

Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers de la Ville

Filière : Architecture

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES DE MASTER

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Architecture et dans le
but de créer une startup ou d'obtenir un brevet dans le cadre du Décret

Ministériel 1275

THÈME

**Effet du rafraîchissement évaporatif sur le confort
thermique des bâtiments publics : Étude de cas d'un
centre de recherche à Chlef.**

Présenté par : KAHLERRAS Karima

Soutenu publiquement le 29 juin 2025, devant le jury composé de :

Mme. BENCHENNI Fatima	MCB	Université de Mostaganem	Présidente
Dr. BENAMEUR Okba	MCA	Université de Mostaganem	Encadrant
Mme. BOUCHAAR Rafika	MAA	Université de Mostaganem	Examinatrice
Mr. GACEM Nadhir	MAA	Université de Mostaganem	Examinateur
Mr. MEDJAHED Mostefa	Professeur	Université de Mostaganem	Représentant de l'incubateur
Mr. IDJRI Mohamed	Architecte	Chef du Service Valorisation et Sensibilisation (EPIC-CET) Mostaganem	Représentant du partenaire socio- économique

Année Académique 2024/2025

REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude, notre reconnaissance et nos sincères remerciements à Allah, le Tout-Puissant, Clément et Miséricordieux, qui nous a accordé la force, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude la plus sincère envers notre directeur de recherche, le Dr Benameur Okba, pour son encadrement inestimable, et en particulier pour sa disponibilité constante et ses précieux conseils, qui ont rendu ce travail possible.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours scolaire, contribuant ainsi à l'enrichissement de nos connaissances et de notre savoir.

Nous n'oublions pas non plus les membres du jury, Mme Benchenni, Mme Bouchaar et Mr Gacem, qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien, de près ou de loin, pour la réalisation de ce projet de fin d'études.

DÉDICACE

À MES CHERS PARENTS

Pour votre amour, vos sacrifices et votre soutien indéfectible. Vous êtes la base de tout ce que je suis devenue.

À MES FRÈRES ET MES SŒURS

Merci pour votre présence, vos encouragements et votre complicité précieuse.

À MES BELLES-SŒURS ET BEAUX-FRÈRES

Pour votre gentillesse et vos mots bienveillants qui m'ont toujours portée.

À MES CHÈRES COPINES ROMAÏSSA ET NOURHANE

Pour votre amitié sincère, votre soutien constant et vos moments de joie inoubliables.

À MES AMIS ET À MA FAMILLE

Pour votre confiance, vos encouragements et votre présence.

À MON CHER ENCADRANT

Je vous adresse toute ma reconnaissance pour votre accompagnement, vos conseils précieux et votre patience tout au long de ce projet. Votre rigueur et votre bienveillance ont été pour moi une véritable source d'inspiration et de motivation. Merci du fond du cœur.

MONSIEUR BEN BACHA

Nous tenons également à remercier Monsieur Ben Bacha pour son aide précieuse et son soutien tout au long de cette aventure. Sa disponibilité et ses précieux conseils nous ont été d'une grande aide.

MERCI À TOUS.

Résumé

Dans les régions chaudes et arides comme la wilaya de Chlef en Algérie, assurer le confort thermique dans les bâtiments représente un défi croissant en raison de la hausse des températures et de la dépendance accrue aux systèmes de climatisation énergivores. Le design bioclimatique offre une alternative durable en misant sur des stratégies passives — notamment le refroidissement par évaporation, particulièrement efficace en climat sec grâce à l'évaporation naturelle de l'eau. Traditionnellement intégré à l'architecture à travers des éléments comme les moucharabiehs, ce procédé peut désormais être repensé et optimisé grâce aux outils numériques. Ce mémoire de master explore l'intégration de la conception paramétrique (Grasshopper) et de la simulation par dynamique des fluides (CFD) pour optimiser les systèmes de refroidissement par évaporation. En modélisant numériquement des moucharabiehs, l'étude propose des enveloppes bâties adaptatives, capables de réagir dynamiquement aux conditions climatiques, tout en améliorant les performances thermiques et en réduisant la consommation énergétique. Cette recherche s'inscrit dans la stratégie nationale d'innovation en Algérie, notamment dans le cadre des partenariats entre le ministère de l'Enseignement supérieur et celui de l'Économie de la connaissance, et ouvre la voie à une éventuelle initiative entrepreneuriale visant à diffuser des solutions de construction durables et technologiques dans les zones arides. Les résultats montrent que l'alliance entre les techniques passives traditionnelles et les outils de conception et de simulation avancés peut générer des solutions scalables, à la fois innovantes et enracinées dans le contexte culturel local.

MOTS CLES : Consommation Énergétique, Confort Thermique, Moucharabieh, Rafraîchissement Évaporatif, CFD, Grasshopper, Climats Secs et Chauds, Startup.

Abstract

In hot and arid regions such as the wilaya of Chlef in Algeria, ensuring thermal comfort in buildings is an increasing challenge due to rising temperatures and the growing reliance on energy-intensive cooling systems. Bioclimatic design presents a sustainable alternative by employing passive strategies—particularly evaporative cooling, which is highly effective in dry climates through the natural process of water evaporation. Traditionally integrated into architecture through elements like *moucharabiehs*, this technique can now be reimagined and enhanced using digital tools. This master's thesis explores the integration of parametric design (Grasshopper) and Computational Fluid Dynamics (CFD) to optimize evaporative cooling systems. By digitally modeling *moucharabiehs*, the study develops climate-responsive building envelopes that dynamically adapt to environmental conditions, improving thermal performance while minimizing energy consumption. The research is aligned with Algeria's national innovation strategies—especially those encouraging synergy between higher education and the knowledge economy—and lays the groundwork for a potential startup aimed at promoting energy-efficient, tech-driven solutions for sustainable construction in hot climates. The results demonstrate the potential of combining traditional passive techniques with advanced computational methods, offering architects and engineers a scalable and culturally relevant approach to sustainable design in arid environments.

Keywords: Energy Consumption, Thermal Comfort, Moucharabieh, Evaporative Cooling, CFD, Grasshopper, Dry and Hot Climates, Startup.

ملخص

في المناطق الحارة والجافة مثل ولاية الشلف بالجزائر، يُعدّ تحقيق الراحة الحرارية داخل المباني تحدياً متزايداً، نتيجة ارتفاع درجات الحرارة والاعتماد المتنامي على أنظمة التبريد التقليدية التي تستهلك كميات كبيرة من الطاقة. وفي هذا السياق، يقدّم التصميم البيومناخي بديلاً مستداماً من خلال اعتماد استراتيجيات سلبية، وعلى رأسها التبريد بالتبخير، الذي يُثبت فعاليته في المناخات الجافة نظراً لخصائص تبخر المياه. وقد استُخدمت هذه التقنية قديماً عبر عناصر معمارية تقليدية مثل المشربيات، التي يمكن اليوم إعادة تصورها وتطويرها بفضل الأدوات الرقمية الحديثة. تهدف هذه المذكرة إلى استكشاف سبل دمج التصميم البارامتري (Grasshopper) مع المحاكاة الديناميكية للسوائل (CFD) بغرض تحسين أداء أنظمة التبريد بالتبخير. ومن خلال النمذجة الرقمية للمشربيات، تُقترح أغلفة معمارية تفاعلية قادرة على الاستجابة الذكية للظروف المناخية المحيطة، بما يُعزز الأداء الحراري للمبنى ويُساهم في تقليل استهلاك الطاقة. وتندرج هذه الدراسة ضمن التوجه الوطني الرامي إلى دعم الابتكار في الجزائر، في إطار التعاون القائم بين وزارة التعليم العالي والبحث العلمي ووزارة اقتصاد المعرفة. كما تمهد هذه المبادرة الطريق لتأسيس مشروع ناشئ يُعنى بتطوير حلول معمارية ذكية ومستدامة تلائم خصوصيات المناطق الجافة. وتُبرز النتائج أن الدمج بين الموروث المعماري التقليدي والتقنيات الرقمية المتقدمة قد يُفضي إلى حلول قابلة للتطوير، تجمع بين الابتكار المعاصر والهوية الثقافية المحلية.

الكلمات المفتاحية: استهلاك الطاقة، الراحة الحرارية، المشربية، التبريد التبخيري والتبريد بالتبخير، CFD ، Grasshopper، المناخ الجاف والحر، مشروع ناشئ.

Table des matières

Remerciement	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص	VI
Table des matières	VII
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Introduction :	2
Problématique :	4
Objectifs et intentions :	5
Hypothèses :	6
Méthodologie :	6
Structure du mémoire :	7
PARTIE I : CADRE THEORIQUE ET ARCHITECTURAL	9
CHAPITRE 01 : Architecture bioclimatique entre confort thermique et consommation énergétique	10
Introduction :	11
1.1. Architecture bioclimatique :	12
1.1.1. Définition de l'architecture bioclimatique :	12
1.1.2. Les stratégies de l'architecture bioclimatique :	13
1.1.3. Les principes de l'architecture bioclimatique :	15
1.2. Le confort thermique :	22
1.2.1. Les paramètres influant le confort thermique :	22
1.2.2. Les échanges thermiques du corps humain :	23
1.3. La consommation énergétique :	25
1.3.1. L'efficacité énergétique :	25
1.3.2. L'impact de la consommation d'énergie sur l'environnement :	26
Conclusion :	26
CHAPITRE 02 : Le rafraîchissement évaporatif et les moucharabiehs	28
Introduction :	29
2.1. Système de rafraîchissement par évaporation :	29
2.1.1. Concept et théorie du rafraîchissement par évaporation :	29
2.1.2. Classification de la technologie de rafraîchissement par évaporation :	30
2.1.3. Études des systèmes de rafraîchissement par évaporation :	32
2.2. Les moucharabiehs	35
2.2.1. Origine et principes des moucharabiehs	35
2.2.2. Impact des moucharabiehs	35
2.2.3. Études sur l'effet du moucharabieh :	37
Conclusion :	39
CHAPITRE 03: L'architecture des espaces de recherche scientifique	40

Introduction.....	41
3.1. Définitions clés :.....	41
3.2. Centre de recherche universitaire :.....	41
3.2.1. Définition :.....	41
3.2.2. Public cible et objectifs :.....	42
3.3. Disposition spatiale et exigences techniques :.....	42
3.3.1. Laboratoire de recherche :.....	42
3.3.2. Projection et conférence :.....	43
3.3.3. Bureaux de travail :.....	44
3.3.4. Bibliothèque et médiathèque :.....	44
Conclusion :.....	45
CHAPITRE 04 : Analyse thématique.....	46
Introduction :.....	47
4.1. Tasik Creative and Innovation Center :.....	47
4.1.1. Fiche technique :.....	47
4.1.2. Motivation de choix :.....	48
4.1.3. Situation :.....	48
4.1.4. Accessibilité :.....	48
4.1.5. Volumétrie :.....	49
4.1.6. Façades :.....	49
4.1.7. Analyse spatio- fonctionnelle :.....	50
4.2. Greenpoint Library and Environmental Education Center :.....	52
4.2.1. Fiche technique :.....	52
4.2.2. Motivation de choix :.....	52
4.2.3. Situation :.....	53
4.2.4. Accessibilité :.....	53
4.2.5. Volumétrie :.....	53
4.2.6. Façades :.....	54
4.2.7. Analyse spatio-fonctionnelle :.....	55
4.3. Watt family innovation Center :.....	57
4.3.1. Fiche technique :.....	57
4.3.2. Motivation de choix :.....	57
4.3.3. Situation :.....	58
4.3.4. Accessibilité :.....	58
4.3.5. Volumétrie :.....	58
4.3.6. Façades :.....	59
4.3.7. Analyse spatio-fonctionnelle :.....	60
Synthèse de l'analyse thématique :.....	62
CHAPITRE 05 : Analyse du site.....	63
Introduction :.....	64
5.1. Présentation du cas d'étude :.....	64
5.1.1. Situation géographique du cas d'étude :.....	64
5.1.2. Aperçu historique :.....	64
5.1.3. Analyse climatique :.....	65
5.2. Présentation de site intervention :.....	69
5.2.1. Situation :.....	69

5.2.2. Points de repères :	70
5.2.3. Voirie et accessibilité :	70
5.2.4. Vent dominant et climat	71
5.2.5. État des hauteurs et fonction	71
5.2.6. Topographie du terrain:	71
5.2.7. Délimitation du terrain:	72
Synthèse de l'analyse du site :	73
CHAPITRE 06 : Projet architectural	74
Introduction :	75
6.1. Processus de conception architecturale :	75
6.1.1. Programmation :	75
6.1.2. Schéma de principe :	78
6.1.3. Genèse du projet :	79
6.2. Dossier graphique :	83
PARTIE II : PROJET STARTUP	85
CHAPITRE 07 : Projet innovant et BMC	86
Introduction :	87
7.1. Premier axe : Présentation du projet :	88
7.1.1. L'idée de projet (solution proposée) :	88
7.1.2. Les valeurs proposées :	89
7.1.3. Objectifs du projet :	89
7.1.4. Calendrier de réalisation du projet :	90
7.2. Deuxième axe : Aspects innovants	91
7.2.1. Nature des innovations :	91
7.2.2. Domaines d'innovation :	91
7.3. Troisième axe : Analyse stratégique du marché	92
7.3.1. Le segment du marché :	92
7.3.2. Mesure de l'intensité de la concurrence :	93
7.3.3. La stratégie marketing :	94
7.4. Quatrième axe : Plan de production et d'organisation	94
7.4.1. Le Processus de production :	94
7.4.2. L'Approvisionnement :	95
7.4.3. La main d'œuvre :	95
7.4.4. Les principaux partenaires :	96
7.5. Cinquième axe : Plan financier	96
7.6. Sixième Axe : Prototype expérimental	99
7.6.1. Description du prototype :	99
7.6.2. Modélisation et simulation :	101
7.6.3. Résultat et interprétations :	104
CONCLUSION GÉNÉRALE	110
Références bibliographiques :	112

Liste des figures

Figure 1 : Schématisation du phénomène d'îlot de chaleur urbain (Source: Cerema.fr, 2025).....	2
Figure 2 : Émissions de gaz à effet de serre par secteur (Source: Atlas climatique. Canada, 2025).....	3
Figure 3 : Objectifs de recherche (Source: Auteur).....	5
Figure 4 : Diagramme de l'approche méthodologique (Source: Auteur).....	6
Figure 5 : La trilogie de l'architecture bioclimatique (Source: Courgey& Oliva, 2010).....	12
Figure 6 : La stratégie du chaud et la stratégie du froid (Source: Khadraoui, 2019).....	14
Figure 7 : La stratégie de l'éclairage naturel (Source: Liébard et De Herde, 2005).....	14
Figure 8 : L'orientation optimale (Source: Thierry et al, 2017).....	16
Figure 9 : La trajectoire du soleil (Source: Givoni,1978).....	16
Figure 10 : La compacité (Source: carapace habitat, 2025).....	17
Figure 11 : Organisation des espaces habités (Source: carapace habitat, 2025).....	18
Figure 12 : Types de dispositifs de protection solaire (Source: Carapace habitat, 2025).....	19
Figure 13 : Ventilation par convection naturelle (Source : Atelier Nova, 2025).....	20
Figure 14 : Interaction thermique entre le corps humain et son environnement (Source: Guidenr HQE, 2025).....	24
Figure 15 : Schéma de système DEC (Source: Evapoler, 2025).....	31
Figure 16 : Schéma de système IEC (Source: Evapoler, 2025).....	31
Figure 17 : Schéma de système IDEC (Source: Evapoler, 2025).....	32
Figure 18 : Les technologies de rafraîchissement par évaporation (Source: Abada, 2021).....	34
Figure 19 : Système de moucharabieh (Source: Alotman, 2017).....	35
Figure 20 : L'effet rafraîchissant du moucharabieh par le processus d'évapotranspiration (Source: Özsavaş Akçay & Alotman, 2017).....	36
Figure 21 : Vues du moucharabieh (Source : Özsavaş Akçay & Alotman, 2017).....	37
Figure 22 : Exigences techniques d'un laboratoire de recherche (Source: Jean-michel, 2009).....	43
Figure 23 : Amphithéâtre de 200 places (Source: Jean-michel, 2009).....	43
Figure 24 : Surface d'un poste de travail (Source: Jean-michel, 2009).....	44
Figure 25 : Distance minimale entre les tables (Source: Jean-michel, 2009).....	45
Figure 26 : Tasik Creative and Innovation Center (Source: Andreaswidi, Archidaily, 2023).....	47
Figure 27 : Plan de situation (Source: Arch20, 2023).....	48
Figure 28 : Plan de masse (Source: Arch20, 2023).....	48
Figure 29 : Volumétrie de Tasik creative and innovation center (Source: Arch20, 2023).....	49
Figure 30 : Façades en tissu semi-transparent (Source: Andreaswidi, Archidaily, 2023).....	49
Figure 31 : Axonométrie éclatée (Source: Arch20, 2023).....	50
Figure 32 : Plans des étages (Source: Auteur d'après arch20, 2023).....	51
Figure 33 : Greenpoint Library and Environmental Education Center (Source: Michael, Archidaily, 2020).....	52
Figure 34 : Plan de situation (Source: Michael, Archidaily, 2020).....	53
Figure 35 : Plan de masse (Source: Michael, Archidaily, 2020).....	53
Figure 36 : Volumétrie du bâtiment (Source: Michael, Archidaily, 2020).....	54

Figure 37 : Façade bioclimatique (Source: Marble Fairbanks Architects, Archidaily ,2020)	54
Figure 38 : Les matériaux extérieurs(Source: Michael,Archidaily, 2020)	55
Figure 39 : Plans des étages (Source: Auteur d'après Marble Fairbanks Architects,Archidaily, 2020)	56
Figure 40 : Watt family innovation Center (Source: Jonathan & Michelle, Archidaily, 2016)	57
Figure 41 : Plan de situation (Source: Perkins & Will ,Archidaily, 2016)	58
Figure 42 : Plan de masse (Source: Perkins & Will, Archidaily, 2016)	58
Figure 43 : Volumétrie du bâtiment (Source: Perkins & Will, Archidaily, 2016)	59
Figure 44 : Façade principale(Source: Jonathan & Michelle, Archidaily, 2016)	60
Figure 45 : Plans des étages (Source: Auteur d'après Perkins & Will, Archidaily, 2016)	61
Figure 46 : La carte d'évolution de la ville de Chlef	65
Figure 47 : Les données climatique du température saisonnière Chlef (Source: Weatherspark, 2024)	66
Figure 48 : Le diagramme de précipitation Chlef (Source: Metblue, 2025)	67
Figure 49 : Direction et intensité des vents dominants à Chlef (Source: Metblue, 2025)	68
Figure 50 : Le diagramme d'humidité Chlef (Source : Metblue, 2025)	68
Figure 51 : Situation du site (Source: Google earth, 2025)	69
Figure 52 : Les points de repères (Source: Auteur)	70
Figure 53 : Accessibilité (Source: Auteur)	70
Figure 54 : Trajectoire du soleil (Source: Auteur)	71
Figure 55 : État des hauteurs et fonction (Source: Auteur)	71
Figure 56 : Topographie du terrain (Source: Auteur)	72
Figure 57 : Délimitation du terrain (Source: Auteur)	72
Figure 58 : Les entités fondamentales du projet (Source: Auteur)	76
Figure 59 : Schéma de principe (Source: Auteur)	78
Figure 60 : Étape 01 (Source: Auteur)	79
Figure 61 : Étape 02 (Source: Auteur)	80
Figure 62 : Étape 03 (Source: Auteur)	81
Figure 63 : Étape 04 (Source: Auteur)	81
Figure 64 : Étape 05 (Source: Auteur)	82
Figure 65 : Plan de masse (Source: Auteur)	83
Figure 66 : Façade Nord (Source: Auteur)	84
Figure 67 : Façade Est (Source: Auteur)	84
Figure 68 : Le Processus de production	95
Figure 69 : Schéma de fonctionnement	100
Figure 70 : Disposition des panneaux sur la façade	100
Figure 71 : Méthodologie et étape de travail	101
Figure 72 : Logo du logiciel Rhinoceros + Grasshopper (Source: Cove, 2025)	102
Figure 73 : Interface Rhino (Source: Pointify.be, 2025)	103
Figure 74 : L'interface de COMSOL (Source: comsol.fr, 2025)	103
Figure 75 : Carte thermique 3D d'un espace clos modélisé sous COMSOL Multiphysics (Source: Zalesak, 2025)	104
Figure 76 : Visualisation de la géométrie sur Rhino (Sans Protection)	105
Figure 77 : Visualisation de la géométrie sur Rhino (Avec Protection)	105

Figure 78 : Radiation solaire transmise selon chaque façade	106
Figure 79 : L'analyse énergétique de la façade sud	107
Figure 80 : L'analyse énergétique de la façade Ouest/ est	108
Figure 81 : Visualisation de simulation sur Comsol Multiphysics	109

Liste des tableaux

Tableau 1 : Types d'enveloppe architecturale (Source: Auteur d'après Mehira, 2021) ...	21
Tableau 2 : Tableau comparatif des systèmes de refroidissement par évaporation (Source: Auteur)	33
Tableau 3 : Tableau comparatif des études sur l'effet du moucharabieh (Source: Auteur)	38
Tableau 4 : Programme quantitatif (Source: Auteur)	77
Tableau 5 : Calendrier de réalisation du projet	90
Tableau 6 : Investissement	98
Tableau 7 : Achat directs	98
Tableau 8 : Masse salariale	98
Tableau 9 : Charges externes	99
Tableau 10 : Synthèse	99

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction :

La planète souffre de nombreuses perturbations et de changements climatiques qui ont un impact négatif sur l'environnement. La plupart de ces changements se manifestent dans certaines régions par des hausses de température. C'est ce que révèle le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dans son 6^{ème} rapport d'évaluation (AR6) publié en 2023. Dans ce rapport, il constate notamment que la hausse de la température globale s'est encore accentuée et que la vulnérabilité des écosystèmes et des populations s'accroît. Si plusieurs de ces aspects sont inhérents aux bouleversements climatiques, d'autres sont la conséquence des modes d'urbanisme et des choix architecturaux.

Au niveau des centres urbains, l'effet d'îlot de chaleur est le problème le plus connu. Selon le Cerema (2025), le climat évolue, avec des vagues de chaleur plus fréquentes depuis 30 ans. Celles-ci sont amenées à se multiplier et à s'amplifier considérablement d'ici 2100. Associé à l'augmentation de la population et à la densification urbaine, le changement climatique accentuera le phénomène des îlots de chaleur urbains (ICU), c'est-à-dire une élévation de la température de l'air et de surface aux centres-villes par rapport aux périphéries, particulièrement durant la nuit.

Ce phénomène a des impacts variés : conséquences sur la santé et le bien-être des habitants, sur la « praticabilité » de l'espace public et donc sur l'attractivité des centres-villes, sur les consommations énergétiques (climatisation), sur la résilience des infrastructures et des réseaux urbains, ainsi que sur le maintien de la biodiversité animale et végétale.

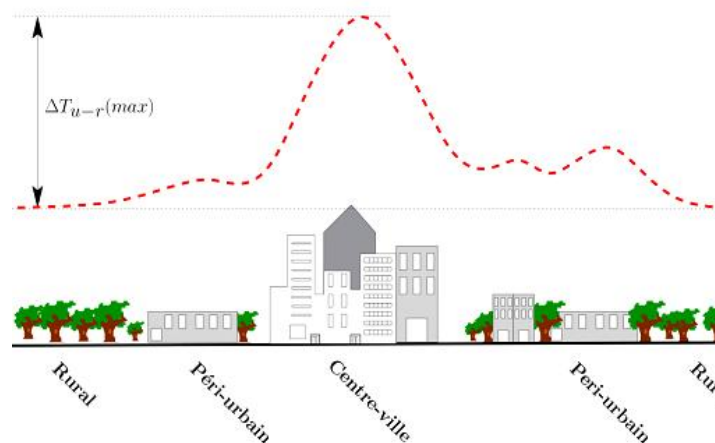


Figure 1: Schématisation du phénomène d'îlot de chaleur urbain (Source: Cerema.fr, 2025)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De plus, les changements climatiques et l'augmentation de la température de l'air, liés aux gaz à effet de serre, sont les principaux facteurs du bouleversement de la planète. Ce phénomène, largement causé par les activités humaines telles que l'industrie et les transports, dégrade la qualité de l'air.

