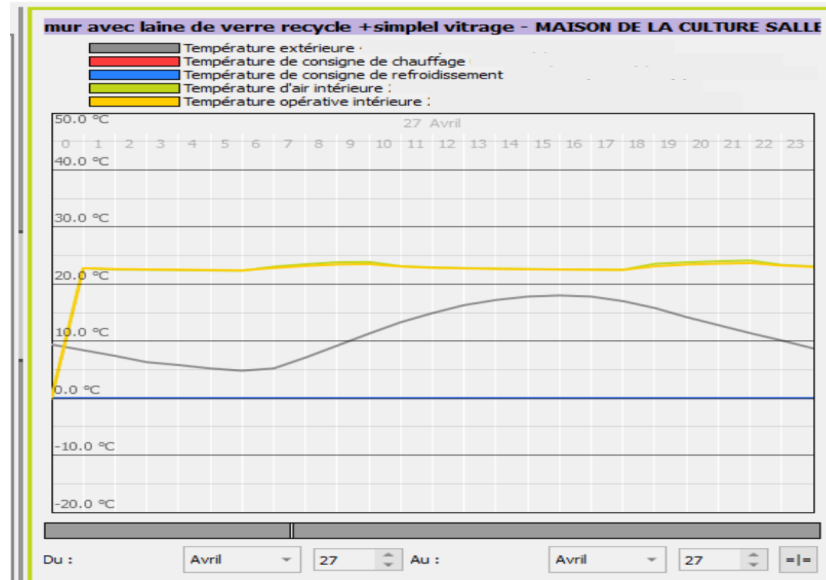


Figure 4.12: Résultat de la simulation du scénario 2 (Source : auteur, 2025)

La température opérative intérieure reste quasiment constante, évoluant légèrement entre 21 °C et 22 °C tout au long de la journée. Cette stabilité thermique intérieure est le résultat direct de l'amélioration de l'enveloppe opaque par l'ajout d'un isolant efficace. Elle traduit une meilleure inertie thermique du mur, capable d'atténuer les fluctuations climatiques extérieures.

IV.2.6. Scénario 3- mur isolé avec laine de verre recyclée + double vitrage performant (argon)

Dans ce scénario, nous analysons les performances hygrothermiques d'une configuration optimisée combinant une paroi isolée avec de la laine de verre recyclée et un vitrage performant à double lame rempli d'argon.

- **Double vitrage performant**

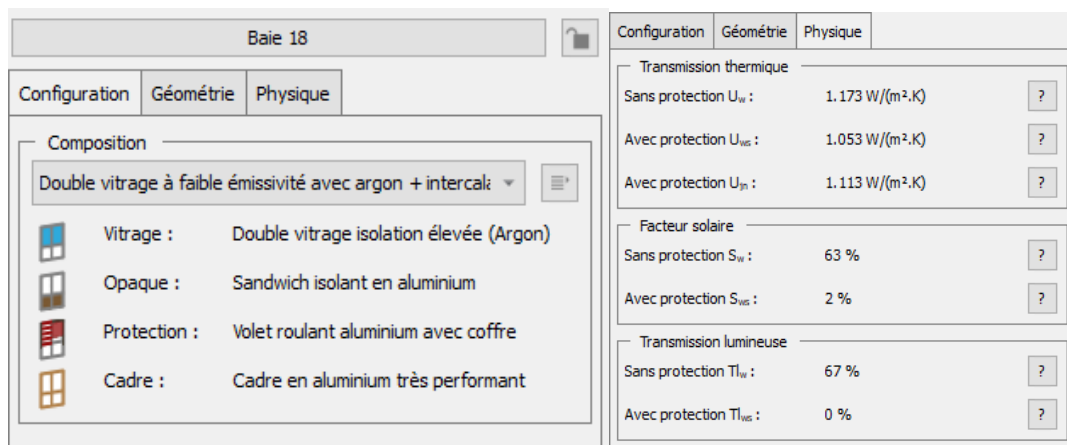


Figure 4.13: Composition du double vitrage (Source : auteur, 2025)

Le vitrage utilisé est un double vitrage à faible émissivité, composé de deux vitres séparées par une lame d'argon, un gaz inerte à faible conductivité thermique. Ce type de vitrage améliore considérablement l'isolation thermique par rapport à un vitrage simple, réduisant les transferts de chaleur par conduction et rayonnement. Les caractéristiques du vitrage (selon les données extraites du logiciel ArchiWizard) sont les suivantes :

- Transmission thermique U_w : 1,053 W/(m².K) avec protection solaire,
- Facteur solaire S_w : 2 % (avec volet roulant),
- Transmission lumineuse T_{lw} : 0 % (avec volet roulant).

Cela signifie que les apports solaires directs sont très limités, ce qui est cohérent avec l'usage d'un volet roulant intégré, et que la transmission thermique est fortement réduite.