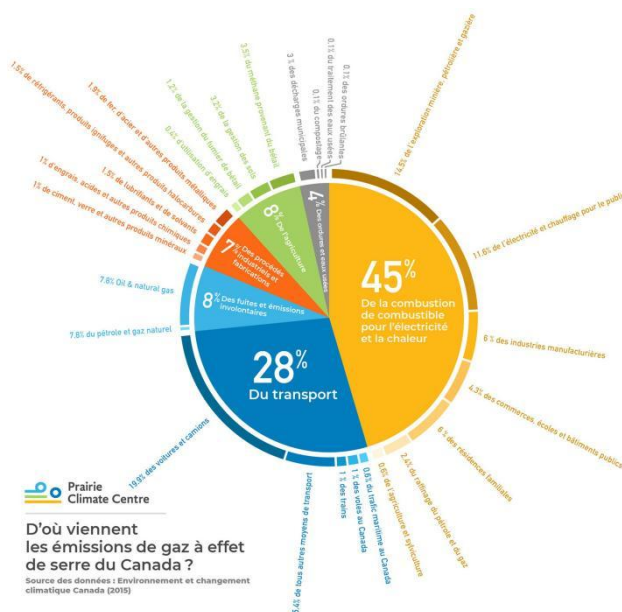


Figure 2: Émissions de gaz à effet de serre par secteur (Source: Atlas climatique. Canada, 2025)

Jean Nouvel critique deux dérives de l'architecture contemporaine. Il dénonce d'une part l'uniformisation des constructions à travers le monde, qu'il qualifie d'architecture « générique », et qui se caractérise par la reproduction de modèles standards tels que les immeubles de bureaux en verre ou les centres commerciaux dépourvus d'identité locale. D'autre part, il s'oppose à ce qu'il appelle l'architecture « parachutée », où l'architecte conçoit une œuvre sans tenir compte du contexte environnemental, culturel ou humain. À l'opposé de ces approches, Nouvel défend une architecture « spécifique », conçue en fonction du site, de son histoire et de l'usage du bâtiment (Jean Nouvel, 2007).

La standardisation des choix architecturaux et urbains, ainsi que la perte du savoir-faire des cadres locaux qui ne sont plus en mesure de s'adapter au contexte, sont des facteurs aggravants. L'être humain souffre alors d'un malaise provoqué par des symptômes touchant l'espace urbain.

Aujourd'hui, le citoyen est confronté à un avenir incertain dans ses multiples dimensions : l'environnement, l'économie et la santé. La qualité de vie, accentuée par le manque de confort, notamment thermique, qui subit l'impact du milieu immédiat, est l'un des critères du bien-être.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

C'est pour cette raison que l'urbanisme et l'architecture doivent apporter des solutions aux phénomènes climatiques auxquels ils interviennent.

Selon les données communiquées à l'APS par un représentant de l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (Aprue), les Algériens consomment presque dix fois plus d'électricité que les normes internationales et deux fois plus que la moyenne des pays maghrébins. « En moyenne, un foyer algérien consomme entre 1 800 et 2 000 kilowatts-heure par an, alors que la norme est de 200 à 250 kilowatts-heure par an. Ils consomment aussi le double de la consommation d'un foyer d'autres pays du Maghreb », précise ce responsable en marge d'un séminaire sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment. Il explique que les ménages algériens ont choisi des équipements « énergivores » à l'origine de cette consommation excessive.

Le marché algérien est inondé de climatiseurs et d'autres équipements électriques qui consomment beaucoup d'énergie, mais offrent un confort thermique modeste.

Problématique :

D'une part, dans un contexte de hausse des températures et de standardisation des choix architecturaux et urbains, la conception des bâtiments publics doit répondre à des exigences de confort thermique, tout en intégrant des solutions durables et adaptées aux conditions climatiques locales.

La ville de Chlef, caractérisée par un climat méditerranéen à tendance semi-aride, connaît des étés particulièrement chauds et des hivers relativement doux. Ces conditions climatiques extrêmes exigent une approche architecturale optimisée pour garantir un environnement intérieur agréable et maîtriser la consommation énergétique.

Donc, comment assurer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments publics à Chlef ?

D'autre part, l'université de Chlef abrite plusieurs laboratoires de recherche qui emploient de nombreux chercheurs. Cependant, ces laboratoires sont dispersés au sein des facultés et occupent des espaces inadaptés en termes de superficie comme de qualité, ce qui favorise l'isolement des chercheurs, réduit les échanges interdisciplinaires et limite les potentielles collaborations entre les différentes disciplines.

Donc, comment concevoir un environnement qui favorise la collaboration et le partage des connaissances, et encourage la créativité des chercheurs ?

INTRODUCTION GÉNÉRALE

A cet effet, la problématique se pose par les questions suivantes :

- Quelles sont les stratégies de conception à adopter, voire les dispositifs architecturaux à utiliser pour assurer le confort thermique à l'intérieur du bâtiment ?
- Comment l'enveloppe architecturale peut-il contribuer à améliorer le confort thermique des bâtiments publics, tels que les centres de recherche à Chlef ?
- Comment créer un espace de travail propice à l'interaction et à la diffusion des savoirs, tout en valorisant l'innovation des chercheurs ?

Objectifs et intentions :

Dans le cadre de ce projet, nous avons établi de nombreux objectifs complémentaires. Ces éléments peuvent être synthétisés comme suit :

- Réduire la consommation énergétique dans les bâtiments publics en optimisant les besoins en chauffage, en refroidissement et en éclairage.
- L'amélioration du confort thermique dans les espaces publics est essentielle pour garantir le bien-être des usagers tout au long de l'année.
- Concevoir un projet écologique et durable, respectueux de l'environnement et adapté aux conditions climatiques locales.
- Prendre en compte la relation entre l'enveloppe architecturale et la performance énergétique afin d'assurer une régulation thermique naturelle et efficace.

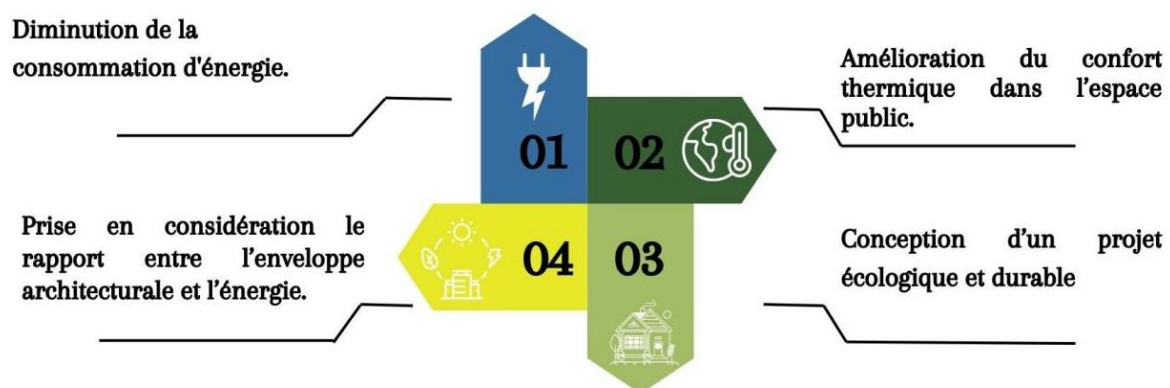


Figure 3: Objectifs de recherche (Source: Auteur)

Hypothèses :

Afin de bien mener cette étude, il est indispensable de formuler des hypothèses autour des quels s'articulera notre étude :

- L'utilisation des principes de l'architecture bioclimatique dans la conception de notre projet pour assurer le confort des utilisateurs.
- L'intégration des systèmes de rafraîchissement évaporatif dans la structure du bâtiment, comme les toits ou les murs.
- L'intégration d'éléments d'architecture locaux tels que le moucharabieh.

Méthodologie :

L'objectif de cette étude est de démontrer l'importance de systèmes de rafraîchissement par évaporation dans la durabilité architecturale pour les climats chaud/aride.

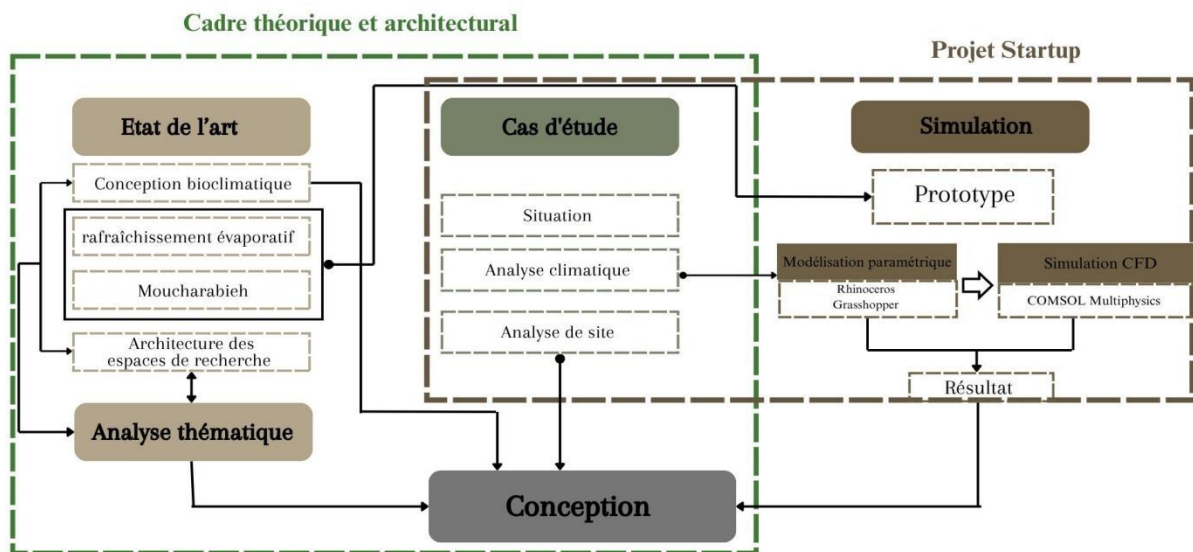


Figure 4: Diagramme de l'approche méthodologique (Source: Auteur)

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce mémoire s'articule autour d'une approche intégrée, combinant analyse théorique, présentation du cas d'étude et simulation numérique. La recherche est structurée en deux volets complémentaires : une partie théorique et architecturale, permettant de poser les fondements conceptuels du projet, et une partie pratique, développée dans le cadre de startup, dédiée à la conception et à l'évaluation du prototype.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le processus débute par un état de l'art portant sur la conception bioclimatique, le rafraîchissement évaporatif, le moucharabieh comme élément de régulation climatique, ainsi que l'architecture des espaces de recherche, afin d'établir une base conceptuelle solide. Cette phase alimente une analyse thématique approfondie, qui oriente l'étude du cas spécifique de la ville de Chlef, à travers l'analyse de son contexte urbain, de son climat et des caractéristiques du site retenu.

Ces données contextuelles servent de socle à la phase de conception, au cours de laquelle un prototype architectural est élaboré. Celui-ci est modélisé numériquement à l'aide des logiciels Rhinoceros et Grasshopper, selon une approche paramétrique, puis soumis à une simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) via COMSOL Multiphysics, afin d'évaluer ses performances thermiques et aérauliques.

Le processus est itératif, permettant des ajustements progressifs de la conception, en fonction des résultats obtenus, dans une démarche d'optimisation continue.

Structure du mémoire :

Ce mémoire est structuré en deux grandes parties complémentaires : une partie théorique et architecturale, et une partie dédiée au développement du projet en tant que startup.

Première partie : Théorique et architecturale

Cette première partie pose les bases scientifiques, techniques et contextuelles du projet, et aboutit à la conception architecturale. Elle comprend six chapitres :

- Le premier chapitre traite des fondements de l'architecture bioclimatique et des principes de confort thermique, avec une attention particulière portée aux climats chauds et secs.
- Le deuxième chapitre explore les techniques de rafraîchissement passif par évaporation, en mettant l'accent sur le rôle du moucharabieh comme dispositif architectural traditionnel.
- Le troisième chapitre s'intéresse à l'architecture des espaces de recherche scientifique, en analysant leurs exigences spatiales et fonctionnelles.
- Le quatrième chapitre propose une analyse thématique approfondie des références étudiées, permettant de dégager les concepts clés qui orientent la conception du projet.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Le cinquième chapitre présente une étude de site dans le contexte spécifique de la ville de Chlef, en analysant son climat, ses caractéristiques urbaines et son potentiel d'implantation.
- Le sixième chapitre est consacré à la présentation du projet architectural, conçu sur la base des éléments précédents et intégrant des solutions passives et adaptées au contexte local.

Deuxième partie : Approche startup et développement du prototype

La deuxième partie du mémoire aborde la dimension entrepreneuriale du projet, considérée comme un prolongement innovant de la démarche architecturale.

Elle comprend les éléments suivants :

- Le développement du projet dans une approche startup, structuré à travers un Business Model Canvas (BMC), mettant en évidence la stratégie de mise en œuvre et de diffusion de la solution proposée.
- La conception et modélisation du prototype, réalisée à l'aide d'outils paramétriques et de simulations numériques.
- L'évaluation des performances thermiques du prototype, à travers des simulations CFD, et l'interprétation des résultats, qui permettent de valider les choix de conception et d'optimiser la solution proposée.

PARTIE I : CADRE THEORIQUE ET ARCHITECTURAL

« Construire et vivre avec le climat et non contre lui »

(Courgey & Oliva, 2010)

***CHAPITRE 01 : Architecture bioclimatique
entre confort thermique et consommation
énergétique***

Introduction :

Depuis toujours, l'homme a cherché à exploiter le climat pour améliorer son confort et réduire la consommation d'énergie dans l'habitat. Aujourd'hui, des principes d'adaptation à l'environnement, à l'architecture et aux spécificités climatiques permettent de conjuguer une tradition ancestrale avec des technologies modernes.

Cependant, face à l'augmentation constante des exigences en matière de confort, les concepteurs ont souvent négligé l'adaptation des bâtiments au climat et à leur environnement immédiat. Ils se sont largement appuyés sur la technologie pour recréer artificiellement des conditions idéales.

Dans une approche plus réfléchie de l'architecture, celle-ci doit être capable de générer un microclimat confortable grâce à ses caractéristiques intrinsèques : l'enveloppe (forme, matériaux, disposition des ouvertures) et les structures internes. Une architecture bien pensée doit tenir compte du climat local et s'intégrer harmonieusement dans son environnement, pour améliorer non seulement le confort thermique, mais aussi la qualité de l'environnement.

Il est désormais essentiel de repenser la relation entre l'architecture et son milieu sous l'angle d'une double responsabilité : celle envers l'environnement actuel et celle envers les générations futures. Cela implique d'adapter les bâtiments non seulement au climat, mais aussi au mode de vie des futurs occupants, car de mauvaises décisions peuvent engendrer des coûts énergétiques importants à long terme.

Dans les régions à climat chaud, les bâtiments présentent souvent des conditions d'inconfort extrême, avec des impacts négatifs notables sur les occupants. Pour remédier à ces problèmes, de nouveaux concepts ont émergé dans le domaine de l'architecture : "architecture bioclimatique", "architecture solaire passive", "architecture climatique", ou encore les bâtiments à énergie zéro et à énergie positive. Ces approches mettent l'accent sur la prise en compte des mécanismes de confort et sur l'économie d'énergie en intégrant pleinement la relation entre l'habitat et le climat. L'objectif est de créer des espaces de vie agréables grâce à des solutions spécifiquement architecturales.

1.1. Architecture bioclimatique :

L'architecture bioclimatique est une approche de conception architecturale qui vise à créer des bâtiments en harmonie avec leur environnement naturel, en utilisant les ressources disponibles sur le site (soleil, vent, végétation, topographie) pour optimiser le confort thermique et énergétique des occupants, tout en réduisant l'impact environnemental.

En outre, l'architecture bioclimatique est une manière conceptuelle et constructive qui cherche à garantir le confort de l'occupant et établir un bon rapport entre la trilogie « occupant, bâtiment et climat » (Figure 3).

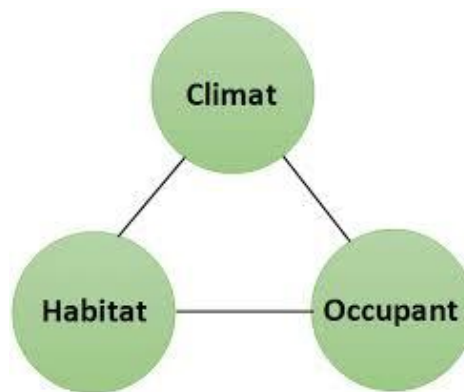


Figure 5: La trilogie de l'architecture bioclimatique (Source: Courgey& Oliva, 2010)

Fernandez et Lavigne (2009), dans leur livre « Concevoir des bâtiments bioclimatiques » donnent des bonnes explications sur l'approche bioclimatique. Ils voient que « *le terme bioclimatique fait référence à une partie de l'écologie qui étudie plus particulièrement les relations entre les êtres vivants et le climat* ».

1.1.1. Définition de l'architecture bioclimatique :

L'architecture bioclimatique est une démarche globale qui consiste à adapter l'architecture d'un projet en fonction des caractéristiques et particularités du lieu d'implantation, afin de tirer parti des avantages et d'éviter les désavantages et contraintes.

L'objectif principal est d'obtenir le confort d'ambiance recherché de manière aussi naturelle que possible, tout en utilisant les moyens architecturaux et les énergies renouvelables

disponibles, et en recourant le moins possible aux énergies extérieures au site et aux moyens techniques mécanisés.

Le terme « bioclimatique » est dans l'air du temps, notamment depuis l'arrivée de la norme RT 2012 qui fait partie des labels énergétiques et environnementaux permettant d'atteindre la Qualité Environnementale des Bâtiments (QEB).

Même si les principes de l'architecture bioclimatique sont pour la plupart intuitifs et utilisés pour construire des maisons depuis plusieurs siècles, à une époque où l'isolation n'existait pas et où les modes de chauffage étaient très peu performants. Avec l'amélioration des procédés d'isolation et l'essor des maisons passives et écologiques, l'architecture bioclimatique s'est développée ces dernières années, permettant de construire des bâtiments de plus en plus confortables d'un point de vue thermique (LAB Réunion,2025).

1.1.2. Les stratégies de l'architecture bioclimatique :

L'architecture bioclimatique repose sur trois stratégies : la stratégie du chaud (ou d'hiver) lorsqu'il est nécessaire de chauffer le bâtiment, la stratégie du froid (ou d'été) lorsqu'il est nécessaire de rafraîchir l'espace et la stratégie de l'éclairage naturel visant à tirer parti de la lumière du jour.

En hiver, la stratégie du chaud vise à capter au maximum le rayonnement solaire, ce qui nécessite une étude précise de l'orientation, des ouvertures, de l'inclinaison des surfaces et des éventuelles obstructions (Liébard et De Herde, 2005). La chaleur captée est ensuite stockée dans les matériaux à forte inertie thermique, puis conservée grâce à une bonne isolation, à une compacité maîtrisée du volume bâti et à l'utilisation d'espaces tampons. Une répartition efficace de cette chaleur dans les différents espaces permet d'assurer un confort thermique optimal.

En été, la stratégie du froid s'attache au contraire à protéger le bâtiment du soleil et des apports thermiques indésirables, en contrôlant l'orientation et la protection des ouvertures, notamment par des dispositifs d'ombrage. Il s'agit également de limiter les apports internes, de tirer parti de la compacité du bâtiment et de son inertie thermique pour éviter la surchauffe, tout en favorisant la dissipation de la chaleur par une ventilation naturelle, l'évacuation

CHAPITRE 01 : Architecture bioclimatique entre confort thermique et consommation énergétique

verticale ou des dispositifs de rafraîchissement. Enfin, le recours à l'évapotranspiration via la végétation ou l'eau, ainsi que l'usage de systèmes comme le puits canadien, permet de renforcer l'effet de rafraîchissement passif, comme illustré dans la figure 4 (Khadraoui, 2019).

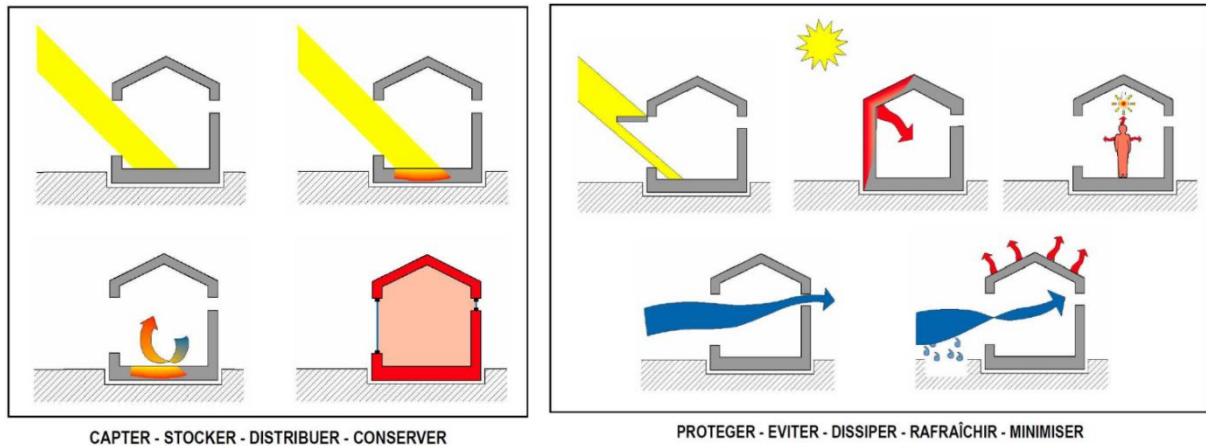


Figure 6: La stratégie du chaud et la stratégie du froid (Source: Khadraoui, 2019)

En outre, La stratégie de l'éclairage naturel consiste à capter les rayonnements et assurer la pénétration de la lumière naturelle dans la construction. Puis elle vise à la répartir d'une manière homogène et la focalise selon des méthodes tout en évitant l'inconfort visuel.

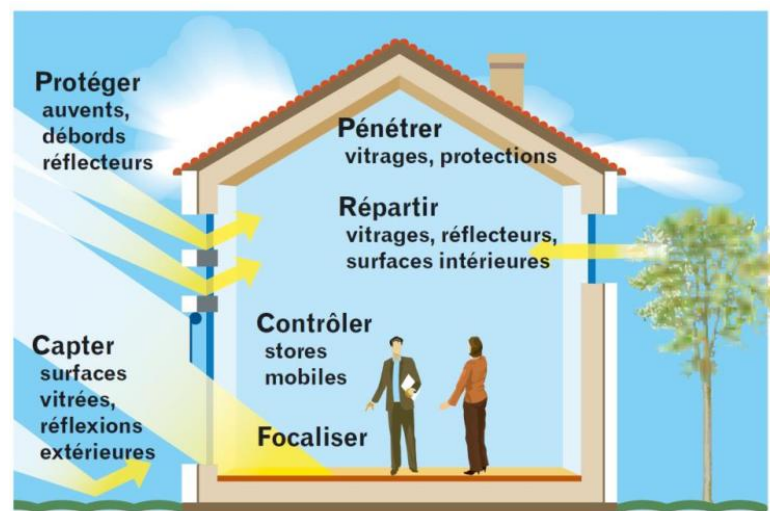


Figure 7: La stratégie de l'éclairage naturel (Source: Liébard et De Herde, 2005)

Cette stratégie repose sur plusieurs étapes clés. La première consiste à favoriser l'entrée de la lumière à travers une étude soignée des surfaces vitrées, du type de vitrage, et des matériaux réfléchissants présents dans l'environnement extérieur. Ensuite, il est important de répartir cette lumière de façon homogène, en tenant compte des caractéristiques internes telles que la couleur et la texture des parois, et en utilisant des dispositifs comme les réflecteurs ou certains

éléments architecturaux pour orienter ou adoucir la lumière. Une autre étape consiste à protéger et maîtriser les apports lumineux grâce à des protections solaires fixes (comme les débords de toiture, auvents, moucharabiehs) ou mobiles (stores, volets, brise-soleil), permettant de s'adapter aux variations climatiques et aux besoins spécifiques des usagers. Enfin, l'éclairage peut être concentré ou dirigé intentionnellement vers un point particulier à l'aide d'ouvertures latérales ou zénithales, mettant ainsi en valeur un espace ou un élément architectural (Liébard et De Herde, 2005).

1.1.3. Les principes de l'architecture bioclimatique :

1.1.3.1. Implantation :

Concernant les critères de choix d'un site d'implantation, ils remontent loin dans le temps, le souci bioclimatique prenait souvent un caractère spontané. Nous pouvons citer Vitruve, dans son ouvrage les dix livres d'architecture, qui note : « Quand on veut bâtir une ville, la première des choses qu'il faut faire est de choisir un lieu sain il doit être élevé qu'il ait une bonne température d'air, qu'il ne soit exposé ni aux grandes chaleurs, ni aux grands froids... » Avant tout travail de conception, le choix du terrain d'implantation est bien évidemment primordial, afin de prendre en compte et d'optimiser les influences de l'altitude, du relief, des sols et de la végétation environnante, la température locale et l'ensoleillement (Courgey & Oliva, 2025).

1.1.3.2. Orientation et ensoleillement :

D'après Baruch Givoni, le choix d'une orientation est soumis a de nombreuses considérations, telles que la vue, dans différentes directions, la position du bâtiment par rapport aux voies, la topographie du site, la position des sources de nuisances, le rayonnement solaire et ses effets d'échauffement, ainsi que la ventilation en rapport avec la direction des vents dominants. Il place le concept de l'orientation au centre des éléments influant sur les ambiances intérieures d'un bâtiment.

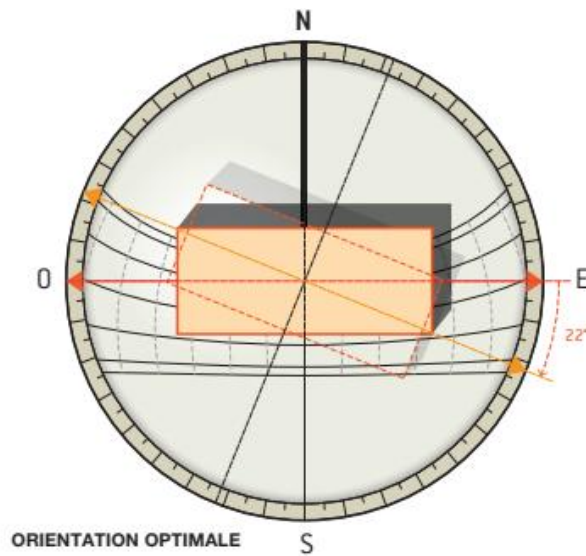


Figure 8: L'orientation optimale (Source: Thierry et al, 2017)

L'ensoleillement est caractérisé par la trajectoire du soleil et la durée de l'ensoleillement. Les conditions géométriques du système terre-soleil déterminent la position relative du soleil, qui est repéré par son azimut (c'est l'angle horizontal formé par un plan vertical passant par le soleil et le plan méridien du point d'observation) et sa hauteur angulaire (c'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan de l'horizon) (Givoni,1978).

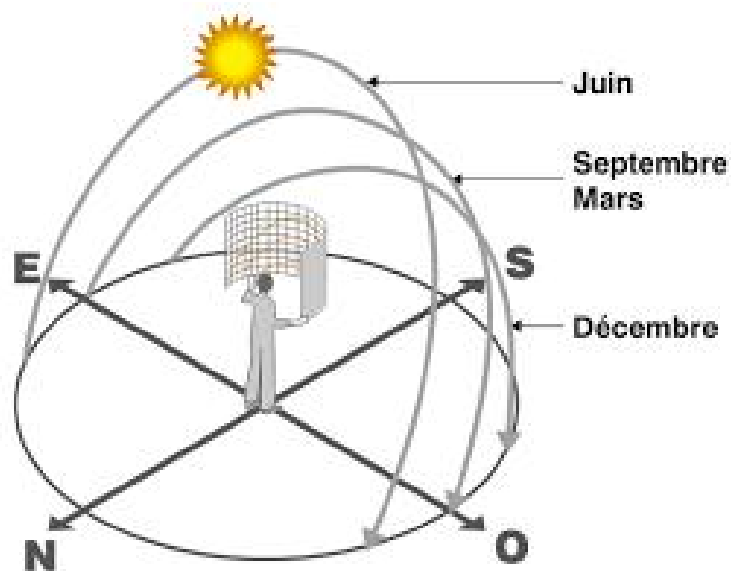


Figure 9: La trajectoire du soleil (Source: Givoni,1978)

1.1.3.3. Forme architecturale :

La forme recommandée pour un bâtiment si on veut lui assurer un bon système bioclimatique est de la rendre la plus compacte possible, c'est-à-dire en forme de bloc.

En effet, il ne faut pas oublier que l'objectif est de minimiser les pertes de chaleur autant que possible en hiver et d'en gagner un minimum en été. De ce fait, plus la forme de bâtiment sera compacte, idéalement en forme de cube, moins votre maison sera efficace pour éviter les pertes de chaleur.

La compacité d'un bâtiment est mesurée par le rapport entre la surface des parois extérieures et la surface habitable. Plus ce coefficient est faible, plus le bâtiment sera compact. La surface de l'enveloppe étant moins importante, les déperditions thermiques sont réduites.

La compacité varie suivant la forme, la taille et le mode de contacts des volumes construits.

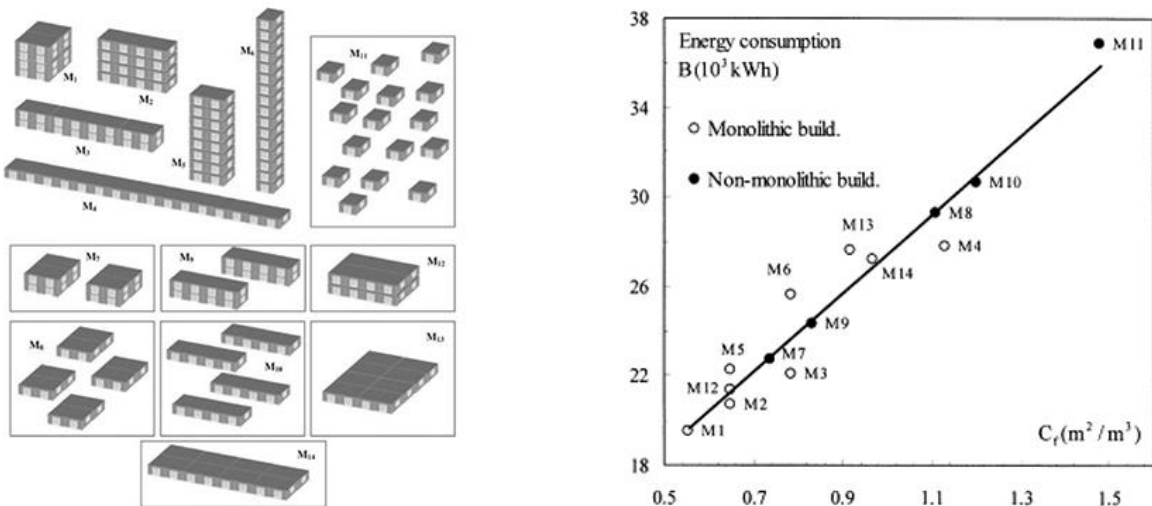


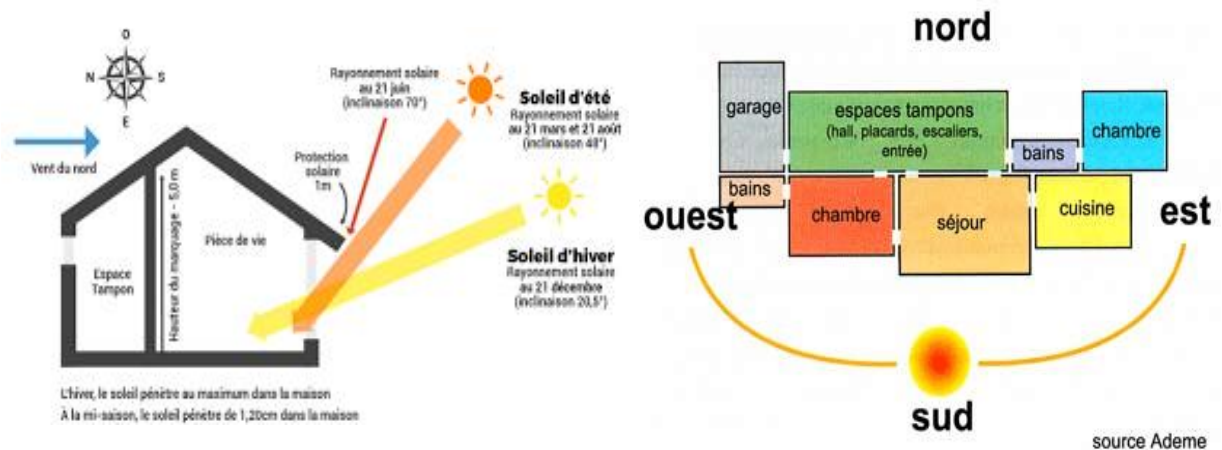
Figure 10: La compacité (Source: carapace habitat, 2025)

1.1.3.4. Disposition des espaces :

L'occupation des divers espaces d'un bâtiment varie en fonction du rythme des journées et même des saisons. Définir ces différents espaces (zones) et caractériser leurs besoins thermiques permet de les disposer rationnellement les uns par rapport aux autres. Les zones habitées en permanence de jour ou de nuit étant ceux qui nécessitent le plus de chaleur en hiver sont séparés de l'extérieur par des espaces intermédiaires, dits « tampons » qui jouent le rôle de transition et de protection thermique. La hiérarchisation des espaces assure la transition entre l'extérieur et l'intérieur. Les espaces intérieurs sont organisés en fonction de

CHAPITRE 01 : Architecture bioclimatique entre confort thermique et consommation énergétique

l'usage, de manière à ce que l'ambiance thermique corresponde aux activités et aux heures d'utilisation, c'est-à-dire rarement utilisés mais jouant un rôle protecteur vis-à-vis du froid. Pour optimiser l'approche thermique d'un bâtiment, l'idéal est d'organiser, dès la première



formulation spatiale du bâtiment, les locaux suivant leurs besoins.

Figure 11: Organisation des espaces habités (Source: carapace habitat, 2025)

1.1.3.5. Protections solaires :

La conception des protections solaires doit répondre à plusieurs objectifs, comme la limitation des surchauffes et de l'éblouissement, ainsi que la gestion de l'éclairage naturel dans les pièces. Elle peut également contribuer à préserver l'intimité des occupants et à embellir la façade.

Il existe de nombreux types de dispositifs de protection solaire : dispositifs structureaux fixes (porches, vérandas, brise-soleil) ou appliqués (stores, persiennes, volets, etc.), extérieurs ou intérieurs, horizontaux ou verticaux. Ils peuvent aussi être liés à l'environnement, comme la végétation. L'efficacité des protections solaires dépend de leur typologie, de leur orientation et de la période de l'année.

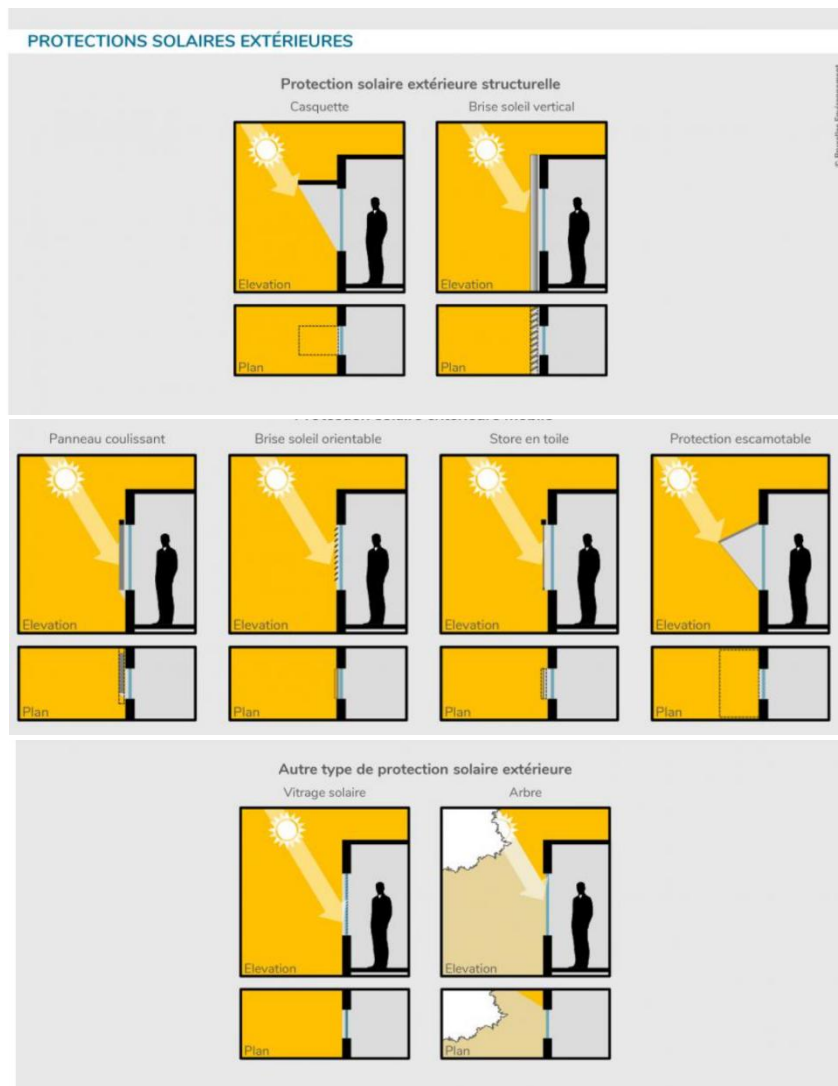


Figure 12: Types de dispositifs de protection solaire (Source: Carapace habitat, 2025)

1.1.3.6. Ventilation Naturelle :

L'objectif de la ventilation dans le confort thermique est de maintenir des conditions intérieures agréables. Cela comprend la prévention des sensations de chaleur inconfortables et de l'humidité cutanée.

La ventilation se définit en termes de « vitesse de l'air » plutôt qu'en termes de « apports d'air neuf » ou de « renouvellement d'air », car il n'y a aucun rapport direct entre flux quantitatif et vitesse de l'air à l'intérieur d'un bâtiment. Par exemple, un flux turbulent à débit faible peut provoquer des vitesses moyennes plus élevées dans la partie occupée d'un local qu'un flux laminaire à débit plus grand, mais dirigé juste en dessous du plafond. Cette relation

entre débit d'un flux et vitesse de l'air dépend également de la géométrie de l'espace et de la position des ouvertures.

Il est possible de déterminer la vitesse de l'air nécessaire au confort sous différentes conditions de température, d'humidité, de tenue vestimentaire et de métabolisme, ou la vitesse de l'air susceptible de garantir le minimum de gêne calorifique lorsque les températures ambiantes sont élevées. (Givoni, 1978)

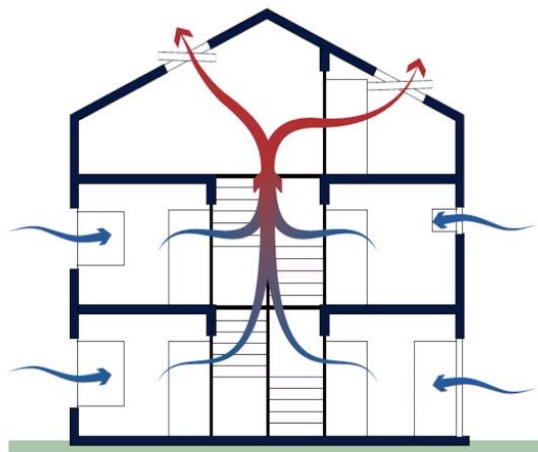


Figure 13: Ventilation par convection naturelle (Source : Atelier Nova, 2025)

En outre, le choix des matériaux est crucial pour garantir une isolation efficace et un bon confort thermique.

A) Matériaux à forte inertie thermique : tels que le béton, la brique ou la pierre, pour emmagasiner la chaleur et la restituer lentement (utile dans les climats avec des variations journalières de température).

B) Matériaux isolants : comme la laine de roche, la fibre de bois ou le chanvre, pour réduire les pertes de chaleur.

C) Couleurs et finitions : les couleurs claires réfléchissent la chaleur, idéales pour les climats chauds, tandis que les couleurs sombres absorbent la chaleur, utiles dans les climats froids.

1.1.3.7. Enveloppe architecturale :

L'enveloppe du bâtiment est la barrière physique entre les environnements extérieurs et intérieurs qui entourent une structure ; Généralement, l'enveloppe du bâtiment est constituée d'une série de composants et de systèmes (Toit, murs, fenêtres, portes, fondation) qui

CHAPITRE 01 : Architecture bioclimatique entre confort thermique et consommation énergétique

protègent l'espace intérieur des effets de l'environnement comme les précipitations, le vent, la température, l'humidité et le rayonnement ultraviolet. L'environnement interne est composé des occupants, de l'ameublement, des matériaux de construction, de l'éclairage, des machines, des équipements et du système de chauffage, ventilation et climatisation. L'amélioration de l'enveloppe des bâtiments est l'un des meilleurs moyens d'obtenir un meilleur rendement énergétique (Encyclopédie Energie, 2025).

En effet, elle joue plusieurs rôles fondamentaux : contrôler les phénomènes climatiques (air, chaleur, eau, lumière, bruit), assurer le confort visuel et acoustique, garantir la sécurité et la protection contre les risques (incendies, effractions), et répondre aux exigences structurelles et esthétiques.

L'enveloppe d'un bâtiment est donc un élément déterminant de sa performance thermique. En effet, la capacité des matériaux qui la composent à transmettre ou à bloquer la chaleur, la lumière, l'air ou le son est un facteur différenciant. Dans le cadre d'une transition énergétique, l'évaluation de cette technologie s'effectue selon une approche multicritère, prenant en compte ses aspects techniques, économiques et réglementaires. En effet, le concepteur a la possibilité d'adapter le climat intérieur en agissant sur deux axes : l'enveloppe du bâtiment et les systèmes de conditionnement d'air. Cette approche lui permet de répondre aux besoins spécifiques d'usage tout en minimisant la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Selon MEHIRA, 2021, on distingue plusieurs types d'enveloppe architecturale, qui varient selon leur rôle, forme, fonction, matériaux, type ...etc.

Tableau 1: Types d'enveloppe architecturale (Source: Auteur d'après Mehira, 2021)

Critères	Type d'enveloppe
Forme	Géométrique droite; Inclinée; Organique; Mixte
Fonction	Décorative ; Active
Type	Monocouche ; Multicouche
Rôle	Porteuse ; Non porteuse

CHAPITRE 01 : Architecture bioclimatique entre confort thermique et consommation énergétique

Participe de fonctionnement	Simple ; Ventilée
Matériaux utilisés	Pierre; Brique; Béton armé et blocs de béton ; Bois ; Verre ; Végétalisée; textile ; Mixte

1.2. Le confort thermique :

Le confort thermique, défini comme la sensation d'équilibre et de bien-être ressentie par un individu face aux conditions thermiques, est un concept complexe qui englobe plusieurs facteurs.

Il résulte d'un enchaînement successif de plusieurs phénomènes relevant de différentes disciplines. En génie climatique, il s'agit de déterminer l'impact du climat extérieur sur le bâtiment afin de pouvoir dimensionner les équipements nécessaires. Les thermiciens réalisent des études approfondies pour déterminer les champs de température et l'indice de confort. Dans le domaine de la thermos-physiologie, on étudie plus en profondeur les effets de l'environnement thermique intérieur sur le corps humain afin de calculer les grandeurs thermos-physiologiques.

1.2.1. Les paramètres influant le confort thermique :

Le confort thermique est une sensation psychosociologique faisant intervenir plusieurs paramètres. Il dépend de :

1.2.1.1 Paramètres liés à l'environnement :

La description des éléments concernant le confort thermique doit prendre en compte l'environnement relatif à l'individu. Celui-ci comprend quatre paramètres micro climatiques importants :

- A) La température de l'air ambiant : La température de l'air, ou température ambiante (T_a), est un paramètre essentiel du confort thermique. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires. Dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe.

- B) La vitesse de l'air : La vitesse de l'air joue un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporatoires, elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s¹¹. Toutefois, à l'intérieur des bâtiments, ces vitesses demeurent limitées, ne dépassant pas généralement cette vitesse, sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou du système d'aération. Elle peut, en revanche, être tenue pour responsable de l'apparition d'inconforts locaux, liés à la présence de courants d'air froids ou chauds localisés.
- C) L'humidité relative de l'air : L'humidité relative de l'air influence les échanges évaporatoires cutanés, elle détermine la capacité évaporatoire de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la sueur. Selon Liébard A., entre 30% et 70%, l'humidité relative influence peu la sensation de confort thermique¹². Une humidité trop forte dérègle la thermorégulation de l'organisme car l'évaporation à la surface de la peau ne se fait plus, ce qui augmente la transpiration¹³, le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort.

1.2.1.2 Paramètres liés à l'individu :

L'homme dispose de deux moyens de thermorégulations, le métabolisme et les vêtements :

- A) *Métabolisme* : La production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 37°C. Le niveau d'activité physique a une influence sur la quantité de chaleur produite par le corps humain et donc sur la perception d'un environnement chaud ou froid.
- B) *Habillement* : Quantité « d'isolant » ajouté au corps humain constitue une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. Dans la vie courante, le port de vêtements nous permet de maintenir une température cutanée relativement constante, autour de 30°C, lorsque la température ambiante n'est que de 18 à 20°C. En dehors de cette zone de neutralité thermique, le corps ne s'adapte pas complètement et la sensation de froid ou de chaud persiste.

1.2.2. Les échanges thermiques du corps humain :

Le corps humain, en tant que système ouvert, est en interaction permanente avec son environnement via des échanges cutanés et respiratoires. La production de chaleur métabolique dans l'organisme peut être mise à profit pour augmenter la température interne ou

être dissipée à l'extérieur. Ces échanges thermiques suivent cinq modes différents : la conduction, la convection, le rayonnement, l'évaporation et la respiration.