- **Isolation du mur :** La paroi opaque reste identique à celle du scénario 2. Elle est composée d'un mur avec une couche d'isolant en laine de verre recyclée de 8 cm en remplacement de la lame d'air initiale.



Figure 4.14: Laine de verre recyclé (Source : <https://www.marieclaire.fr/>)

➤ **Résultat de simulation – Scénario 3 :**

- **Présentation du graphique annuel :** Le graphique ci-dessus représente l'évolution des températures intérieure et extérieure sur toute l'année calendaire (du 1er janvier au 31 décembre), dans la salle de lecture de la Maison de la Culture de Béjaïa, selon les résultats du Scénario 3. Ce scénario correspond à une configuration performante de l'enveloppe du bâtiment, combinant une paroi isolée à la laine de verre recyclée et un double vitrage à faible émissivité avec lame d'argon. Les courbes affichées traduisent les variations de la température extérieure (en gris), de la température de consigne de chauffage (en rouge), de la température de l'air intérieur (orange) et de la température opérative intérieure (jaune). Une ligne bleue horizontale marque la température de confort de référence fixée à 22,5 °C.

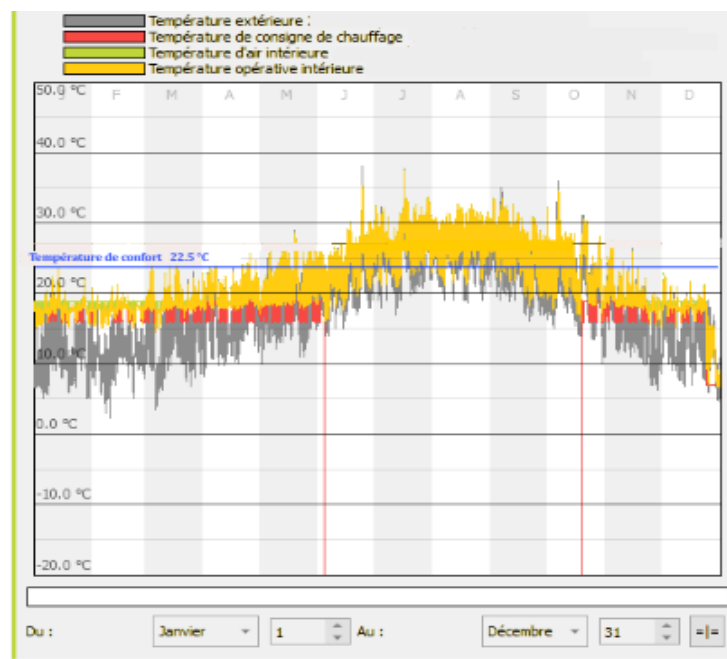


Figure 4.15: Évolution annuelle des températures intérieure et extérieure – Scénario 3 (mur isolé + double vitrage performant) (Source : auteur, 2025)

Sur l'ensemble de l'année, les températures extérieures varient fortement, allant de 2,3 °C en hiver à près de 38 °C en été, comme le confirme le fichier climatique intégré dans ArchiWizard. Malgré cette forte amplitude extérieure, la température intérieure simulée reste globalement stable et modérée, oscillant le plus souvent entre 19 °C et 26 °C.

Pendant l'hiver (de décembre à février), même lorsque les températures extérieures chutent en dessous de 10 °C, les températures intérieures restent entre 18 °C et 22 °C, avec un léger recours au chauffage passif (indiqué en rouge). L'enveloppe isolée

et le double vitrage permet ici de limiter les pertes de chaleur, assurant un bon niveau de confort sans besoin de chauffage intense.

Durant l'été (juin à septembre), les températures extérieures atteignent régulièrement 30 à 38 °C, mais les températures intérieures ne dépassent que rarement 26–27 °C. Cela démontre l'efficacité du vitrage à faible facteur solaire ($S_w = 2\%$), qui limite les apports solaires directs, notamment grâce à l'utilisation de volets roulants simulés fermés. Le bâtiment parvient donc à préserver la fraîcheur intérieure sans recours à la climatisation.

Enfin, pendant les intersaisons (mars-avril et octobre-novembre), les températures intérieures se stabilisent naturellement autour de 20 à 23 °C, sans besoin de régulation active. C'est durant ces périodes que la performance hygrothermique de l'enveloppe se montre la plus équilibrée.

Conclusion

L'étude comparative des trois scénarios de simulation hygrothermique a clairement mis en évidence l'importance des matériaux constituant les façades dans l'optimisation du confort intérieur des salles de lecture en climat méditerranéen. Les résultats montrent que l'association d'un mur isolé en laine de verre recyclée et d'un double vitrage performant permet d'approcher un équilibre hygrothermique plus stable et mieux maîtrisé. Cette configuration limite efficacement les variations de température et d'humidité, tout en se rapprochant des conditions de confort recommandées autour de 22,5 °C. La simulation numérique a ainsi permis de valider les hypothèses formulées : les propriétés thermiques et hydriques des parois influencent directement les conditions de confort intérieur, et leur amélioration contribue à la réduction des fluctuations climatiques internes et à la performance énergétique du bâtiment. Ces résultats répondent favorablement à la problématique posée et démontrent que l'optimisation des façades constitue un levier stratégique pour améliorer durablement le confort hygrothermique dans les bibliothèques en climat méditerranéen.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce mémoire a été conduit dans le but d'évaluer et d'optimiser le confort hygrothermique dans une salle de lecture située à la Maison de la Culture de Béjaïa, en s'appuyant sur une approche méthodologique rigoureuse alliant analyse théorique, étude empirique in situ et simulation numérique.

Dans un premier temps, une revue approfondie de la littérature a permis de cerner les fondements du confort hygrothermique, le rôle de la façade dans la performance thermique des bâtiments, ainsi que les normes et approches d'évaluation utilisées dans les contextes méditerranéens. Cette base théorique a été essentielle pour poser les hypothèses de recherche et structurer les investigations.

Ensuite, une campagne de relevés expérimentaux sur site a été réalisée le 27 avril 2025 à 13h, permettant de collecter des données objectives (température, humidité relative) et subjectives (questionnaire utilisateur) dans la salle de lecture. Ces données ont permis de mettre en lumière plusieurs dysfonctionnements hygrothermiques, notamment une faible inertie thermique, une humidité intérieure instable et un inconfort thermique notable exprimé par les usagers.

Une série de simulations numériques, réalisées à l'aide du logiciel ArchiWIZARD en lien avec une modélisation sur ArchiCAD, a permis d'évaluer les performances hygrothermiques de trois configurations de façade. Le premier scénario correspond à un mur standard associé à un simple vitrage. Le second scénario intègre une isolation en laine de verre recyclée tout en conservant le simple vitrage. Enfin, le troisième scénario combine ce mur isolé avec un double vitrage performant, offrant ainsi une configuration optimisée sur le plan thermique.

Les résultats de simulation ont confirmé les hypothèses de départ : le scénario 3 s'est révélé nettement supérieur, assurant une meilleure régulation thermique, une stabilité de l'humidité relative, et un confort hygrothermique proche des valeurs recommandées (autour de 22,5 °C). De plus, cette configuration optimise l'efficacité énergétique sans recourir à des solutions mécaniques coûteuses.

Ce travail a ainsi permis de : Valider scientifiquement l'impact de la façade sur le confort hygrothermique ; Comparer objectivement plusieurs solutions constructives dans un contexte méditerranéen ; Proposer une méthode reproductible d'évaluation à travers l'association relevés in situ et simulation.

Recommandations

- Intégrer systématiquement une isolation thermique performante des parois opaques dans les espaces de lecture.
- Privilégier les vitrages à faible facteur solaire pour limiter les apports thermiques excessifs.
- Favoriser les systèmes de ventilation naturelle croisée adaptés à l'orientation du bâtiment.
- Mettre en place des dispositifs de protection solaire actifs ou passifs (volets roulants, brise-soleil, etc.).
- Utiliser des outils de simulation dès la phase de conception afin d'anticiper le comportement hygrothermique.
- Former les professionnels du bâtiment à la conception bioclimatique dans les contextes méditerranéens.

Limites de la recherche

- L'étude a été conduite sur un seul bâtiment, ce qui restreint la portée et la généralisation des résultats obtenus.
- Les relevés hygrothermiques ont été réalisés à un moment spécifique de l'année (printemps), sans couvrir les variations saisonnières.
- La population cible pour l'enquête étant spécifique (usagers de la salle de lecture), la passation du questionnaire a été complexe à mettre en œuvre.
- Des obstacles administratifs ont ralenti ou compliqué plusieurs étapes de la recherche, notamment l'accès au site et la réalisation des relevés.
- Le matériel de mesure utilisé ne permettait pas une grande précision, faute d'instruments professionnels adaptés.

Perspectives de recherche

- Étendre l'étude à d'autres typologies de bâtiments publics (médiathèques, écoles, musées).
- Explorer l'impact de l'éclairage naturel et des apports solaires sur le confort intérieur.
- Simuler différentes saisons et scénarios climatiques futurs dans une perspective d'adaptation au changement climatique.

- Analyser le lien entre confort hygrothermique et performances cognitives dans les espaces éducatifs.
- Étudier d'autres matériaux biosourcés ou locaux (liège, terre crue, fibre de bois).