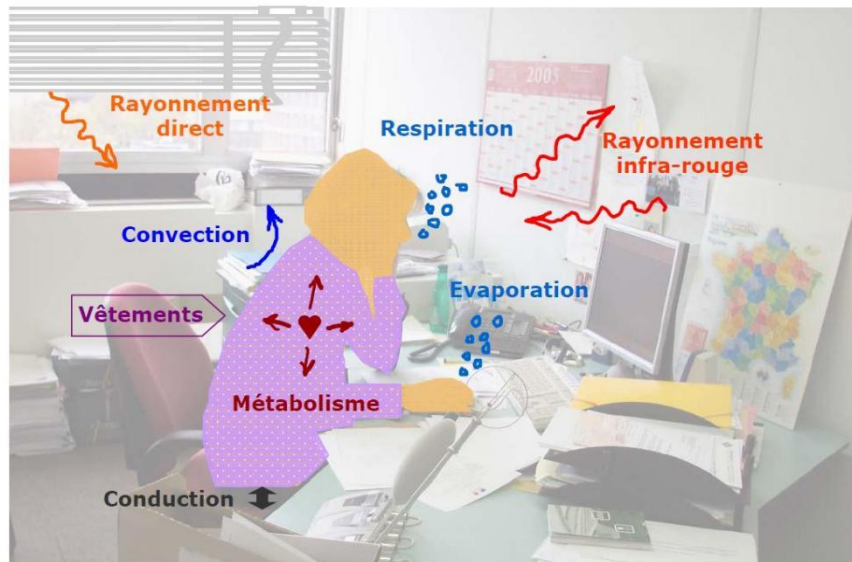


Figure 14: Interaction thermique entre le corps humain et son environnement (Source: Guidenr HQE, 2025)

Tout d'abord, la conduction concerne les transferts de chaleur à travers des surfaces en contact direct avec le corps, telles que le mobilier ou le sol. Toutefois, ces échanges restent limités à de petites zones corporelles et deviennent rapidement négligeables une fois que l'équilibre thermique local est atteint. C'est pourquoi ils sont souvent intégrés dans les pertes liées à la convection qui représente un mode d'échange majeur, qui dépend de la différence de température entre la surface du corps (peau ou vêtements) et l'air environnant. Ce processus peut se produire de manière naturelle, par déplacement de l'air chaud vers le haut, ou de manière forcée, lorsqu'un mouvement d'air est induit par un ventilateur, par exemple. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus la dissipation de chaleur corporelle est importante, même si la température de l'air ambiant ne change pas.

Le rayonnement thermique joue un rôle essentiel dans les échanges d'énergie entre le corps humain et les objets ou surfaces environnants. Ce mode de transfert dépend de plusieurs facteurs : la différence de température entre les surfaces, la distance qui les sépare, ainsi que les propriétés radiatives (émissivité, réflectivité) des matériaux (Givoni, 1998). Dans les

environnements chauds, un rayonnement excessif provenant des parois ou du sol peut considérablement aggraver l'inconfort thermique.

Par ailleurs, l'évaporation de la sueur constitue le mécanisme le plus efficace pour l'évacuation de la chaleur excédentaire produite par l'organisme, notamment dans les climats chauds et humides. L'efficacité de ce processus dépend directement de plusieurs conditions : le taux d'humidité de l'air, la vitesse de l'air, la température cutanée, la surface corporelle mouillée, ainsi que la capacité des vêtements à laisser passer la vapeur d'eau.

Enfin, la respiration contribue également aux échanges thermiques, bien que de manière moins visible. À chaque cycle respiratoire, le corps perd de la chaleur sous forme sensible (chaleur transférée à l'air inspiré) et latente (évaporation de l'eau contenue dans l'air expiré). Cette perte thermique est influencée par l'écart de température et d'humidité entre l'air ambiant et l'air expiré, ainsi que par le rythme respiratoire (Parsons, 2014).

1.3. La consommation énergétique :

La consommation d'énergie correspond à la quantité d'énergie utilisée par un appareil ou un local bâti. La consommation d'énergie est variable en fonction de paramètres variés. Entre autres, pour une chaudière, elle dépendra de son rendement, pour un climatiseur, de son COP et pour un logement de son isolation. L'unité permettant de comparer la consommation d'énergie d'un logement est le Kw/m²/an. Plus l'isolation d'un logement ou d'un local est performante et plus sa consommation d'énergie est faible. Les normes actuelles de consommation d'énergie des logements courants sont de 150 à 250 Kw/m²/an et sont en train d'être adaptées (RT 2005, RT 2010) pour atteindre une consommation d'énergie inférieure à 50KW/m²/an dans l'habitat du futur.

Les économies d'énergie ainsi générées permettraient de réduire considérablement l'impact environnemental du Bâtiment en matière de rejet de CO₂.

1.3.1. L'efficacité énergétique :

L'efficacité énergétique est appelée à jouer un rôle important dans le contexte énergétique national, caractérisé par une forte croissance de la consommation tirée, notamment, par le

secteur bâtiment avec la construction de nouveaux logements, la réalisation d'infrastructures d'utilité publique et la relance de l'industrie [portail algérienne].

Le but de l'étude est d'encourager l'application des hypothèses et des scénarios retenus sur la réduction de la consommation d'énergie en prédisant l'utilisation des scénarios étudiés.

Il vise également à faire évoluer les équipements et appareils performants, notamment les chauffe-eau solaires et les lampes à économie d'énergie : l'objectif est d'améliorer le confort intérieur des habitations et le bien-être en consommant moins d'énergie. La mise en place d'une industrie locale d'isolation thermique, d'équipements et de dispositifs est l'une des raisons de réduire la consommation d'énergie dans ce secteur en général.

1.3.2. L'impact de la consommation d'énergie sur l'environnement :

L'impact est important sur notre environnement car la consommation d'énergie est en augmentation. Les diverses conséquences sont la pollution atmosphérique causant une augmentation de l'effet de serre d'où le réchauffement climatique. Celui-ci risque d'entraîner une fonte partielle des calottes polaires, élevant ainsi le niveau des mers, inondant les zones côtières basses, certaines îles et les deltas.

- La végétation risque d'être anéantie par une croissance des feux de forêts qui provoqueraient un grand dégazage (libération de gaz contenu dans les arbres).
- La fonte du pergélisol en arctique dû à son réchauffement (le pergélisol renferme 1 500 milliards de tonnes de gaz à effet de serre, soit environ deux fois plus que dans l'atmosphère). Entre 33% et 50% du pergélisol de l'Alaska dégèlerait si sa température augmentait de 1 degré.
- Un grand risque d'extinction a été évalué sur les espèces animales de l'ordre d'environ de 20% à 30%.

Conclusion :

L'architecture bioclimatique est une solution efficace pour atteindre un équilibre entre confort thermique et réduction de la consommation énergétique. En permettant d'exploiter les ressources naturelles telles que l'ensoleillement et la ventilation, elle permet de concevoir des

CHAPITRE 01 : Architecture bioclimatique entre confort thermique et consommation énergétique

espaces agréables à vivre tout en minimisant l'utilisation d'énergie. Cette approche, qui prend en compte les spécificités climatiques et environnementales dès la phase de conception, constitue une réponse efficace aux enjeux énergétiques et écologiques actuels. En intégrant ces principes, l'architecture bioclimatique se positionne comme un pilier essentiel de l'architecture moderne, alliant respect de l'environnement et bien-être des occupants.

***CHAPITRE 02 : Le rafraîchissement
évaporatif et les moucharabiehs***

Introduction :

Dans le contexte actuel des enjeux climatiques et de la nécessité de réduire la consommation énergétique des bâtiments, notamment en période estivale, le rafraîchissement passif se présente comme une solution pertinente face aux systèmes mécaniques énergivores. Parmi ces stratégies, le rafraîchissement par évaporation se distingue par sa simplicité, son efficacité et son faible impact environnemental.

Cette technologie, largement inspirée des pratiques traditionnelles dans les régions arides et chaudes, repose sur un principe physique fondamental : l'évaporation de l'eau absorbe de la chaleur, permettant ainsi un abaissement naturel de la température de l'air. Il s'agit d'un procédé à la fois traditionnel et innovant, historiquement utilisé dans les constructions vernaculaires – comme dans les fontaines, les patios, les moucharabiehs et les tours à vent – et désormais intégré dans les approches bioclimatiques modernes.

Dans un contexte algérien caractérisé par une demande croissante en confort thermique, notamment dans les espaces publics et les logements sociaux, et par une forte dépendance aux énergies fossiles, le rafraîchissement par évaporation s'impose comme une solution écologique, économique et culturellement adaptée. Ce modèle s'avère particulièrement pertinent, car de nombreuses régions du pays bénéficient d'un climat chaud et sec, favorisant l'efficacité de ce système.

2.1. Système de rafraîchissement par évaporation :

2.1.1. Concept et théorie du rafraîchissement par évaporation :

L'évaporation est un processus naturel par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur), lorsqu'une différence de pression partielle à l'interface des deux phases est présente. Ce phénomène est une composante essentielle du cycle naturel de l'eau et se manifeste de manière continue dans l'environnement (Abada, 2021).

L'utilisation de ce principe pour le rafraîchissement de l'air n'est pas un concept nouveau. Cette pratique trouve ses origines dans l'Antiquité. Des études de cas historiques, telles que des fresques égyptiennes datant d'environ 2500 av. J.-C., démontrent l'efficacité de cette approche. Les anciens Égyptiens utilisaient des jarres en argile poreuses pour refroidir l'eau,

favorisant l'évaporation par ventilation extérieure, ce qui produisait un effet de rafraîchissement (Watt, 2012). Cette technique était également utilisée par les Romains.

Dans plusieurs régions chaudes et sèches, notamment en Afrique du Nord, des pratiques traditionnelles sont toujours en vigueur. Il est courant de suspendre des tissus imbibés d'eau aux ouvertures (portes ou fenêtres) des habitations. Dans le cadre du processus d'échange thermique, l'air chaud extérieur, en traversant les tissus humides, cède une partie de sa chaleur à l'eau, induisant ainsi son évaporation. Ce transfert thermique induit une diminution significative de la température de l'air entrant dans le bâtiment, garantissant ainsi un rafraîchissement passif et naturel (Givoni, 1994).

2.1.2. Classification de la technologie de rafraîchissement par évaporation :

Le rafraîchissement par évaporation est une méthode naturelle et économique qui utilise l'évaporation de l'eau pour abaisser la température de l'air, particulièrement efficace dans les climats chauds et secs. Il existe principalement trois types de systèmes :

2.1.2.1. Rafraîchissement par évaporation directe (DEC) :

Le type de refroidissement par évaporation le plus simple et le plus traditionnel est le système direct, dans lequel l'eau et l'air extérieur entrent en contact direct. Ce procédé consiste à refroidir l'air en convertissant de l'énergie sensible en énergie latente. Ces systèmes conviennent particulièrement aux régions chaudes et sèches. Cependant, dans les environnements à forte humidité, l'introduction directe d'air humide dans un bâtiment peut engendrer des problèmes tels que la déformation, la corrosion ou la formation de moisissures sur les matériaux sensibles, ce qui rend cette technique moins adaptée.

Les systèmes de refroidissement par évaporation directe se divisent en deux catégories principales : les systèmes passifs, fonctionnant naturellement sans apport d'énergie mécanique, et les systèmes actifs, qui utilisent des dispositifs électriques pour faire circuler l'eau et l'air. Comparés aux systèmes classiques à compression de vapeur, les systèmes actifs directs sont généralement moins gourmands en énergie et permettent des économies substantielles. Les systèmes passifs exploitent les phénomènes naturels pour assurer le rafraîchissement sans consommation énergétique significative, bien qu'ils puissent parfois nécessiter des ventilateurs ou pompes à faible puissance.

L'efficacité de ces dispositifs dépend fortement des conditions climatiques, mais ils sont capables de réduire significativement la température de l'air intérieur (Haile et al, 2024)

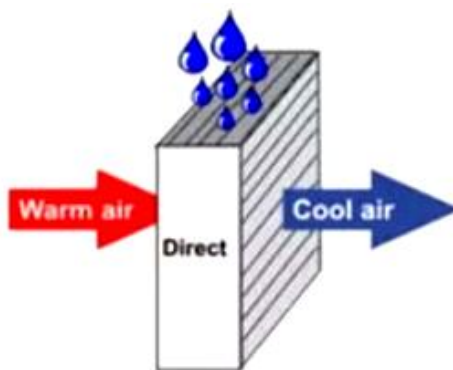


Figure 15: Schéma de système DEC (Source: Evapoler, 2025)

2.1.2.2. *Rafraîchissement par évaporation indirecte (IEC) :*

Dans ce système, les flux d'air humide et sec sont séparés. Le système de refroidissement par évaporation, intégré à un circuit humide clos, assure une gestion optimale de la température extérieure, tout en empêchant la pénétration directe de l'air dans le bâtiment. Dans le cadre du processus de refroidissement, un échangeur thermique est utilisé pour transférer la chaleur à un flux d'air sec. Ce flux d'air est ensuite introduit dans les espaces intérieurs pour maintenir une température optimale. Cette configuration innovante permet de rafraîchir l'air sans augmenter son humidité, ce qui améliore significativement le confort des occupants, notamment dans les climats où une forte humidité peut représenter un défi. Ces systèmes, bien que plus complexes, offrent un contrôle de la qualité de l'air intérieur supérieur (Haile et al, 2024).

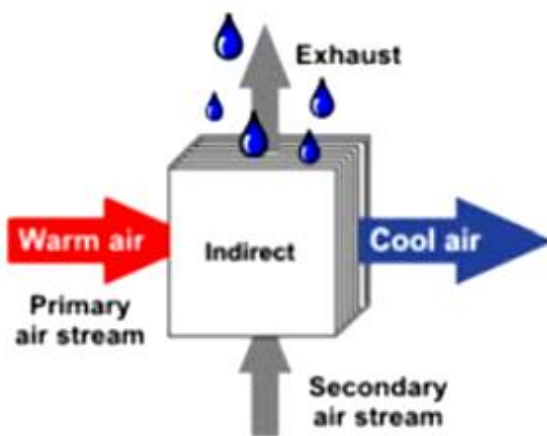


Figure 16: Schéma de système IEC (Source: Evapoler, 2025)

2.1.2.3. Le système de rafraîchissement par évaporation directe/indirecte :

Les systèmes de refroidissement par évaporation hybrides intègrent les méthodes IEC et DEC. Le DEC présente un excellent rendement, mais il faut noter qu'il provoque une augmentation des niveaux d'humidité intérieure. L'IEC, en revanche, bien que moins performant, garantit une humidité constante dans l'air fourni. La combinaison de ces deux systèmes, ou leur intégration à d'autres technologies de refroidissement, est une opportunité stratégique pour maximiser leurs avantages respectifs. Cette approche intégrée est communément appelée ECS hybride ; l'efficacité des systèmes de refroidissement par évaporation hybrides varie entre 90 % et 115 %. Cependant, la complexité du système et son coût initial élevé constituent les principaux avantages concurrentiels de cette solution. Il existe deux types de systèmes combinés IDEC : le modèle à deux étages, le modèle à trois étages et le modèle à plusieurs étages.

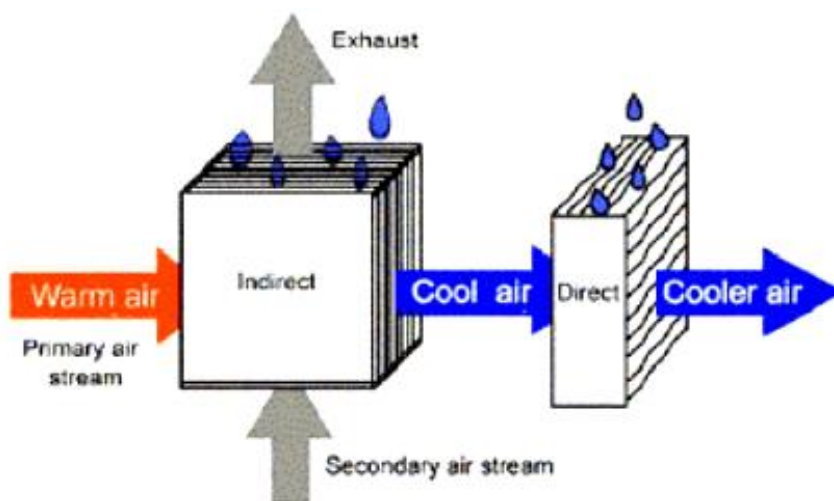


Figure 17: Schéma de système IDEC (Source: Evapoler, 2025)

2.1.3. Études des systèmes de rafraîchissement par évaporation :

Le rafraîchissement par évaporation constitue une approche efficace, économique et écologique, exploitant le principe naturel de l'évaporation de l'eau pour abaisser la température de l'air ambiant.

Le tableau suivant présente une comparaison détaillée des études scientifiques portant sur différents systèmes de refroidissement évaporatif. Ces recherches, sélectionnées pour leur pertinence et leur rigueur méthodologique, couvrent à la fois des études expérimentales, des

CHAPITRE 02 : Le rafraîchissement évaporatif et les moucharabiehs

modélisations numériques, ainsi que des revues critiques. Elles illustrent la diversité des applications possibles (bâtiments, produits périssables), les méthodes d'intégration, les performances thermiques obtenues, ainsi que les contextes climatiques d'implantation.

Tableau 2: Tableau comparatif des systèmes de refroidissement par évaporation (Source: Auteur)

Type de système	Objectif de la recherche	Méthodologie & Outils utilisés	Références
Refroidissement par évaporation indirecte avec caloduc et céramique poreuse	Atteindre une température inférieure au bulbe humide pour maximiser l'efficacité thermique	Étude théorique et expérimentale	(Amer, 2017)
Échangeur à contre-courant avec point de rosée	Optimiser le rendement d'un échangeur évaporatif par simulation	Simulation numérique via COMSOL Multiphysics	(García-González et al., 2024)
Système de rafraîchissement passif intégré au bâtiment	Réduire la température intérieure des bâtiments via évaporation naturelle	Logiciel de simulation thermique (type Energy Plus)	(Abada, 2021)
Systèmes passifs	Améliorer la conservation des aliments périssables en climat chaud	Revue de littérature + analyse technique	(Lufu, et al., 2024)
Différents systèmes directs, indirects et hybrides étudiés	Évaluer l'efficacité énergétique et les stratégies adaptées aux climats arides	Revue systématique d'articles scientifiques	(Haile et al., 2022)

CHAPITRE 02 : Le rafraîchissement évaporatif et les moucharabiehs

Selon la recherche menée par Abada (2021), plusieurs approches de rafraîchissement par évaporation ont été étudiées dans le contexte de l'architecture bioclimatique. Suite à une analyse approfondie des résultats de l'étude, la décision a été prise d'opter pour le système de rafraîchissement par évaporation directe passive, notamment en ce qui concerne l'intégration du moucharabieh

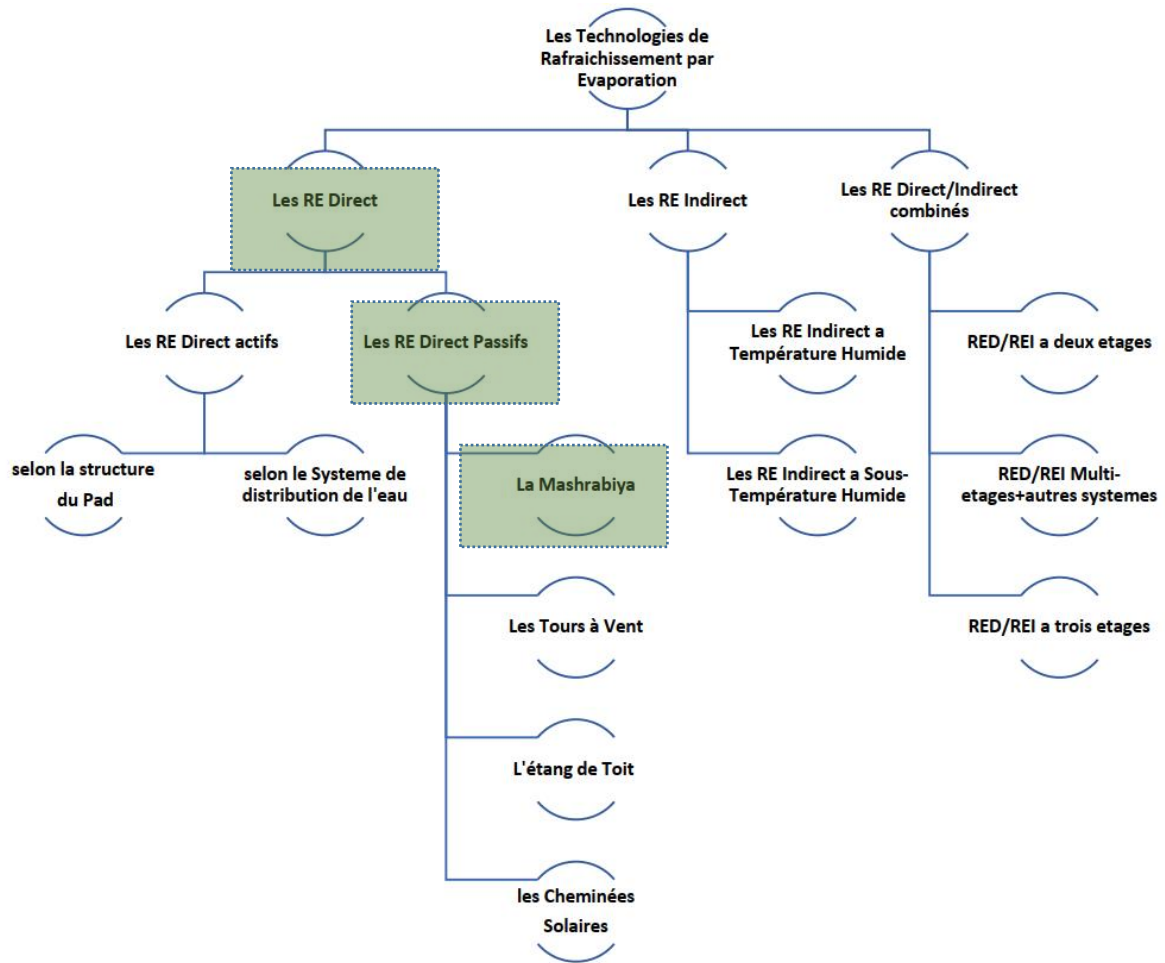


Figure 18: Les technologies de rafraîchissement par évaporation (Source: Abada, 2021)

2.2. Les moucharabiehs

2.2.1. Origine et principes des moucharabiehs

Le moucharabieh est la fenêtre principale qui donne sur la rue ou la cour des maisons arabes traditionnelles. Autrefois, le moucharabieh était le nom donné à l'espace clos par des ouvertures en treillis de bois où l'on plaçait les jarres d'eau potable pour les refroidir (Fathy, 1986). Plus tard, le nom de moucharabieh n'a été donné qu'à l'écran en treillis constitué de balustres en bois dont la section circulaire est parfaite pour assurer une circulation de l'air plus régulière, ce qui contribue au facteur d'évaporation. Cet écran était entièrement fait à la main et le design des balustres était varié de différentes manières artistiques.

Le mot Mashrabiya vient d'une racine arabe signifiant un endroit où les jarres d'eau potable étaient mises à refroidir, et Mashraba est la forme du nom d'un verbe arabe « yashrab » signifiant « boire ».