Bibliographie

ADEME. (2023). L'efficacité énergétique des bâtiments. Agence de la transition écologique. <https://www.ademe.fr>

Battles, M. (2003). Library: An Unquiet History. W. W. Norton & Company.

Bertrand, A. (2016). La bibliothèque Sainte-Geneviève : lumière, structure et espace. Éditions du Patrimoine.

Brager, G., & de Dear, R. (1997). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104(1), 145–167.

Failla, S. (2015). Architecture des bibliothèques contemporaines. Parenthèses.

Faure, S. (2007). La façade et l'identité architecturale : approche sociologique de l'enveloppe bâtie. *Urbanisme et Société*, 3(2), 45–61.

Green, M., Liu, Y., & Al-Hussein, M. (2023). Envelope adaptability and energy performance. *Journal of Building Engineering*, 62, 105324.

Ibañez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, et al. (2018). Thermal performance of ventilated façades in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 165, 63–77.

Khadraoui, H. (2020). Diagnostic et solutions adaptées pour l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une construction multizone énergivore (Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen).

Khadraoui, M. A. (2019). Étude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique : Cas des bâtiments tertiaires dans un climat chaud et aride (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra).

Koolhaas, R. (2014). Elements of Architecture. Taschen.

Kottas, D. (2017). Matériaux : Architecture et construction (Éd. 2016). Links.

Labrèche, S. (2014). Forme architecturale et confort hygrothermique dans les bâtiments éducatifs : Cas des infrastructures d'enseignement supérieur en régions arides (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra).

Lamrhari, E. D. (2018). Comportement thermique et économie d'énergie dans un appartement avec différentes mesures d'efficacité énergétique dans les six zones climatiques du Maroc (Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech).

Middleton, R. (2005). Henri Labrouste: Structure and Light. Princeton Architectural Press.

Mebarki, F. (2014). L'évolution des bibliothèques algériennes : entre conservation et confort d'usage. *Architecture et Patrimoine*, 7, 101–115.

Ruiz, M. (2023). Modélisation des transferts hygrothermiques à l'échelle urbaine (Thèse de doctorat, Université de Toulouse).

Stouhi, K. (2019). Les façades réactives et adaptatives. *Architecture Environnement*, 12(2), 40–48.

Vandermarcq, P. (2008). Les espaces de lecture à travers l'histoire : architecture et usages. *Revue de Bibliothéconomie*, 32(2), 75–88.

Xu, L. (2008). Architecture moderne et traditions chinoises dans les bibliothèques publiques. *Asian Architectural Review*, 15(1), 59–71.

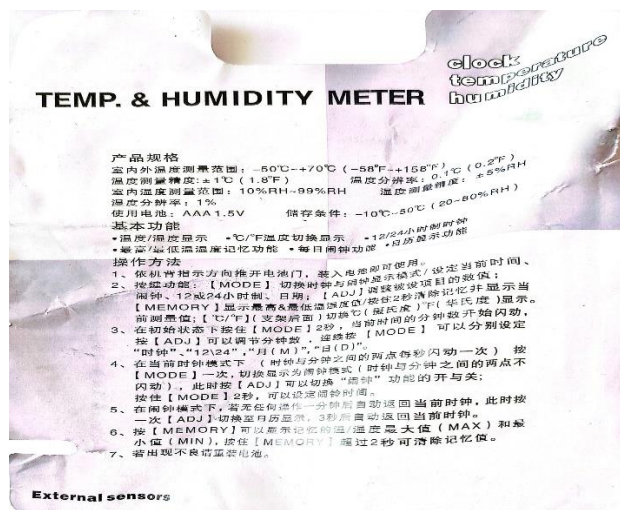
Yonnet, P. (2000). La bibliothèque comme lieu de sociabilité. *Sociologie de la culture*, 18(2), 23–35.

Zemella, G., De March, D., & Baggio, P. (2014). Façades adaptatives pour les climats méditerranéens : principes de conception. *Architectural Science Review*, 57(4), 275–286.

Annexes

Annexe A : Fiche technique de l'outil de mesure (Temp. & Humidity Meter)

L'appareil utilisé pour les relevés in situ est un **thermo-hygromètre numérique** multifonction, permettant la mesure de la température et de l'humidité relative à l'intérieur d'un local. Il intègre également des fonctions d'horloge, de mémorisation des valeurs extrêmes, et de commutation entre °C et °F.



➤ Fonctionnalités supplémentaires :

- Affichage de la température et de l'humidité en temps réel.
- Possibilité de mémoriser les valeurs maximum et minimum de température et d'humidité enregistrées pendant une session.
- Commutation possible entre unités °C et °F.
- Horloge intégrée (avec format 12h/24h), fonction alarme et affichage de la date.

➤ Limites de l'outil de mesure utilisé

- Précision insuffisante pour des études scientifiques approfondies ($\pm 1^{\circ}\text{C}$ et $\pm 5\% \text{RH}$).
- Absence de certification professionnelle ou d'étalonnage du fabricant.
- Aucune capacité d'enregistrement automatique ou d'exportation des données (relevés manuels uniquement).

Annexe B : Questionnaire

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira - Bejaia-



Questionnaire sur le confort hygrothermique dans la salle de lecture استبيان حول الراحة الحرارية والرطوبة في قاعة المطالعة

► Introduction / المقدمة

Dans le cadre d'un mémoire de fin d'études en architecture, une étude vise à étudier le confort hygrothermique dans les salles de lecture de la maison de la culture. Ce questionnaire a pour objectif d'évaluer le ressenti des usagers concernant la température, l'humidité, la ventilation, ainsi que l'influence des façades et des systèmes de chauffage/climatisation.

Les réponses sont anonymes et ne prendront que 5 minutes. Merci pour votre participation !

في إطار إعداد مذكرة التخرج في الهندسة المعمارية، تُجرى دراسة حول الراحة الحرارية والرطوبة في قاعات المطالعة في دار الثقافة بهدف هذا الاستبيان إلى تقييم شعور المستخدمين بدرجة الحرارة، الرطوبة، التهوية، وتأثير الواجهات وأنظمة التدفئة التكييف

الإجابات مجهولة الهوية ولن تستغرق سوى 5 دقائق. شكرًا للمشاركة !

► Section 1: Informations générales / المعلومات العامة

1. Sexe / الجنس : ☐ Homme / ذكر ☐ Femme / أنثى

2. Tranche d'âge / الفئة العمرية :

☐ Moins de 19 ans ☐ 19-25 ans / ☐ 26-35 ans / ☐ 36- 50 ans / ☐ Plus de 50 ans

3. Profession / المهنة : ☐ Étudiant(e) طالب | ☐ Employé(e) موظف ☐ Autre

4. Fréquence d'utilisation de la salle de lecture / عدد مرات استخدامك لقاعة المطالعة :

☐ Tous les jours / يوميًا ☐ Plusieurs fois par semaine / عدة مرات في الأسبوع

☐ Une fois par semaine / مرة واحدة في الأسبوع ☐ Moins d'une fois par semaine / أقل من مرة في الأسبوع

► Section 2: Sensation thermique / الإحساس بدرجة الحرارة

5. Comment évaluez-vous la température générale dans la salle de lecture ? / كيف تقيّم درجة الحرارة العامة في قاعة المطالعة ؟

☐ Très froide / شديدة البرودة ☐ Froide / باردة ☐ Confortable / معتدلة ☐ Chaude / دافئة ☐ Très chaude / شديدة الحرارة

6. Que faites-vous lorsque vous ressentez de la chaleur dans la salle de lecture ? / ماذا تفعل عندما تشعر بالحرارة داخل قاعة المطالعة ؟

- ☐ J'ouvre une fenêtre / أفتح نافذة ☐ J'utilise un éventail / أستخدم مروحة يدوية ☐ Je change de place / أغير مكاني
☐ Je sors temporairement / أخرج مؤقتًا ☐ Rien / لا أفعل شيئًا

Section 3: Humidité et qualité de l'air / الرطوبة وجودة الهواء

7. Ressentez-vous un niveau d'humidité confortable ? / هل تشعر بمستوى رطوبة مريح ؟

- ☐ Très sec / جاف جدًا ☐ Plutôt sec / جاف قليلًا ☐ Confortable / مناسب ☐ Plutôt humide / رطب قليلًا ☐ Très humide / رطب جدًا

8. L'air vous semble-t-il trop sec ? / هل يبدو لك الهواء جافًا جدًا ؟

- ☐ Jamais / أبدًا ☐ Rarement / نادرًا ☐ Parfois / أحيانًا ☐ Souvent / غالبًا ☐ Toujours / دائمًا

Section 4: Ventilation et renouvellement de l'air / التهوية وتجديد الهواء

9. Pensez-vous que la ventilation est suffisante ? / هل تعتقد أن التهوية كافية ؟

- ☐ Insuffisante / غير كافية تمامًا ☐ Plutôt insuffisante / غير كافية ☐ Moyenne / متوسطة ☐ Suffisante / كافية ☐ Très suffisante / كافية جدًا