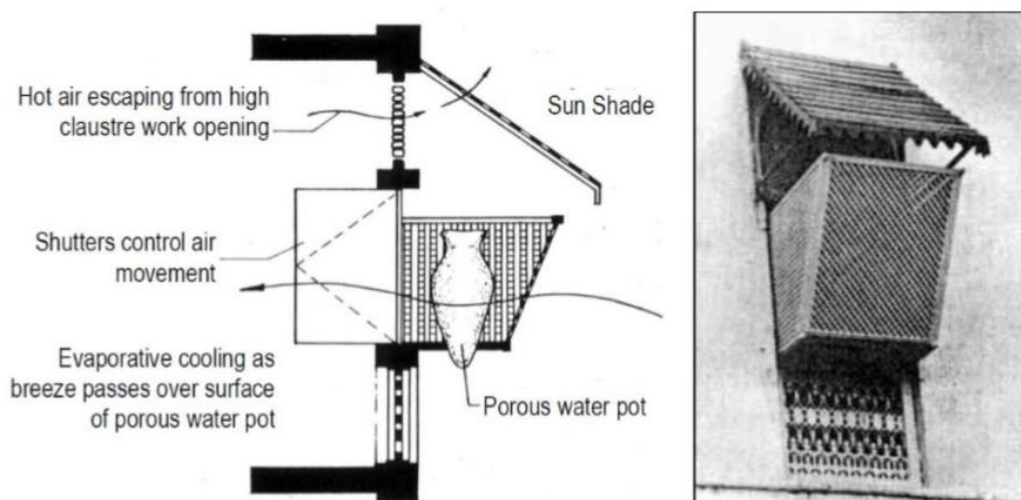


Figure 19: Système de moucharabieh (Source: Alothman, 2017)

2.2.2. Impact des moucharabiehs

Le moucharabieh n'est pas seulement un élément décoratif et esthétique, il a également été conçu pour remplir de nombreuses fonctions environnementales telles que le réglage de l'éclairage, le contrôle de l'humidité et du flux d'air, la réduction de la chaleur et un rôle essentiel dans la protection de la vie privée, comme l'a affirmé l'architecte Hassan Fathy. Ce dispositif sert à contrôler l'entrée de la lumière du jour dans le bâtiment, réduisant la chaleur

CHAPITRE 02 : Le rafraîchissement évaporatif et les moucharabiehs

excessive en été et permettant une bonne quantité de lumière en hiver. Il bloque le soleil gênant, tout en laissant passer la lumière ambiante nécessaire aux activités quotidiennes. Le moucharabieh est efficace pour éviter l'éblouissement et ne provoque pas d'augmentation de la température intérieure, tout en empêchant la lumière directe du soleil de pénétrer. Pour résoudre les problèmes d'éblouissement, l'architecte doit choisir un moucharabieh spécifique, comme une section circulaire pour les balustrades, selon les recommandations de Fathy (1986).

Le moucharabieh permet d'assurer la circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment. L'air est aspiré dans la pièce par les petits interstices du bas et l'air chaud est expulsé par les grands interstices du haut. Cette technique permet non seulement d'améliorer la circulation de l'air, mais aussi de l'accélérer dans les autres pièces.

Le moucharabieh en bois assure une régulation optimale de l'humidité de l'air. Grâce à la capacité d'absorption des balustres, l'air traverse le moucharabieh en bois, perdant une partie de son humidité. Lorsque le moucharabieh est chauffé par la lumière directe du soleil, cette humidité est absorbée par l'air qui circule à travers le bois poreux. Cette technologie innovante est un atout pour maintenir un environnement sain et confortable, en régulant efficacement l'humidité selon les besoins horaires.



Figure 20: L'effet rafraîchissant du moucharabieh par le processus d'évapotranspiration (Source: Özsavaş Akçay & Alotman, 2017)

Tous les architectes sont conscients que la lumière directe du soleil peut engendrer des températures élevées. Le moucharabieh, quant à lui, joue un rôle clé en limitant les apports solaires et en créant une zone d'ombre dans les espaces intérieurs pendant les mois d'été. Cependant, il permet également de fournir une source de chaleur pendant les mois plus frais

de l'année, en laissant pénétrer la lumière directe du jour dans le bâtiment. Dans le cadre de nos activités, nous avons identifié que les processus de refroidissement et de chauffage sont fonction des caractéristiques spécifiques du treillis en termes de dimensionnement et de porosité. Ainsi, un treillis plus poreux permettra plus de lumière directe pendant les jours froids, mais augmentera également le flux d'air dans l'espace et modifiera la capacité des systèmes de refroidissement par évaporation.

Le moucharabieh, élément de design ancestral, offre une protection optimale contre les intempéries tout en permettant une visibilité optimale vers l'extérieur à travers le treillis. Dans le cas d'une exposition du moucharabieh sur la rue, il est recommandé d'optimiser les distances entre les balustres pour maximiser l'effet visuel, en veillant à ce que les yeux soient habilement mis en valeur, à l'exception de la partie supérieure qui s'élève au-dessus du niveau des yeux.



Figure 21: Vues du moucharabieh (Source : Özsavaş Akçay & Alotman, 2017)

Il convient également de mentionner que les motifs des moucharabiehs ont conféré aux façades des bâtiments traditionnels une vitalité et une dynamique qui contrastaient avec l'aspect auparavant dépouillé et austère des structures, rendu possible par la masse imposante des murs.

2.2.3. Études sur l'effet du moucharabieh :

Le moucharabieh, élément d'architecture traditionnelle orientale, fait l'objet d'un intérêt grandissant de la part de la recherche contemporaine, en raison de ses qualités environnementales, esthétiques et culturelles.

De nombreuses études ont exploré ses effets sur la ventilation naturelle, la régulation thermique, le contrôle de la lumière et l'identité architecturale. Le tableau ci-après présente

CHAPITRE 02 : Le rafraîchissement évaporatif et les moucharabiehs

une sélection d'études nationales et internationales, mettant en évidence les objectifs de chaque recherche, les méthodologies employées ainsi que les principaux résultats obtenus. Cette synthèse a pour objectif de mettre en lumière les contributions potentielles du moucharabieh dans une approche de conception architecturale durable, adaptée aux climats chauds.

Tableau 3: Tableau comparatif des études sur l'effet du moucharabieh (Source: Auteur)

Effets étudiés	Objectif de la recherche	Méthodologie & Outils utilisés	Références
Ventilation naturelle Confort thermique	Évaluer l'impact du moucharabieh sur la ventilation naturelle dans les climats chauds	Simulation CFD (modèles avec et sans moucharabieh)	(Bagasi et al.,2021)
Identité culturelle	Évaluation critique des projets contemporains avec la préservation l'identité culturelle	Analyse critique de projets contemporain	(Alothman,2017)
Confort thermique et visuel Consommation Énergétique	Évaluer les performances des façades dynamiques inspirées du moucharabieh	Simulation paramétrique (GECO, Grasshopper, Rhinoceros)	(Ben bacha,2017)
Contrôle lumineux / Design innovant	Concevoir des moucharabiehs modernes et réactifs à la lumière du jour	Design paramétrique + simulations d'éclairage	(El Semary et al.,2023)
Confort thermique	Adapter le moucharabieh à l'environnement désertique australien	Étude de cas + fabrication numérique (CNC)	(Samuels,2021)

Conclusion :

Le rafraîchissement évaporatif et les moucharabiehs représentent deux dispositifs passifs complémentaires, particulièrement efficaces dans l'amélioration du confort thermique en climat chaud. Le premier exploite le principe de l'évaporation de l'eau pour abaisser la température de l'air ambiant, tandis que le second régule l'ensoleillement et favorise la ventilation naturelle à travers une structure ajourée.

La synergie entre ces deux systèmes se manifeste notamment dans leur capacité conjointe à améliorer le mouvement de l'air tout en réduisant sa température, créant ainsi un environnement intérieur plus frais sans recours à des équipements mécaniques. Intégrés de manière cohérente dans une approche architecturale bioclimatique, ils permettent de concevoir des bâtiments à la fois performants sur le plan énergétique, respectueux de l'environnement et ancrés dans une tradition constructive adaptée au contexte local.

***CHAPITRE 03 : L'architecture des espaces
de recherche scientifique***

Introduction

L'architecture des espaces de recherche scientifique joue un rôle crucial dans le soutien et le développement des activités de recherche. Ces espaces doivent être conçus pour encourager l'innovation, la collaboration et l'efficacité des chercheurs, tout en répondant aux besoins techniques, ergonomiques et environnementaux propres à chaque discipline. L'architecture de ces espaces repose sur plusieurs principes fondamentaux qui visent à optimiser les conditions de travail tout en répondant aux enjeux contemporains liés à l'énergie, à la durabilité et à la flexibilité.

3.1. Définitions clés :

- **Le Centre** : d'après le dictionnaire d'urbanisme ; « Le centre est le milieu d'un espace, le point central doué de propriétés actives et dynamiques, le point de convergence ou de rayonnement où diverses activités sont concentrées. Ces dernières variaient dans le temps suivant l'évolution économique, techniques et les conditions politiques ».
- **L'université** : ensemble d'établissements scolaires relevant de l'enseignement supérieur regroupé dans une circonscription administrative. En outre, une université est un établissement d'enseignement supérieur dont l'objectif est la production de la connaissance, sa conservation et sa transmission.
- **La recherche** : Au sens le plus large du terme, la définition de la recherche inclut toute collecte de données, d'informations et de faits pour l'avancement du savoir. Aussi, « la recherche désigne l'ensemble des travaux, des activités intellectuelles qui tendent à la découverte de la connaissance et des lois nouvelles », selon le dictionnaire de la langue française.

3.2. Centre de recherche universitaire :

3.2.1. Définition :

Un centre de recherche est un établissement public à caractère administratif dont la mission principale est de concevoir et de réaliser des recherches et expérimentations dans le domaine d'étude de l'université.

3.2.2. Public cible et objectifs :

Le centre de recherche vise principalement à soutenir la formation et l'innovation scientifique en lien avec les priorités stratégiques du pays. Il s'adresse aux enseignants-chercheurs, doctorants et étudiants engagés dans des domaines scientifiques et technologiques. Ses objectifs incluent le renforcement des capacités de recherche, l'alignement des compétences universitaires avec les besoins nationaux, la promotion de la coordination intersectorielle et la valorisation des résultats scientifiques par des applications concrètes. Ce positionnement s'inscrit dans les missions définies par la Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique (DGRSDT), qui encadre l'organisation, l'évaluation et le financement de la recherche en Algérie (DGRSDT, 2023).

3.3. Disposition spatiale et exigences techniques :

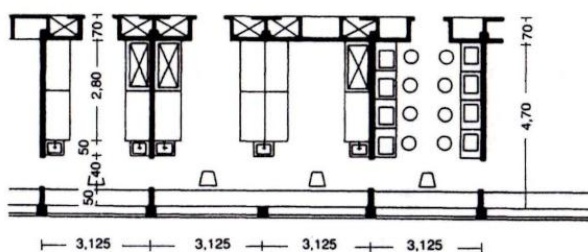
Pour concevoir les espaces de recherche, il est essentiel de prendre en compte trois éléments : l'optimisation de l'aménagement spatial, le souci du confort des utilisateurs et la flexibilité. Voici les exigences à prendre en compte :

3.3.1. Laboratoire de recherche :

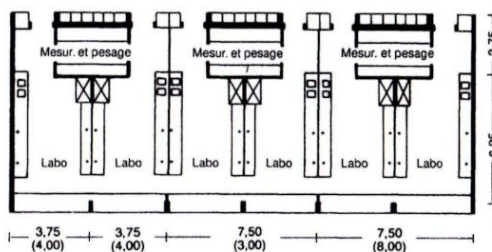
Le laboratoire de recherche est le cadre le plus immédiat de la vie scientifique, permettant à des chercheurs travaillant sur des problématiques voisines d'interagir.

« Lieux privilégiés où se déroule l'activité de recherche, s'y trouvent rassemblés des chercheurs, des techniciens et des administratifs qui, dans l'idéal, collaborent autour d'un ou de plusieurs projets ou sujets de recherche. Ces chercheurs y partagent les ressources et les moyens rassemblés dans le laboratoire ».

Selon Neufert, plusieurs exigences techniques doivent être prise en considération lors de la conception et l'aménagement d'un laboratoire de recherche scientifique (voir figure 22).



① Les dimensions de la pièce sont fonction de la taille des tables (postes de travail). Canalisations et rangements incorporés au couloir. Salle des balances à part.



② Laboratoires standard avec locaux de mesure et pesage intercalés. Clinique universitaire de Francfort/Main. Arch. : Schlempp + Schwethelm

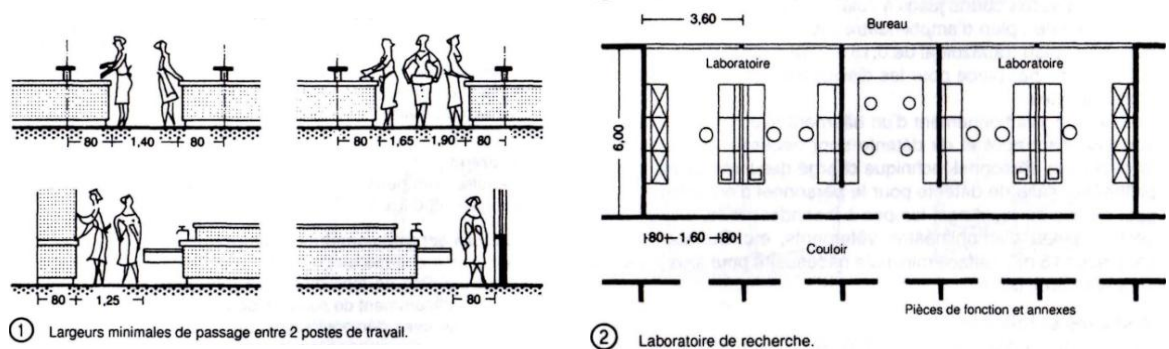


Figure 22: Exigences techniques d'un laboratoire de recherche (Source: Jean-michel, 2009)

3.3.2. Projection et conférence :

Les grands amphithéâtres pour cours magistraux sont placés de préférence dans les bâtiments pour conférences. Les amphithéâtres plus petits pour cours de spécialisation, dans des bâtiments pour instituts et séminaires.

Accès à l'amphithéâtre séparé du secteur de recherche, par le plus court chemin, si possible de l'extérieur, par l'arrière de l'amphithéâtre derrière la plus haute rangée, lorsque les sièges s'élèvent graduellement, pour les grands amphithéâtres aussi sur le côté, à mi-hauteur.

Les professeurs pénètrent dans l'amphithéâtre par devant, par la salle de préparation, d'où les préparations expérimentales sont amenées sur chariot dans l'amphithéâtre.

Tailles usuelles des amphithéâtres 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800 places. Les amphithéâtres jusqu'à 200 places (hauteur d'environ 3,50 m) peuvent être intégrés dans les bâtiments des instituts, au-delà il est préférable qu'ils aient leur propre bâtiment.

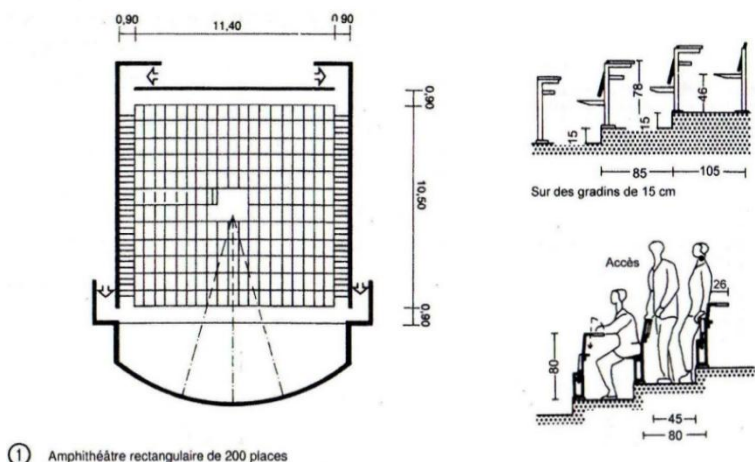


Figure 23: Amphithéâtre de 200 places (Source: Jean-michel, 2009)

3.3.3. Bureaux de travail :

Les formes de bureaux, et donc le découpage spatial, sont liées à l'activité, à l'organisation des processus, aux techniques de communication et à la culture d'entreprise. Grâce à la structure du bâtiment et à l'aménagement spatial, il est possible d'influer fortement sur l'utilisation. Une plus grande efficacité peut être obtenue notamment par une réduction de la surface par poste de travail, l'accompagnement spatial des processus et le renforcement de la motivation.

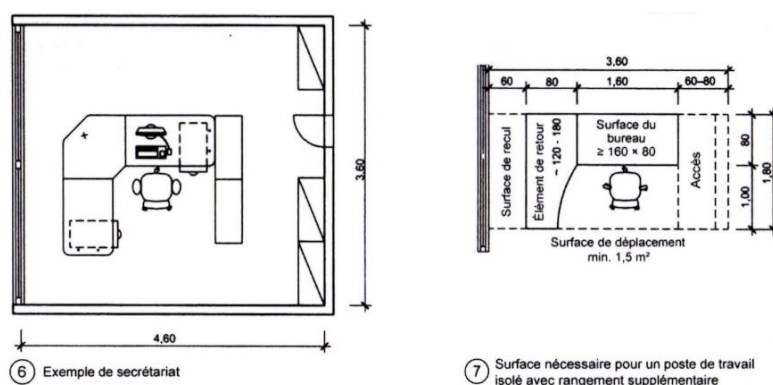


Figure 24: Surface d'un poste de travail (Source: Jean-michel, 2009)

3.3.4. Bibliothèque et médiathèque :

Leur rôle est d'être un centre de ressources et d'information tant pour l'enseignement scolaire, la formation continue que pour les loisirs. Les utilisateurs sont les élèves et les professeurs, mais peuvent être aussi des personnes extrascolaires.

La bibliothèque conserve et met à la disposition des élèves et des professeurs des ouvrages et des publications (dépôt et prêt) et possède des salles de lecture et de travail.

La médiathèque comprend un éventail plus large de documents non seulement écrits mais aussi sonores, visuels ou informatiques et peut offrir des possibilités d'enregistrement et d'écoute (matériels audiovisuels, stock de cassettes vidéo et audio et de logiciels).

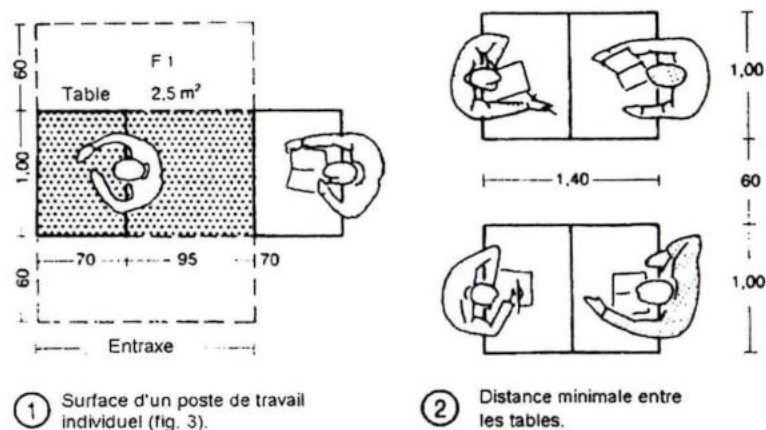


Figure 25: Distance minimale entre les tables (Source: Jean-michel, 2009)

Conclusion :

En conclusion, l'architecture des espaces de recherche scientifique joue un rôle déterminant dans la réussite des projets scientifiques en créant des environnements propices à l'innovation, à la collaboration et à la performance. En intégrant des principes d'optimisation spatiale, de confort pour les utilisateurs et de flexibilité, ces espaces deviennent bien plus que de simples lieux de travail. Ils deviennent ainsi des catalyseurs d'idées, des instruments de progrès et des leviers essentiels pour répondre aux défis scientifiques contemporains, tout en soutenant une approche éco-responsable et technologiquement avancée.

CHAPITRE 04 : Analyse thématique

Introduction :

L'analyse thématique constitue une étape cruciale dans l'élaboration du support de référence pour la conception architecturale. Ce chapitre propose une étude approfondie de divers projets afin de définir les exigences formelles, fonctionnelles, techniques et écologiques liées au thème choisi.

Notre démarche repose sur l'analyse comparative de plusieurs réalisations, permettant de tirer parti des meilleures pratiques et solutions. Cela vise à répondre de manière optimale aux critères suivants : le choix du site, la conception architecturale, l'établissement d'un programme complet intégrant fonctionnalités et technologies.

4.1. Tasik Creative and Innovation Center :

Ce projet assure une meilleure adaptation au contexte tout en conservant la distinction initiale.



Figure 26: Tasik Creative and Innovation Center (Source: Andreaswidi, Archidaily, 2023)

4.1.1. Fiche technique :

- Nom : Tasik Creative and Innovation Center
- Situation : Tasikmalaya, Indonésie
- Architectes : SHAU Indonesia
- Superficie : 1994 m²
- Année de réalisation : 2023

4.1.2. Motivation de choix :

Le Tasik Creative and Innovation Center a été conçu comme un exemple de stratégie de conception « socio-climatique » spécifiquement adaptée au contexte de Java occidentale, en Indonésie.

L'utilisation d'une façade en double peau permet d'assurer le confort thermique tout en répondant aux exigences esthétiques.

4.1.3. Situation :

Le projet situé dans le complexe sportif de Dadaha, à Tasikmalaya, Indonésie

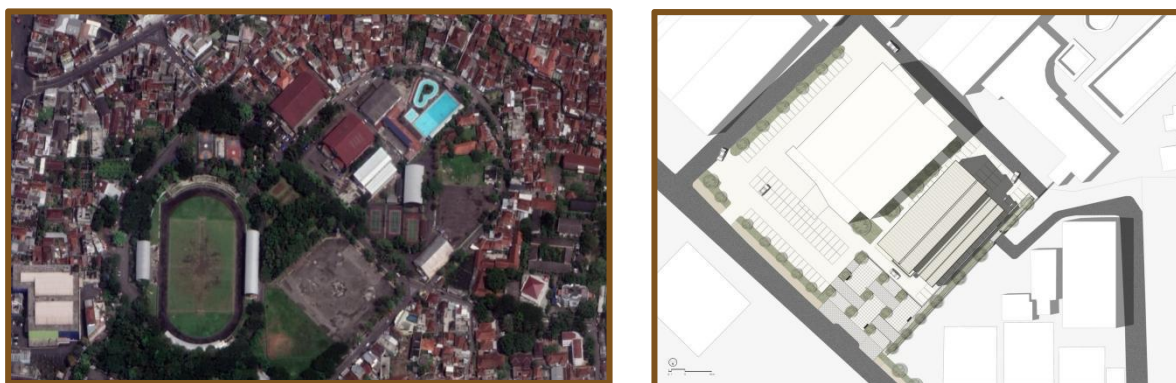


Figure 27: Plan de situation (Source: Arch20, 2023)

4.1.4. Accessibilité :

Un des objectifs principaux du projet était de conserver le parking existant. Pour cela, plusieurs accès ont été mis en place : des accès mécaniques pour les voitures et des chemins piétons bien délimités, menant directement au site. Ces aménagements permettent une circulation fluide et accessible à tous.

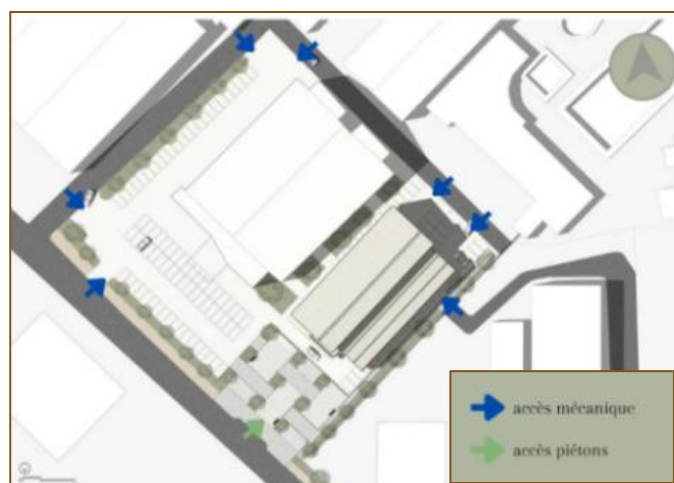


Figure 28: Plan de masse (Source: Arch20, 2023)

4.1.5. Volumétrie :

Le projet se compose de deux volumes parallélépipédiques superposés avec un toiture inclinée. la structure repose sur des pilotis pour libéré le sol au parking et crée également la possibilité d'un grand escalier de sièges qui donne sur une place publique.