10. Ressentez-vous un air stagnant ou mal renouvelé ? / هل تشعر بوجود هواء راكد أو غير متجدد ؟

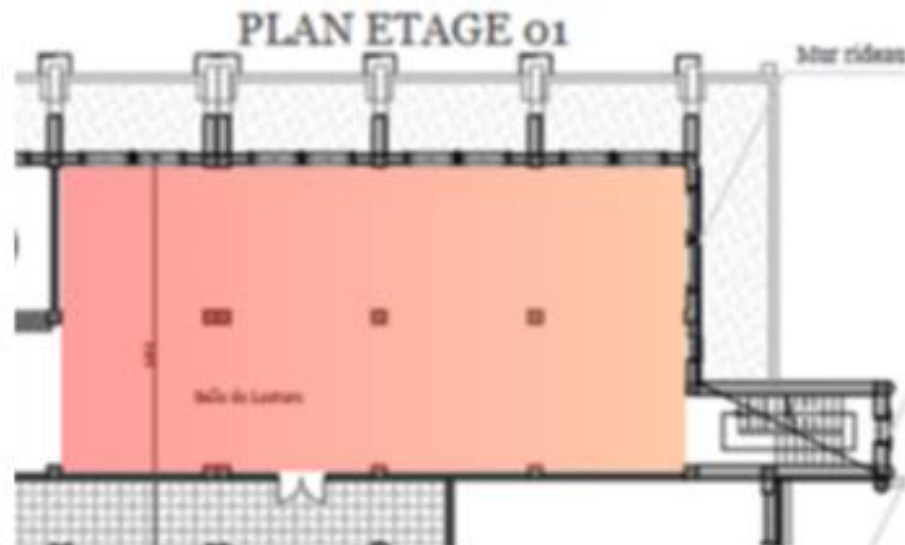
- ☐ Jamais / أبدًا ☐ Rarement / نادرًا ☐ Parfois / أحيانًا ☐ Souvent / غالبًا ☐ Toujours / دائمًا

Section 5: Influence des façades et des fenêtres / تأثير الواجهات والنوافذ

11. Où vous asseyez-vous généralement dans la salle ? / أين تجلس عادةً في القاعة ؟

(Veuillez indiquer sur le plan où vous étiez lors de votre visite.)

(يرجى تحديد مكان تواجدك داخل القاعة أثناء زيارتك)



12. Dans quelle zone de la pièce ressentez-vous le plus le froid ou la chaleur ? / في أي منطقة من الغرفة تشعر بأكبر تأثير للبرد أو الحرارة ؟

- ☐ Près d'une fenêtre / بالقرب من النافذة ☐ Loin des fenêtres / بعيدًا عن النوافذ ☐ Peu importe / لا يهمني

► Section 6: Climatisation / التكييف

13. Ressentez-vous le besoin d'utiliser la climatisation lorsqu'il fait chaud dehors ? / هل تشعر بالحاجة لاستخدام التكييف عندما يكون الجو حارًا في الخارج؟

- ☐ Oui, toujours / دائمًا نعم, ☐ Parfois, quand il fait vraiment chaud / جدًا عندما يكون الجو حارًا جدًا ☐ Non, je m'adapte à la chaleur / لا، أنا أقلم مع ☐ Non, je préfère ouvrir les fenêtres / لا، أفضل فتح النوافذ ☐ Cela dépend de l'humidité / هذا يعتمد على الرطوبة الحرارة

► Section 7: Confort général et suggestions / الراحة العامة والمقترحات

14. Comment évaluez-vous votre confort thermique et hygrométrique dans la salle ? / كيف تقيم راحتك الحرارية والرطوبة في الغرفة؟

- ☐ Très inconfortable / غير مريحة تمامًا ☐ Inconfortable / غير مريحة ☐ Moyenne / متوسطة ☐ Confortable / مريحة ☐ Très confortable / مريحة جدًا

15. Quelles améliorations suggérez-vous ? (plusieurs choix possibles) / ما هي التحسينات التي تقترحها؟ (يمكن اختيار أكثر من خيار)

- ☐ Améliorer la ventilation naturelle / تحسين التهوية الطبيعية ☐ Chauffage plus efficace / تدفئة أكثر كفاءة ☐ Meilleure climatisation / تحسين العزل الحراري ☐ Améliorer l'isolation des façades / توفير تحكم شخصي بدرجة الحرارة ☐ Offrir un contrôle personnel de la température ☐ اللواجهات

Merci pour votre participation ! Vos réponses aideront à mieux comprendre les conditions actuelles et à proposer des solutions adaptées pour améliorer le confort.

شكراً لمشاركتك! إجاباتك ستساعد في فهم الظروف الحالية بشكل أفضل واقتراح حلول مناسبة لتحسين الراحة

Annexe C : Photos de la salle de lecture et des prises de mesure : Cette image présente la salle de lecture dans son état réel d'occupation. Elle met en évidence la disposition spatiale, l'ouverture vers l'extérieur, ainsi que l'organisation des postes de lecture. Photographie montrant l'emplacement choisi pour les relevés in situ de température et d'humidité. L'appareil est posé à hauteur moyenne, à l'abri de l'exposition directe au soleil ou des flux d'air.



Annexe D : Étapes de création de la maquette ArchiWIZARD

1. Importation de la maquette depuis ArchiCAD

La maquette 3D de la salle de lecture a d'abord été modélisée sur ArchiCAD, puis elle a été exportée au format IFC (Industry Foundation Classes). Ce format standardisé permet de transférer les données géométriques et constructives vers ArchiWIZARD tout en conservant la structure BIM.

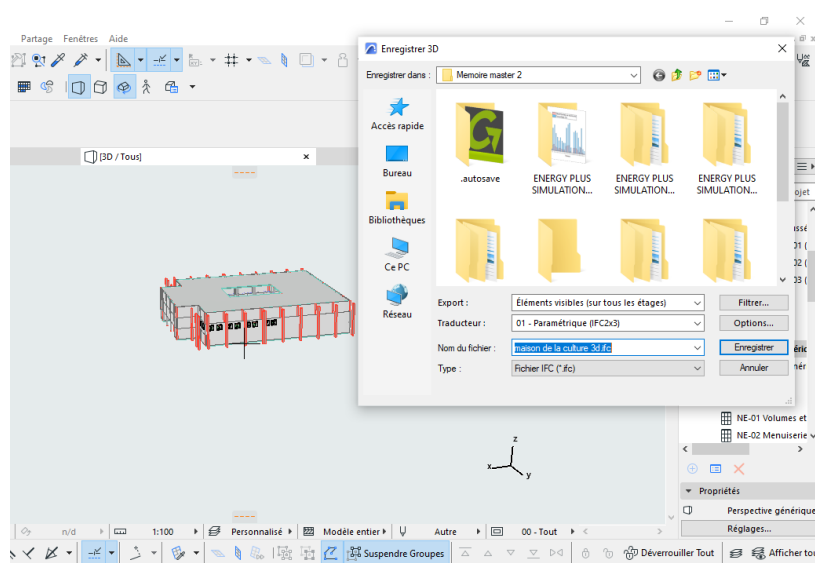


Figure D.1 : Importation de la maquette depuis ArchiCAD a ArchiWIZARD en format ifc (Source : auteur, 2025).

2. Paramétrage climatique et orientation du bâtiment

Après l'ouverture de la maquette sur ArchiWIZARD, un fichier climatique correspondant à la ville de Béjaïa a été importé afin d'assurer la précision des simulations.

Par la suite, l'orientation exacte du bâtiment a été réglée selon les relevés effectués sur site ou via plans, en alignant la maquette avec le nord géographique.

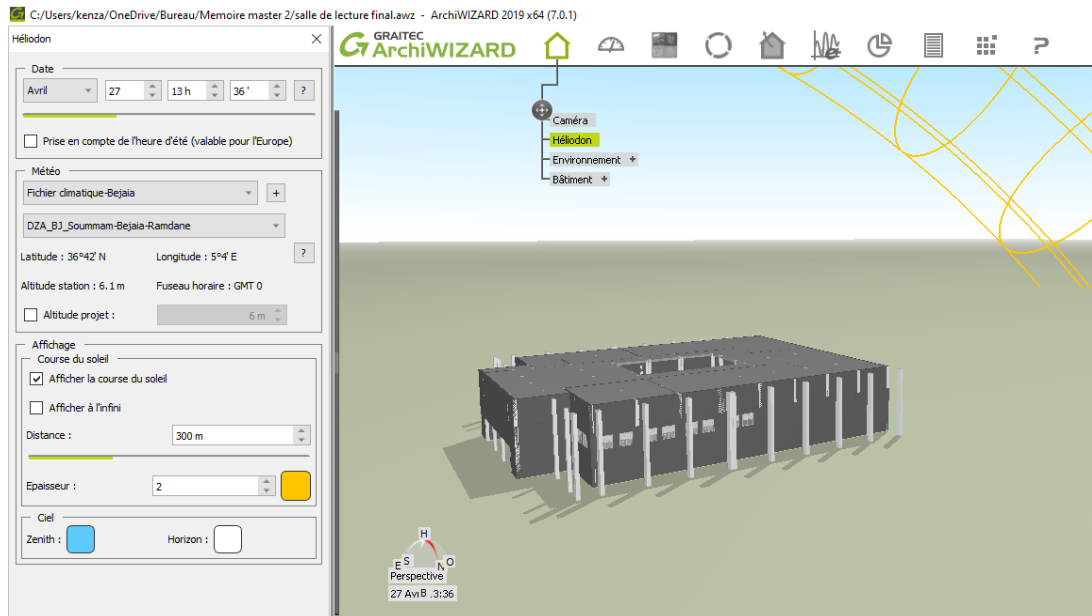


Figure D.2 : 2. Paramétrage climatique et orientation du bâtiment (Source : auteur, 2025).