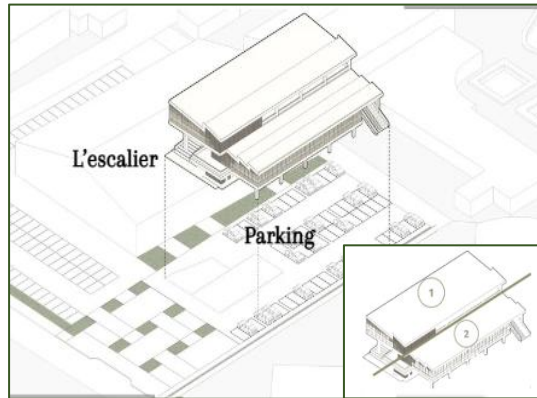


Figure 29: Volumétrie de Tasik creative and innovation center (Source: Arch20, 2023)

4.1.6. Façades :

Le volume est enveloppé par des éléments de façade tissés, qui réduisent l'apport de chaleur solaire et ombragent l'intérieur. Les panneaux tissés et les densités sont choisis en fonction du programme correspondant derrière la façade et de la vue vers l'extérieur.

Les façades en tissu semi-transparent sont utilisées pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments en réduisant les coûts de climatisation et en améliorant l'isolation. Elles peuvent également ajouter un aspect esthétique au design architectural.

Les tissus semi-transparent sont souvent utilisés en raison de leur transparence à la lumière. Ils sont fabriqués à partir de fibres de verre tissées qui sont enduites de PTFE ou de silicone.

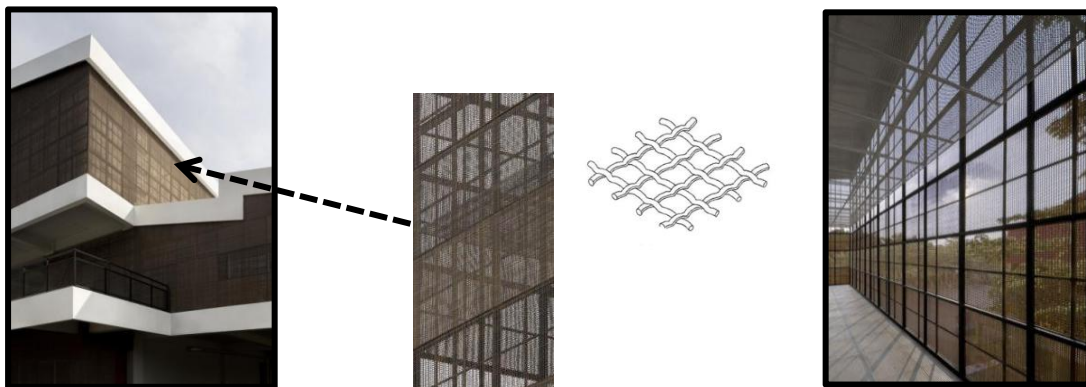


Figure 30: Façades en tissu semi-transparent (Source: Andreaswidi, Archidaily, 2023)

4.1.7. Analyse spatio- fonctionnelle :

Conçu comme un bâtiment culturel tropical, le Tasik Creative and Innovation Center intègre des balcons, des terrasses et des espaces semi-extérieurs, invitant les visiteurs à entrer et à explorer. Pour souligner le caractère public du bâtiment, un parcours à travers le bâtiment, passant par la zone d'exposition, a été introduit.

Ce parcours est accessible à tout moment de la journée, ce qui permet de voir à tout moment des parties des œuvres exposées ou un atelier d'art en cours de réalisation.

Le bâtiment abrite également des espaces de travail collaboratif et un auditorium pour les événements et les projections de films.

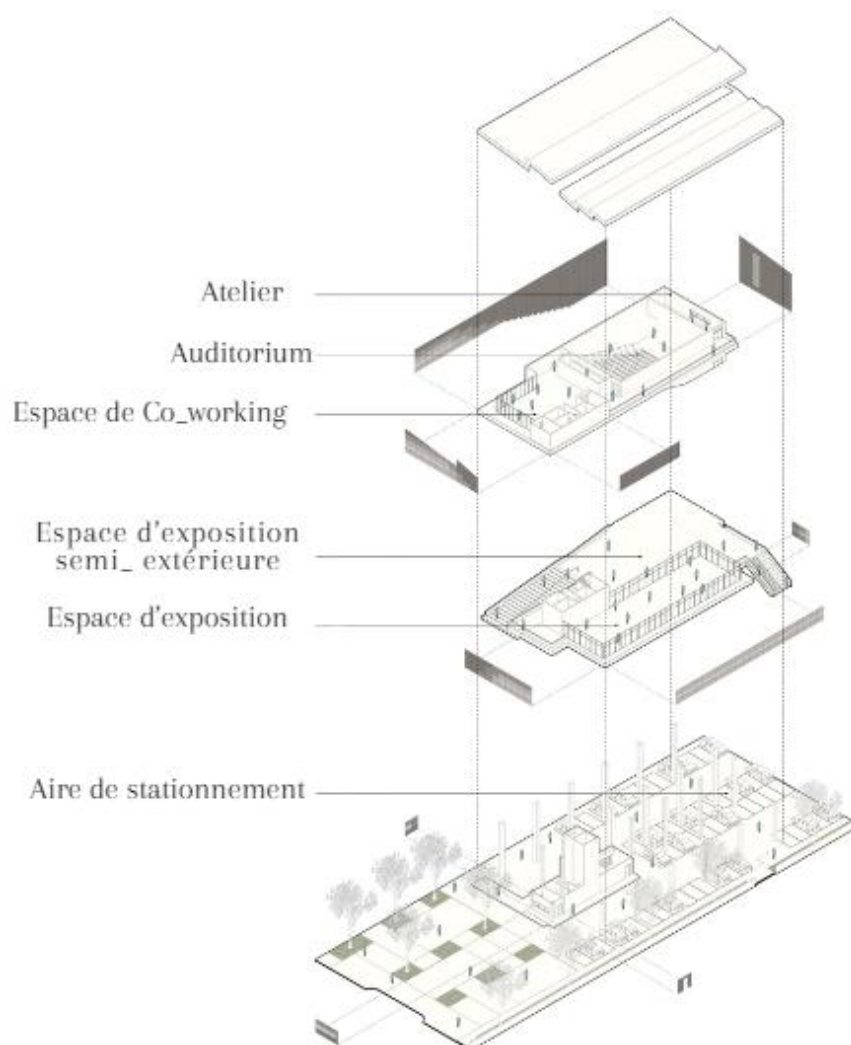


Figure 31: Axonométrie éclatée (Source: Arch20, 2023)

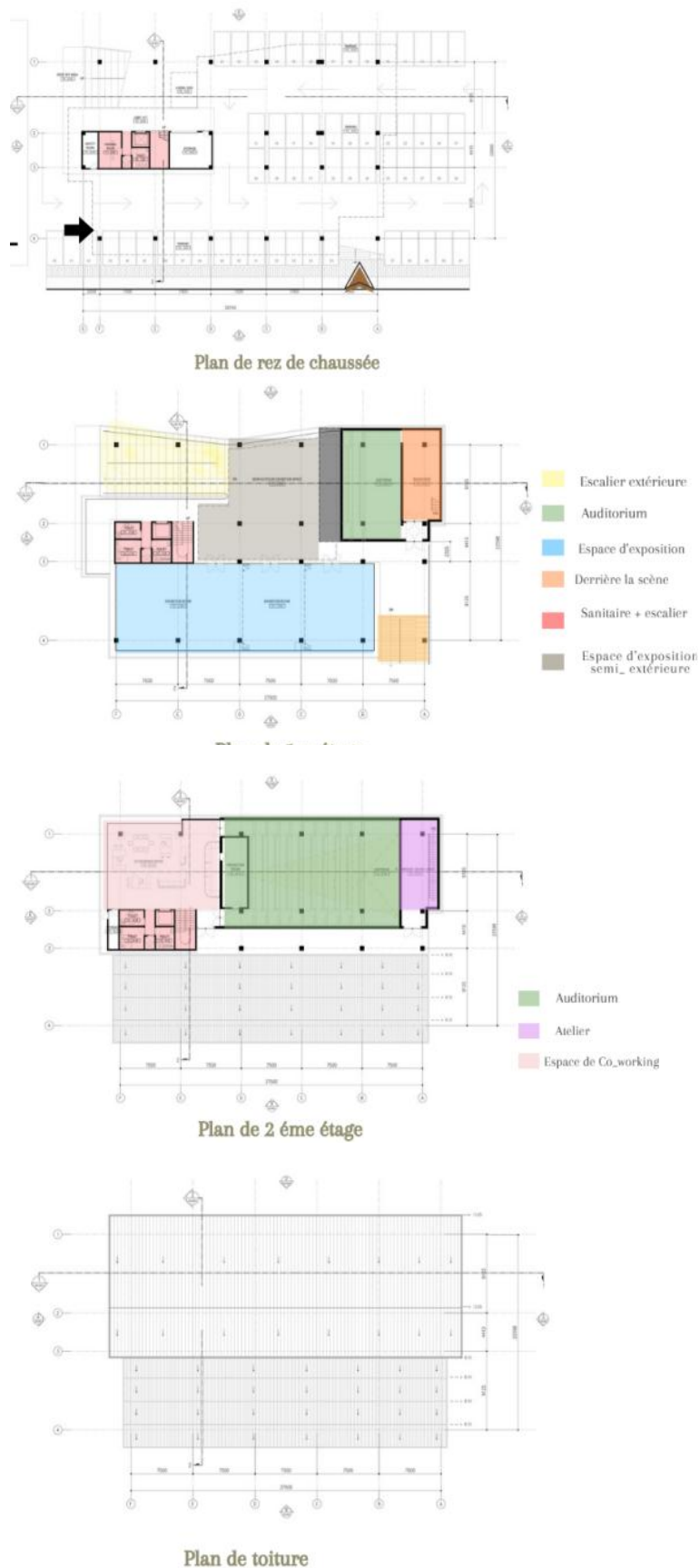


Figure 32: Plans des étages (Source: Auteur d'après arch20, 2023)

4.2. Greenpoint Library and Environmental Education Center :

Le projet est un modèle de nouveaux partenariats et d'objectifs uniques et axés sur la communauté dans la planification des bibliothèques publiques, en associant des services de bibliothèque de pointe à des espaces communautaires pour des activités liées à l'éducation environnementale. Démonstration d'approches innovantes en matière de conception durable, la bibliothèque promeut également la durabilité communautaire, sociale et culturelle grâce à sa programmation récemment élargie.



Figure 33: Greenpoint Library and Environmental Education Center (Source: Michael, Archidaily, 2020)

4.2.1. Fiche technique :

- Nom : Greenpoint Library and Environmental Education Center
- Situation : Brooklyn ;United States
- Architectes : Marble Fairbanks Architects
- Superficie : 1500 m²
- Année de réalisation : 2020

4.2.2. Motivation de choix :

Le bâtiment dépasse les objectifs de la norme Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), devenant un projet de démonstration d'approches innovantes en matière de conception durable et un outil éducatif pour la communauté.

Meilleure implantation et orientation (aspect de conception bioclimatique).

4.2.3. Situation :

Le projet situé dans une zone résidentielle de Brooklyn, à United stated.

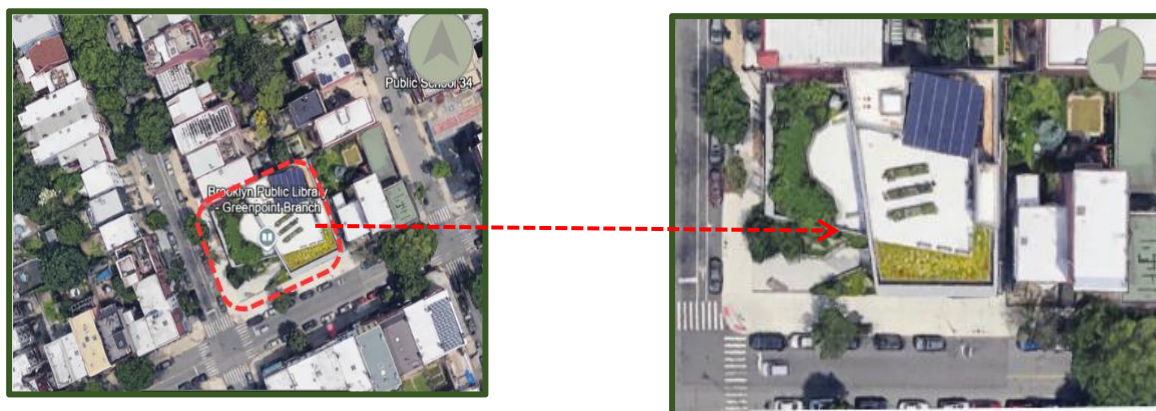


Figure 34: Plan de situation (Source: Michael, Archidaily, 2020)

4.2.4. Accessibilité :

Le projet est accessible par deux accès piéton séparé l'un pour la bibliothèque et l'autre pour le centre de recherche.



Figure 35: Plan de masse (Source: Michael, Archidaily, 2020)

4.2.5. Volumétrie :

La conception double taille du bâtiment précédent, offrant des espaces intérieurs et extérieurs agrandis pour abriter des activités élargies liées à l'exploration de l'environnement ainsi qu'à l'utilisation quotidienne de la bibliothèque.



Figure 36: Volumétrie du bâtiment (Source: Michael, Archidaily, 2020)

4.2.6. Façades :

Une façade bioclimatique est une structure conçue pour optimiser l'efficacité énergétique d'un bâtiment en tirant partie des conditions climatiques locales. Elle intègre des éléments passifs, tels que des fenêtres orientées de manière stratégique, des protections solaires (comme des brise-soleil ou des volets) et des matériaux thermiquement performants, afin de réguler la température intérieure et de maximiser la lumière nature.

En été, la façade bioclimatique permet de limiter la surchauffe en filtrant la lumière directe du soleil et en favorisant la ventilation naturelle. En hiver, elle capte la chaleur solaire pour réduire les besoins en chauffage. Cette approche contribue à réduire la consommation d'énergie et à améliorer le confort thermique.



Figure 37: Façade bioclimatique (Source: Marble Fairbanks Architects, Archidaily ,2020)

Les systèmes de construction, les fenêtres solaires alignées sur les équinoxes et les solstices et les matériaux locaux sont notés à l'intérieur. Les matériaux extérieurs comprennent du bois sablé sur mesure et des panneaux en béton coulé, développés avec un artisan local de Brooklyn.

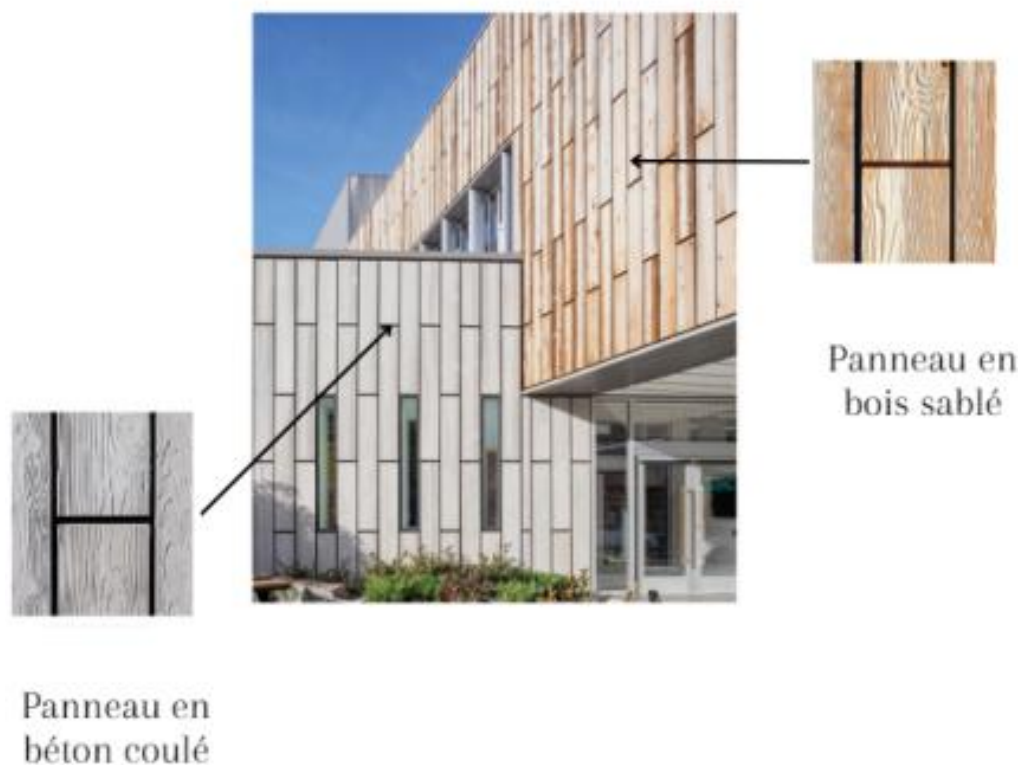


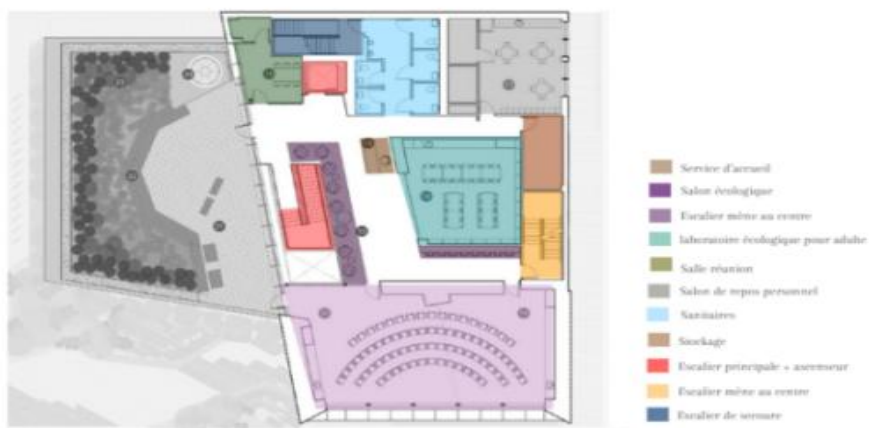
Figure 38: Les matériaux extérieurs (Source: Michael, Archidaily, 2020)

4.2.7. Analyse spatio-fonctionnelle :

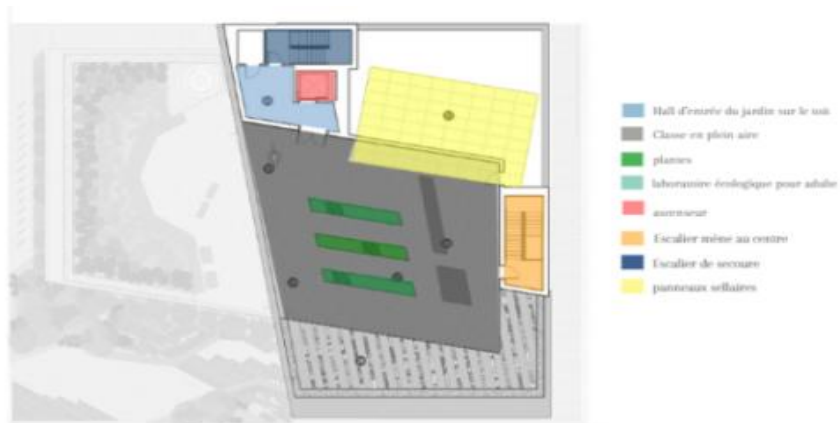
Les principaux éléments du programme sont les salles de lecture et les espaces de collection pour adultes, jeunes adultes et enfants, ainsi que les espaces communautaires. Des espaces de laboratoire pour des projets interactifs, un grand espace événementiel communautaire (qui peut être divisé en espaces de laboratoire), un salon, de petites salles de réunion et des espaces pour le personnel sont répartis sur les deux niveaux.



Plan de rez de chaussée



Plan de 1er étage



Plan de 2ème étage

Figure 39: Plans des étages (Source: Auteur d'après Marble Fairbanks Architects, Archdaily, 2020)

4.3. Watt family innovation Center :

Le Watt Family Innovation Center est le bâtiment universitaire le plus perfectionné en matière de technologie, doté d'une technologie de l'information de pointe et d'installations spéciales.

Sa mission est de créer un environnement propice à la collaboration entre les étudiants, les professeurs et les dirigeants de l'industrie et des agences gouvernementales, afin de générer des idées et de résoudre des problèmes complexes.



Figure 40: Watt family innovation Center (Source: Jonathan & Michelle, Archidaily, 2016)

4.3.1. Fiche technique :

- Nom : Watt family innovation Center
- Situation : Sigma Dr, Clemson, Caroline du Sud, États-Unis
- Architectes : Perkins+Will
- Superficie : 77 000 pi²
- Année de réalisation : 2016

4.3.2. Motivation de choix :

- Le Watt Family Innovation Center permet aux étudiants de concrétiser leurs idées du concept à la réalité et de favoriser la collaboration interdisciplinaire dans un espace inspirant.

- Un programme riche et fonctionnel.

4.3.3. Situation :

Le projet situé dans l'Université Clemson ,Caroline du Sud, États-Unis.

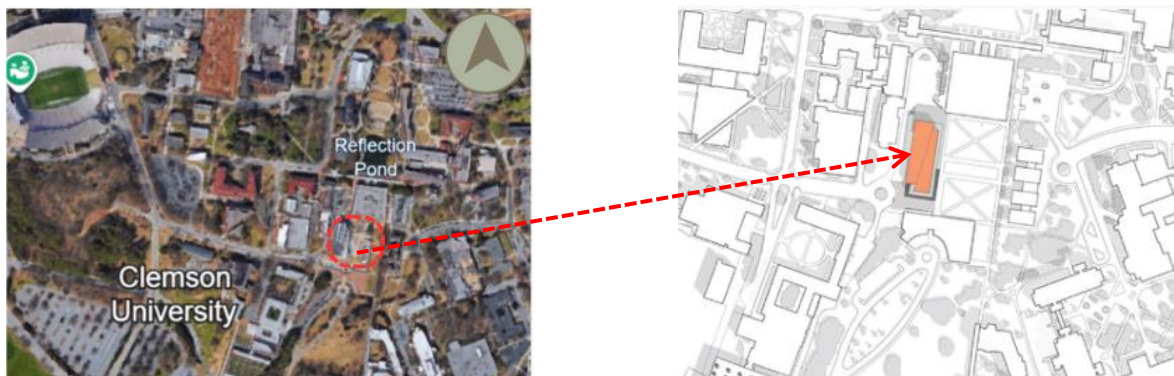


Figure 41: Plan de situation (Source: Perkins & Will ,Archidaily, 2016)

4.3.4. Accessibilité :

Le projet situé sur un site long et étroit adjacent à un quadrilatère de campus dynamique et actif, l'établissement engage les passants et invite les étudiants à faire passer leurs idées du concept au marché en utilisant ses riches espaces de programme.

Plusieurs entrées vers différents espaces pour éviter la surpopulation.

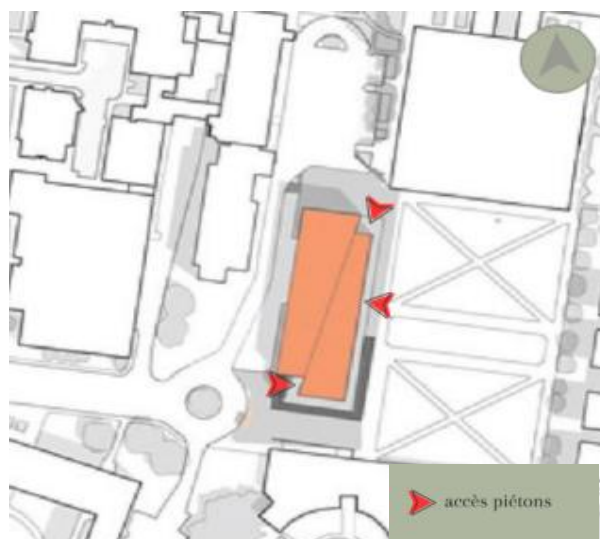


Figure 42: Plan de masse (Source: Perkins & Will, Archidaily, 2016)

4.3.5. Volumétrie :

Le bâtiment est constitué de deux triangles tronqués qui se chevauchent et forment des points d'entrée. Le triangle du côté ouest est plus solide pour soutenir les installations centrales et les

laboratoires interdisciplinaires. Le côté est transparent s'ouvre et se jette dans le quadrilatère par le biais d'une arcade qui crée un chemin piétonnier nord-sud avec vue sur une galerie ouverte et un espace atrium. Une terrasse sur le toit surplombant le quadrilatère est située au dernier étage du côté est.

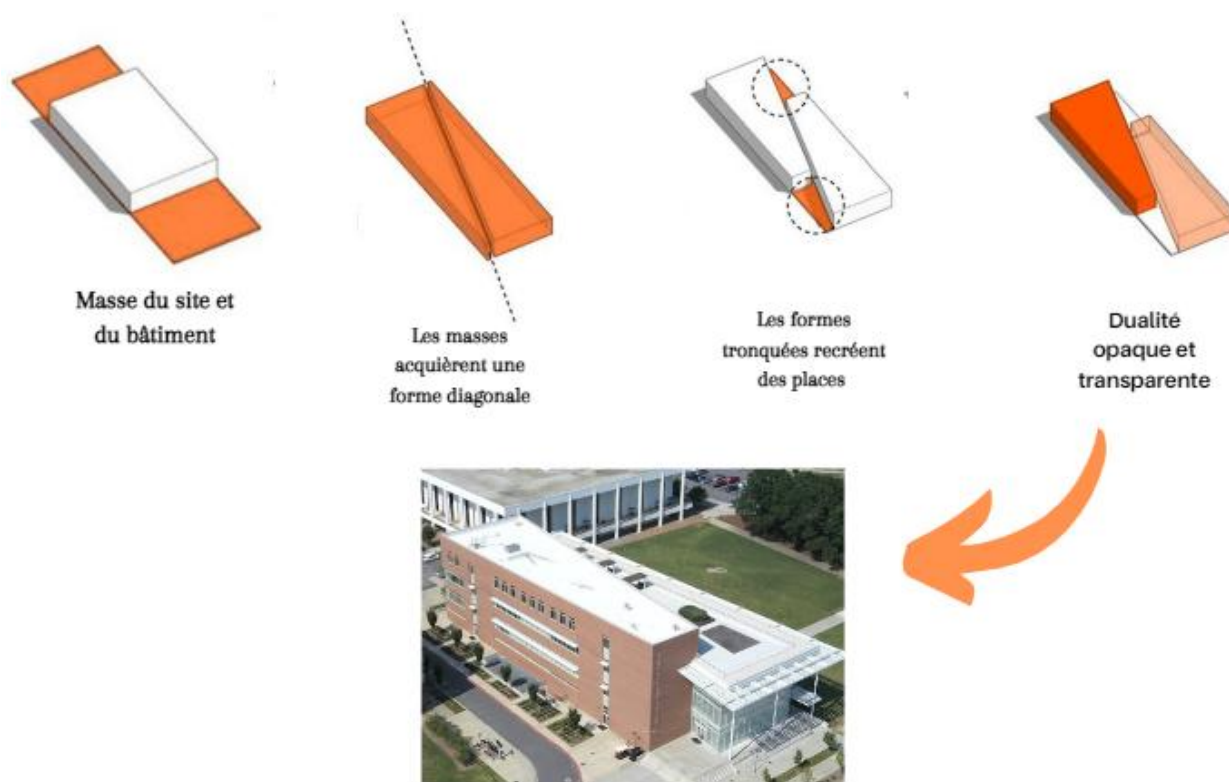


Figure 43: Volumétrie du bâtiment (Source: Perkins & Will, Archidaily, 2016)

4.3.6. Façades :

- L'utilisation du métal déployé : ce matériau peut être utilisé comme panneaux de protection, brise-soleil, garde-corps, ainsi que pour le revêtement de façade, les clôtures, les faux plafonds et les meubles.
- Selon leur application architecturale, les mailles en métal déployé garantissent une transparence visuelle et une couverture partielle, ainsi qu'une alternance entre plein et vide. Tout cela confère élégance et confort insonorisé important à l'environnement.



Figure 44: Façade principale (Source: Jonathan & Michelle, Archidaily, 2016)

4.3.7. Analyse spatio-fonctionnelle :

Ce bâtiment de quatre étages constitue le cœur académique du campus, avec des salles de classe, un auditorium et des espaces communs modulables soutenus par une infrastructure technologique robuste au service de la communauté étudiante. Les cours vont de l'ingénierie générale aux études de communication et des SIG et de la modélisation 3D aux soins infirmiers. Le centre reprend le bâtiment universitaire traditionnel qui respecte les frontières des disciplines, des majeures et des collèges, et le renverse.

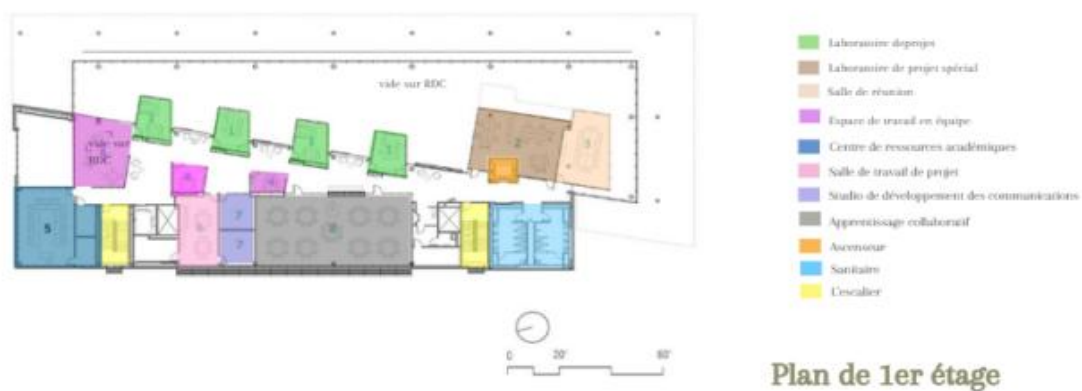
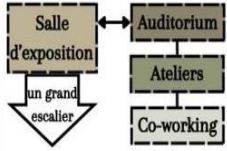






Figure 45: Plans des étages (Source: Auteur d'après Perkins & Will, Archidaily, 2016)

Synthèse de l'analyse thématique :

	EX :01	EX :02	EX :03	Synthèse
01	Le projet se situe dans un contexte purement urbaine	Le projet située dans un milieu urbaine	Le centre se située au milieu universitaire	Le projet doit être intégré dans un milieu urbaine ou bien universitaire
02	Circulation séparer (Mécanique empîétons)	Deux entrées vers le projet (bibliothèque ,centre de recherche)	Plusieurs entrées vers différents espaces pour éviter la surpopulation	<ul style="list-style-type: none"> • Circulation séparer (Mécanique et piétons) • Accès remarquable et monumentale
03	deux volumes parallélépipédiques repose sur des pilotées	Deux volumes superposé (forme _ fonction)	une volumétrie simple et claire avec la démarcation dans la forme	La volumétrie de projet doit être respecter les exigences conceptuelles et les exigences fonctionnelles
04	<ul style="list-style-type: none"> • Les façades couvert par tissu semi-transparent utilisées pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments (Enveloppe architectural) • Matériaux : le tissu est fabriqué à partir de fibres de verre tissées qui sont enduites de PTFE ou de silicone. 	<ul style="list-style-type: none"> • plusieurs type d'éclairage ça dépend l'orientation de façade • les fenêtres solaires alignées • Matériaux : panneaux en bois sablé et en béton coulé 	<ul style="list-style-type: none"> • une alternance entre plein et vide • L'utilisation du métal déployé la façade peut être utilisé comme panneaux de protection, brise-soleil • Matériaux : le béton et le verre 	<ul style="list-style-type: none"> • une alternance entre plein et vide. • plusieurs type d'éclairage ça dépend l'orientation de façade. • les fenêtres couvert par les Maucharabieh • Matériaux : le béton et le verre avec des conditions et des améliorations
05		 		

CHAPITRE 05 : Analyse du site

Introduction :

L'analyse du site est une étape-clé pour adapter la conception architecturale aux spécificités du lieu. Dans ce chapitre, nous allons présenter le cas d'étude de notre site qui se situe au centre de la ville de Chlef, tout en appuyant sur son contexte géographique et climatique.

Notre mission est de comprendre les conditions environnementales notamment la température, l'ensoleillement, l'humidité et les vents afin d'orienter la conception vers des solutions bioclimatiques adaptées.

5.1. Présentation du cas d'étude :

5.1.1. Situation géographique du cas d'étude :

La wilaya de Chlef est située dans le nord-ouest de l'Algérie, à environ 200 km à l'ouest d'Alger. Avec une superficie de près de 4 975 km², notre territoire s'étend sur 13 daïras, réparties en 35 communes. Grâce à son emplacement de choix, elle bénéficie d'une situation géographique stratégique. Délimitée au nord par la mer Méditerranée, à l'est par la wilaya de Tipaza, à l'ouest par celle de Mostaganem et au sud par les wilayas de Tissemsilt et Tiaret, cette région présente un potentiel de développement exceptionnel. Le climat de cette région est de type méditerranéen à tendance semi-aride, avec des étés très chauds et secs et des hivers doux et pluvieux. Le territoire de Chlef présente un potentiel touristique indéniable avec la vallée de l'oued Cheliff, la plus longue d'Algérie, offrant une grande diversité de paysages, allant des plaines fertiles aux montagnes du Dahra et de l'Ouarsenis.

5.1.2. Aperçu historique :

La carte d'évolution de la ville de Chlef montre le premier noyau historique apparu dans la période romaine 40ans après J.-C. La période coloniale a connu la construction du noyau colonial (probablement sur l'emplacement romain), puis l'apparition du quartier de la Ferme, suivie de plusieurs extensions : deuxième extension Bocaa après le séisme de 1934, troisième extension de la cité d'urgence après le séisme du 1954, quatrième extension après séisme de 1980 et l'apparition des quartiers préfabriqués jusqu'à l'état actuel et la création de nouvelle ville.

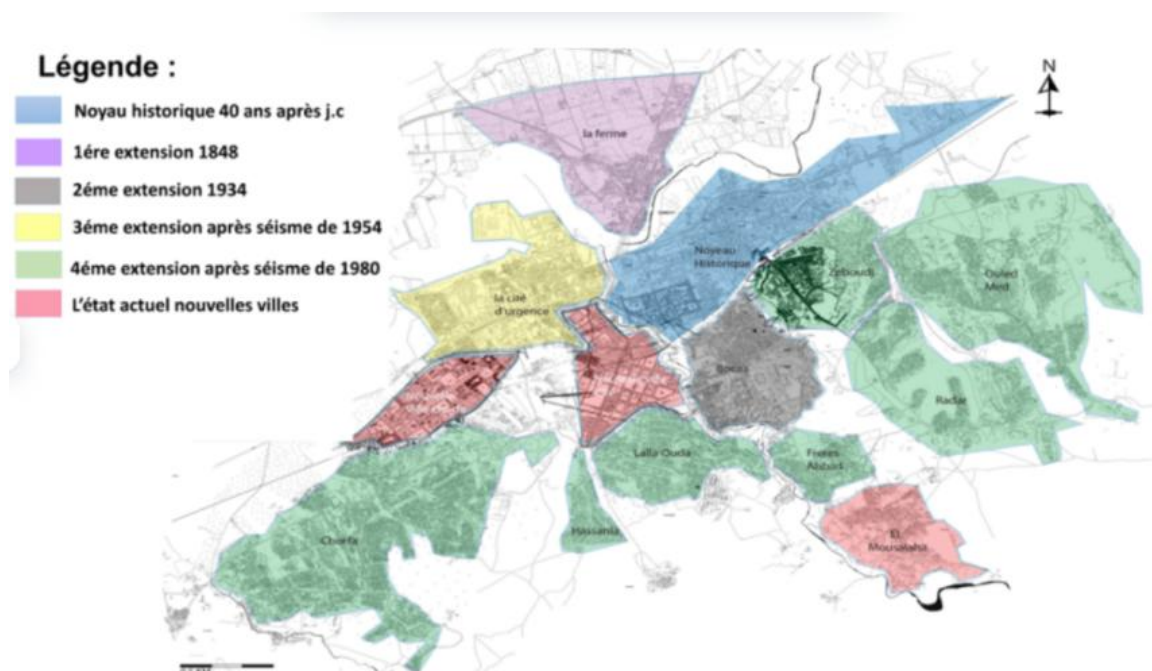


Figure 46: La carte d'évolution de la ville de Chlef

5.1.3. Analyse climatique :

Le climat de Chlef est subtropical, avec des hivers doux et relativement pluvieux, et des étés très chauds et ensoleillés.

En été, l'éloignement de la mer est suffisant pour avoir des journées torrides. En juillet 2023 elle a atteint 48,3 °C, avec une minimale de 34,5 °C.

5.1.3.1. La température :

La saison très chaude dure 2,8 mois, du 16 juin au 11 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 34 °C. Le mois le plus chaud de l'année à Chlef est juillet, avec une température moyenne maximale de 38 °C et minimale de 23 °C.

La saison fraîche dure 3,9 mois, du 18 novembre au 15 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 20 °C. Le mois le plus froid de l'année à Chlef est janvier, avec une température moyenne minimale de 7 °C et maximale de 16 °C.

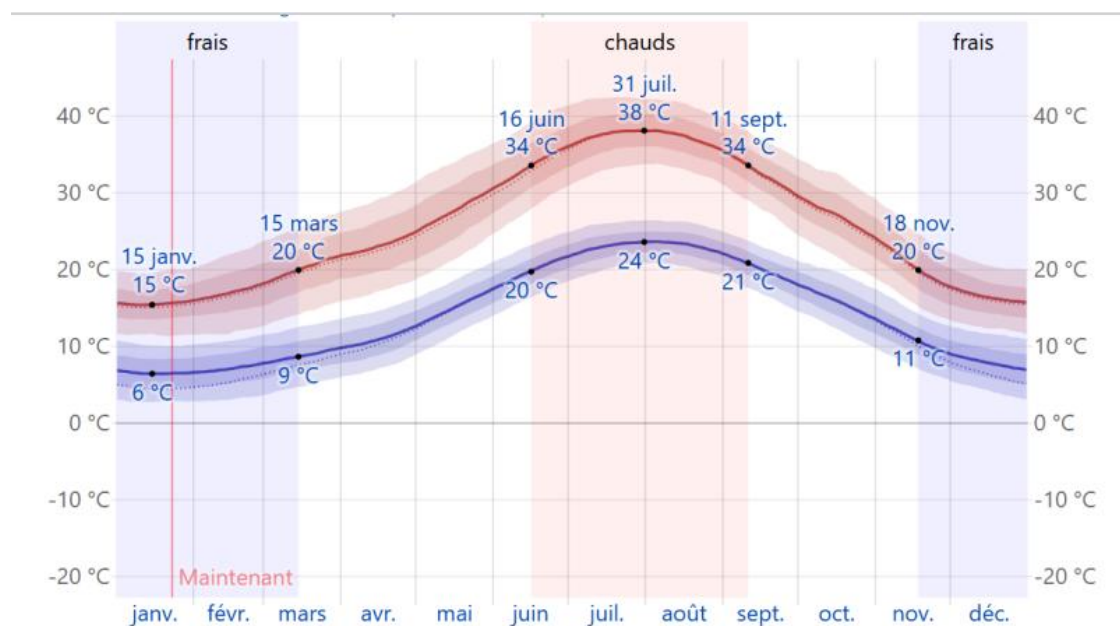


Figure 47: Les données climatique du température saisonnière Chlef (Source: Weatherspark, 2024)

5.1.3.2. Précipitation :

La saison connaissant le plus de précipitation dure 8,0 mois, du 21 septembre au 21 mai, avec une probabilité de précipitation quotidienne supérieure à 12 %. Le mois ayant le plus grand nombre de jours de précipitation à Chlef est février, avec une moyenne de 6,3 jours ayant au moins 1 millimètre de précipitation.

La saison la plus sèche dure 4,0 mois, du 21 mai au 21 septembre. Le moins ayant le moins de jours de précipitation à Chlef est juillet, avec une moyenne de 0,5 jour ayant au moins 1 millimètre de précipitation.

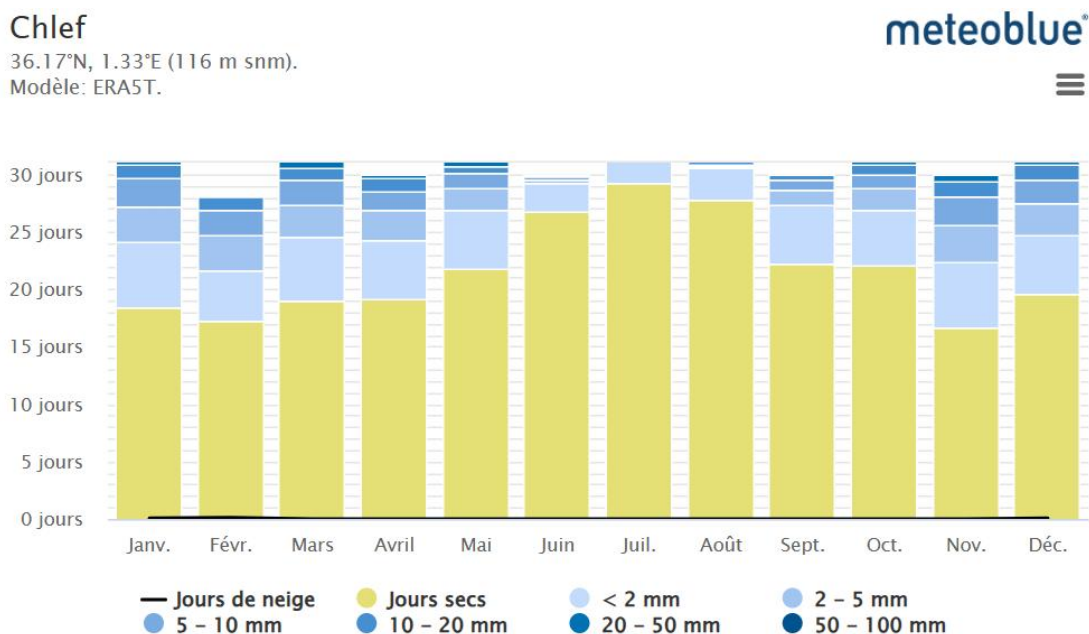


Figure 48: Le diagramme de précipitation Chlef (Source: Metblue, 2025)

5.1.3.3. Le vent :

La vitesse horaire moyenne du vent à Chlef connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année.

La période la plus venteuse de l'année dure 6,4 mois, du 6 novembre au 18 mai, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 13,7 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux de l'année à Chlef est février, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 14,9 kilomètres par heure.

La période la plus calme de l'année dure 5,6 mois, du 18 mai au 6 novembre. Le mois le plus calme de l'année à Chlef est août, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 12,4 kilomètres par heure.

La direction horaire moyenne principale du vent à Chlef varie au cours de l'année.

Le vent vient le plus souvent de l'est pendant 3,4 mois, du 13 juin au 24 septembre, avec un pourcentage maximal de 32 % le 19 juillet. Le vent vient le plus souvent de l'ouest pendant 8,6 mois, du 24 septembre au 13 juin, avec un pourcentage maximal de 38 % le 1 janvier.

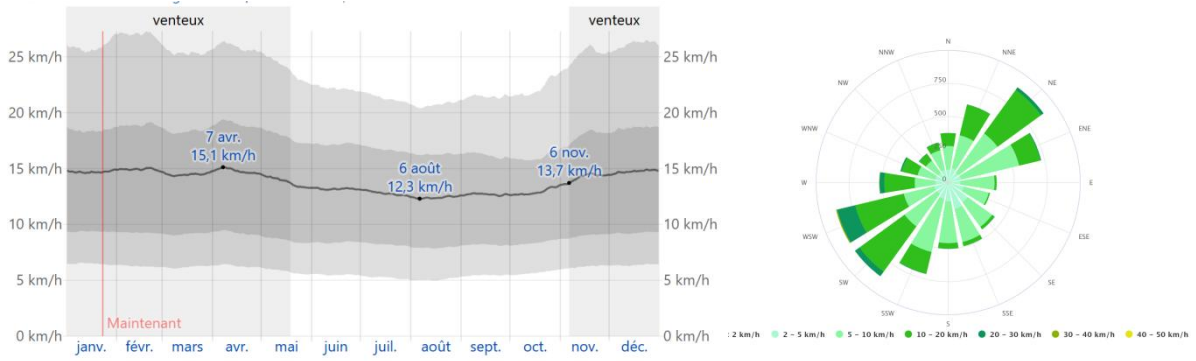


Figure 49: Direction et intensité des vents dominants à Chlef (Source: Metblue, 2025)

5.1.3.4. Humidité relative :

Les points de rosée plus bas sont ressentis comme un environnement plus sec et les points de rosée plus haut comme un environnement plus humide. Contrairement à la température, qui varie généralement considérablement entre le jour et la nuit, les points de rosée varient plus lentement. Ainsi, bien que la température puisse chuter la nuit, une journée lourde est généralement suivie d'une nuit lourde. Chlef connaît des variations saisonnières modérées en ce qui concerne l'humidité perçue.

La période la plus lourde de l'année dure 3,5 mois, du 20 juin au 5 octobre, avec une sensation de lourdeur, oppressante ou étouffante au moins 5 % du temps. Le mois ayant le plus grand nombre de jours lourds à Chlef est août, avec 5,3 jours lourds ou plus accablants.

Le jour le moins lourd de l'année est le 25 janvier

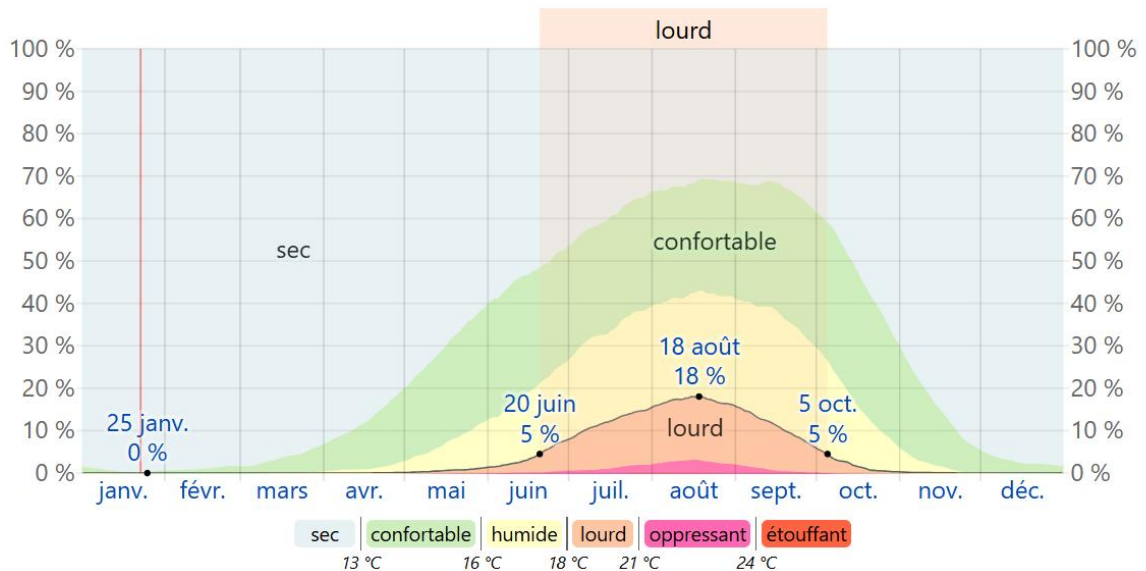


Figure 50: Le diagramme d'humidité Chlef (Source : Metblue, 2025)

5.2. Présentation de site intervention :

5.2.1. Situation :

Le site se trouve à l'extrémité sud-ouest de la ville de Chlef, dans l'extension du l'ancien quartier « Hay El Hassania ».