3. Définition des zones à étudier dans la maquette

ArchiWIZARD permet de découper le bâtiment en volumes distincts (zones), chacun correspondant à un espace fonctionnel. Dans ce cas, la salle de lecture a été isolée comme zone d'étude principale, tandis que les autres parties du bâtiment (couloirs, réserves, autres salles) ont été ignorées, pour concentrer la simulation sur la zone ciblée.



Figure D.3 : Définition des zones à étudier dans la maquette (Source : auteur, 2025).

4. Paramétrage des parois opaques et vitrées

Une étape essentielle a consisté à paramétrer les caractéristiques thermiques des parois constituant l'enveloppe de la zone simulée. Dans ArchiWIZARD, chaque paroi (mur, dalle, toiture, vitrage) a été associée à un type de matériau sélectionné depuis la base de données du logiciel ou défini manuellement sur la base des propriétés techniques connues.

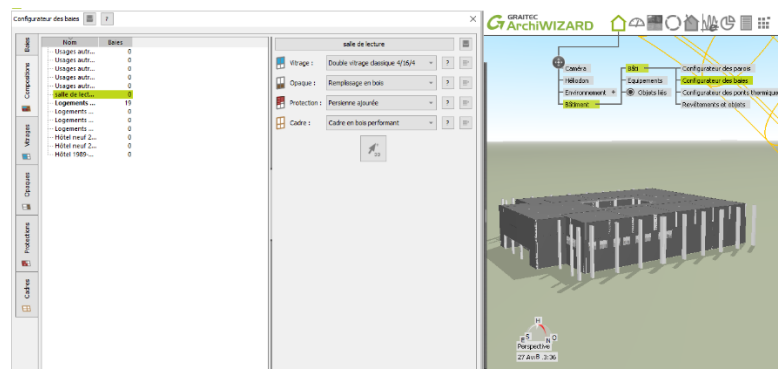


Figure D.4 : paramétrage des baies sur archiwizard (Source : auteur, 2025).

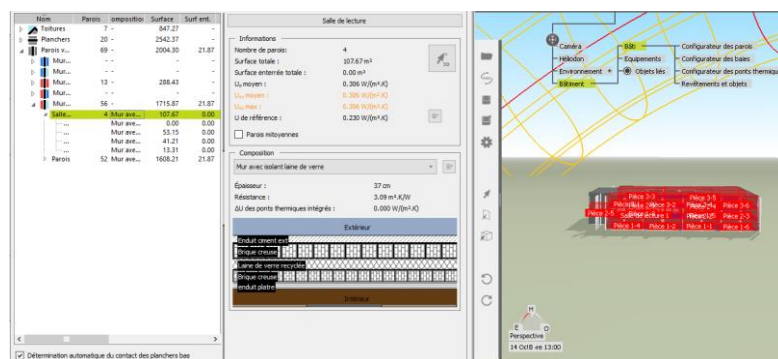


Figure D.5 : paramétrage des murs sur archiwizard (Source : auteur, 2025).

5. Lancement de la simulation à l'aide du moteur EnergyPlus

Une fois tous les paramètres définis (zones, matériaux, conditions climatiques, orientation), la simulation a été lancée en utilisant le moteur EnergyPlus, intégré à ArchiWIZARD.

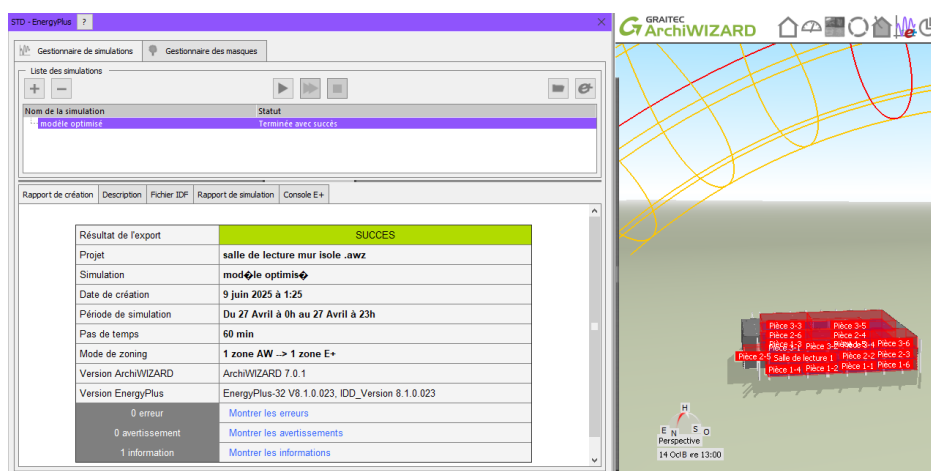


Figure D.6 : Lancement de la simulation avec energy plus (Source : auteur, 2025).