Le site se situe dans Le nouveau Pôle Universitaire d'El Hassania.



Figure 51: Situation du site (Source: Google earth, 2025)

5.2.2. Points de repères :

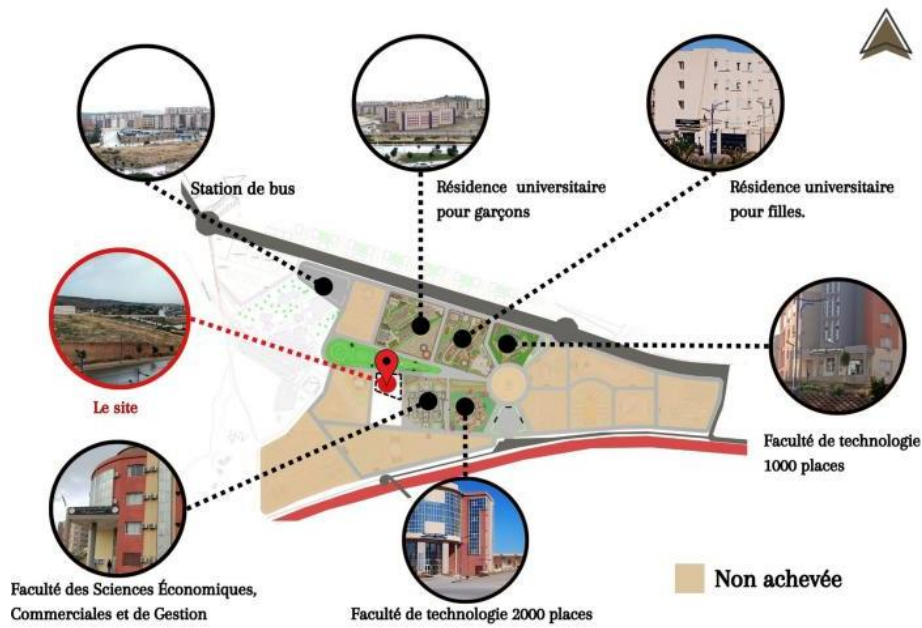


Figure 52: Les points de repères (Source: Auteur)

5.2.3. Voirie et accessibilité :

Notre site bénéficie d'une accessibilité aisée grâce à la présence de multiples axes importants : La voie périphérique offre un accès direct à notre site qui relie le centre-ville à la zone de Elhassania.

L'autoroute est-ouest confère une grande importance à l'université à l'échelle régionale.



Figure 53: Accessibilité (Source: Auteur)

5.2.4. Vent dominant et climat

Le terrain est orienté vers le nord.

Le vent dominant vient de l'ouest.

Le site est très bien ensoleillé grâce à sa position (en haut de la pente), aussi l'absence des obstacles.

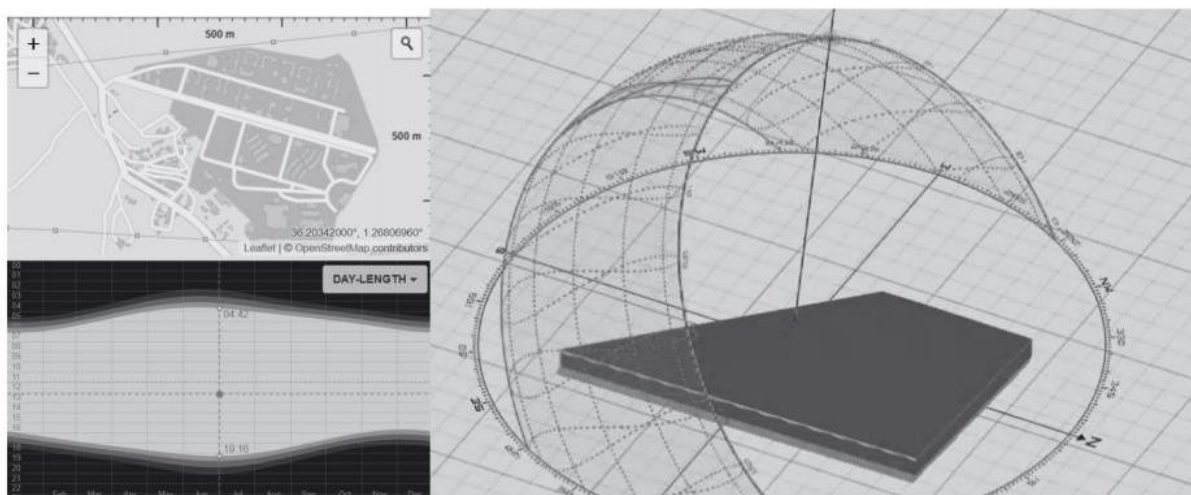


Figure 54: Trajectoire du soleil (Source: Auteur)

5.2.5. État des hauteurs et fonction

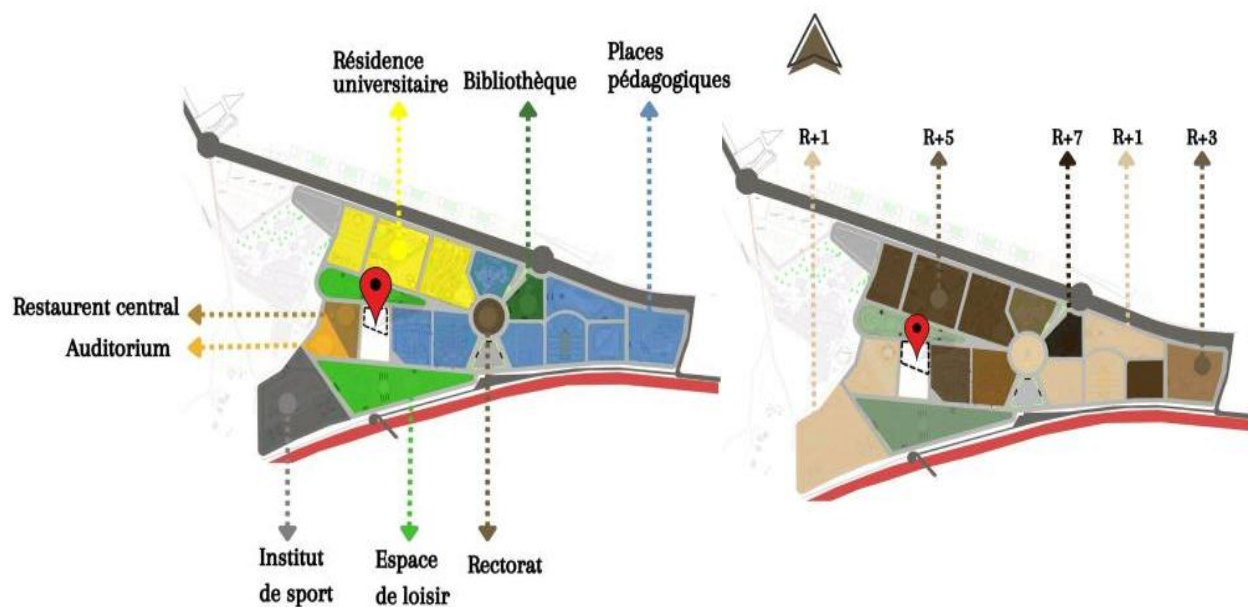


Figure 55: État des hauteurs et fonction (Source: Auteur)

5.2.6. Topographie du terrain:

Un terrain en pente de 7m.

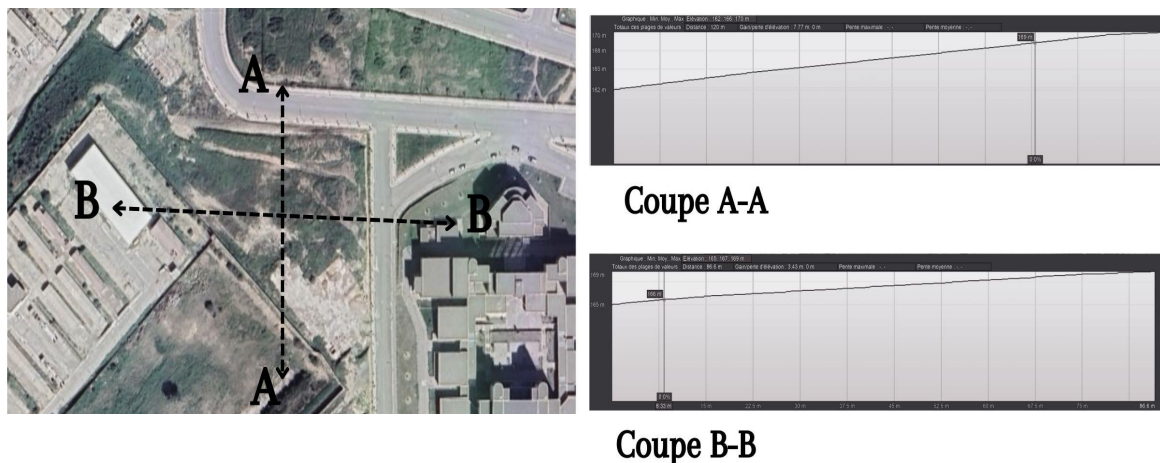


Figure 56 : Topographie du terrain (Source: Auteur)

5.2.7. Délimitation du terrain:

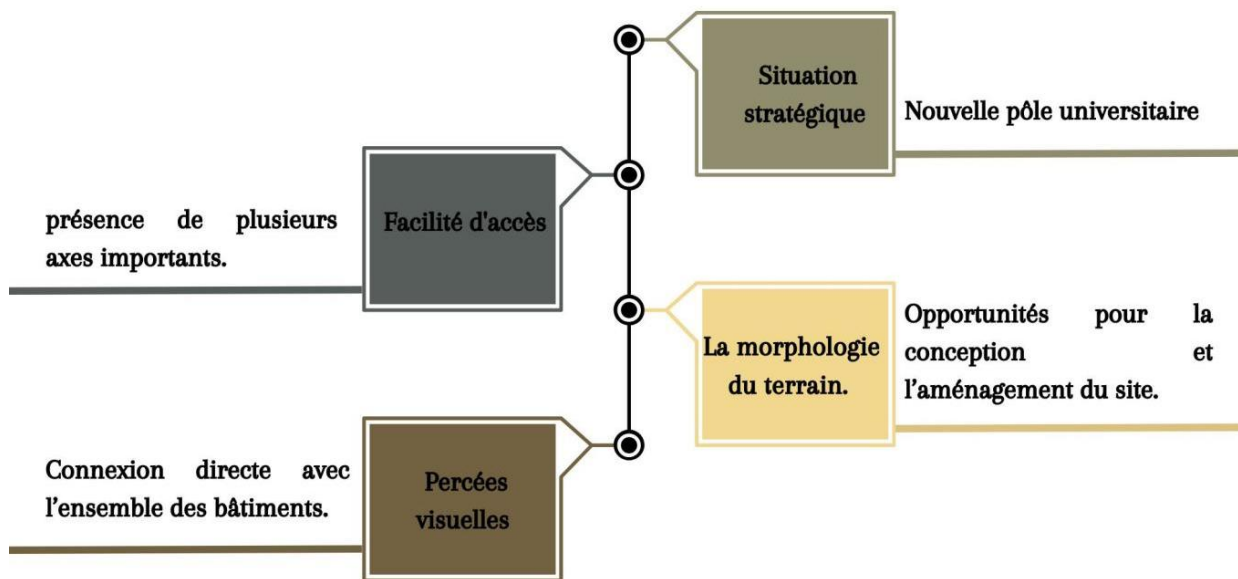
Le terrain est d'une surface de 5966,14 m². Délimité par :

- Le nord : Espace vert
- Le sud : Terrain vide
- L'Est : Faculté des Sciences Économiques, Commerciales et de Gestion
- Le Ouest : Restaurant central (Non achevée)



Figure 57: Délimitation du terrain (Source: Auteur)

Synthèse de l'analyse du site :



CHAPITRE 06 : Projet architectural

Introduction :

Ce projet architectural propose la création d'un centre de recherche à Chlef, conçu en réponse aux contraintes climatiques locales. L'objectif est de développer un espace fonctionnel et agréable, en intégrant des stratégies passives pour améliorer le confort thermique. L'architecture vise ainsi à offrir des conditions de travail optimales tout en limitant la consommation énergétique

6.1. Processus de conception architecturale :

L'équipement constitue l'un des axes majeurs du développement et du renforcement de la recherche dans les différents domaines de science et technologie à l'Université Hassiba Benbouali Chlef (UHBC). Il est destiné aux chercheurs, enseignants et enseignants-chercheurs dans le cadre de leurs projets. Il joue également un rôle essentiel dans la formation associée à la recherche, en accompagnant les étudiants dans l'obtention de leurs diplômes : master recherche, master spécialisé, doctorat et diplômes d'ingénieurs.

Cet équipement vise à favoriser l'intégration de la dimension nationale dans le cursus de formation et de recherche, en alignant les compétences développées au sein de l'université sur les besoins stratégiques des domaines scientifiques et technologiques du pays.

6.1.1. Programmation :

Notre projet consiste en une proposition d'un centre de recherche qui doit comprendre les entités suivantes :

- Entité recherche : répartie en quatre parties selon les domaines de recherche
 - Entité de recherche en mécanique
 - Entité de recherche en génie civil
 - Entité de recherche en génie des procédés
 - Entité de recherche en génie électrique
 - Entité de recherche en électronique
 - Entité de recherche en architecture
- Entité d'exposition et projection
- Entité de gestion logistique et administration.

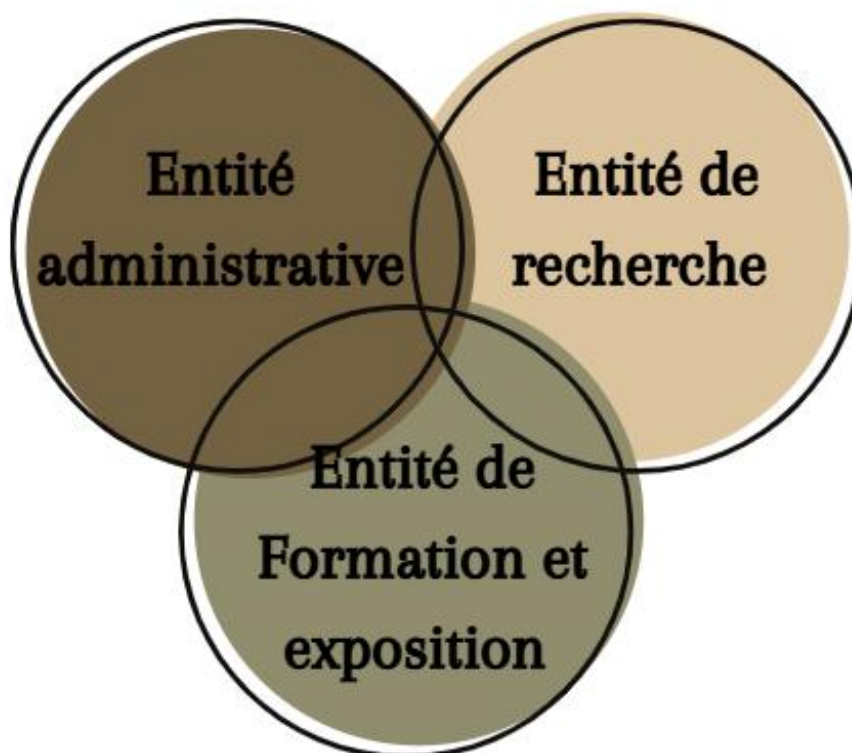


Figure 58: Les entités fondamentales du projet (Source: Auteur)

Dans le cadre de la conception d'un centre de recherche, le programme surfacique est un outil essentiel qui permet de structurer les différentes fonctions du projet en surfaces adaptées et cohérentes. Il organise les espaces de recherche, de travail collaboratif, de repos et de rencontres autour de principes de fonctionnalité, d'efficacité spatiale et de confort climatique. Notre objectif est de créer un environnement à la fois performant sur le plan thermique et convivial sur le plan humain. Pour cela, nous favorisons des espaces favorisant les échanges, l'innovation et le bien-être. Notre programme quantitatif se décline comme suit :

CHAPITRE 06 : Projet architectural

Tableau 4: Programme quantitatif (Source: Auteur)

Exposition et projection	
Espace	Surface m ²
Accueil et réception	26m ²
Espace d'exposition	120m ²
Auditorium	280m ²
Pose café.	30m ²
Sanitaires	16m ²
Surface totale : 472m ²	

Entité de recherche en génie civil	
Espace	Surface m ²
responsable du labo	26m ²
Laboratoire de géotechnique	36m ²
laboratoire des matériaux	36m ²
Atelier d'essai	180 m ²
Bureaux pour chercheurs	40m ²
Espace de recherche	40m ²
Sanitaires	27m ²
Surface totale : 335m ²	

Entité de recherche en génie électrique	
Espace	Surface m ²
responsable du labo	26m ²
Laboratoire de électrotechnique	60m ²
Laboratoire de automatique	50m ²
Laboratoire de l'énergie renouvelable	30m ²
Laboratoire de électromécanique	30m ²
Bureaux pour chercheurs	31m ²
Sanitaires	15m ²
Surface totale : 241m ²	

Gestion logistique et administration	
Espace	Surface m ²
Accueil et réception	100m ²
Bureau de gestion	35m ²
Bureau administratif	40m ²
salle polyvalente	200m ²
Bibliothèque	287m ²
Sanitaires	17m ² *3
Surface totale : 713m ²	

Entité recherche électronique	
Espace	Surface m ²
responsable du labo	26m ²
Laboratoire de génie électronique	58m ²
Salle de télécommunication	45m ²
Bureaux pour chercheurs	31m ²
Espace de recherche	35m ²
Sanitaires	15m ²
Surface totale : 210m ²	

Entité de recherche en génie des procédés	
Espace	Surface m ²
responsable du labo	26m ²
Espace de recherche	55m ²
Laboratoire d'essai d'expérimentation	74m ²
Bureaux pour chercheurs et professeurs	31m ²
Surface totale : 186m ²	

Entité de recherche en mécanique	
Espace	Surface m ²
responsable du labo	26m ²
Laboratoire d'énergétique mécanique et matériaux	30m ²
Laboratoire de construction mécanique	27m ²
Bureaux pour chercheurs et professeurs	31m ²
Espace de recherche	75m ²
Hall d'accueil	60m ²
Ateliers d'essai d'expérimentation	150m ²
Sanitaires	27m ²
Surface totale : 426m ²	

Entité de recherche en Architecture	
Espace	Surface m ²
responsable du labo	26m ²
Espace de recherche	30m ²
Atelier de maquette	32m ²
Bureaux pour chercheurs	31m ²
Salle de simulation	60m ²
Laboratoire des matériaux	30m ²
Sanitaires	27m ²
Surface totale : 236m ²	

Surface de terrain : 5600m²
Surface d'occupation du sol (bâti) : 2220m²
Surface non bâti : 3380m²

6.1.3. Genèse du projet :

Étape 01 :

Afin d'optimiser l'organisation du terrain, il est impératif de procéder à sa découpe à l'aide de trames, c'est-à-dire une grille régulière qui facilite l'organisation spatiale et la répartition des différentes fonctions du projet. Cette approche méthodique garantit une cohérence globale dans l'aménagement, tout en fournissant un cadre structurant pour l'implantation des bâtiments et des espaces extérieurs, favorisant ainsi une intégration harmonieuse. Dans le cadre de notre projet, cette grille s'inspire d'un motif traditionnel de moucharabieh, symbole fort de l'architecture locale. Dans le cadre de notre démarche d'amélioration continue, nous avons procédé à une optimisation du modèle pour répondre aux exigences contemporaines et fonctionnelles du projet. Cette démarche a abouti à la création d'une trame modulable, illustrant notre engagement à fournir des solutions innovantes et efficaces.

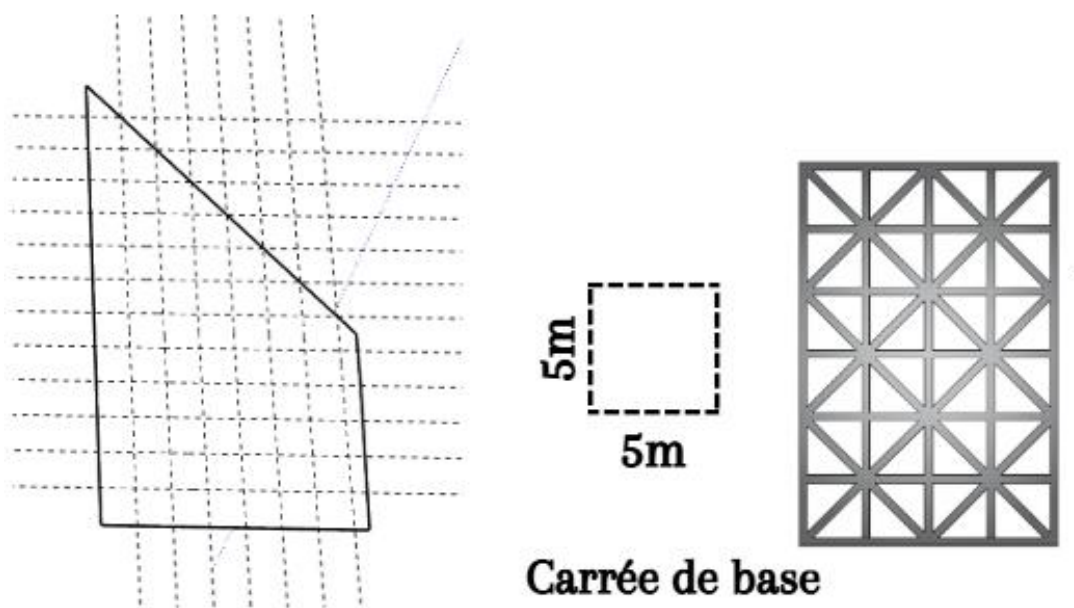


Figure 60: Étape 01 (Source: Auteur)

Étape 02 :

Afin d'optimiser l'utilisation de ce terrain et d'assurer une organisation fonctionnelle claire, nous avons procédé à sa division en trois parties distinctes. La partie supérieure du site sera dédiée aux espaces d'exposition, offrant un environnement propice à la mise en valeur des contenus scientifiques. Les deux zones basses seront dédiées respectivement aux espaces de recherche et aux services annexes, permettant une distinction claire entre les zones d'activité

scientifique et les espaces de soutien. Cette approche spatiale optimise la circulation des usagers, améliore la gestion des flux et établit une hiérarchisation cohérente des espaces selon leur fonction. Elle participe au renforcement de la lisibilité du site en favorisant une répartition claire et accessible des différentes entités du projet, ce qui est un atout pour notre entreprise.

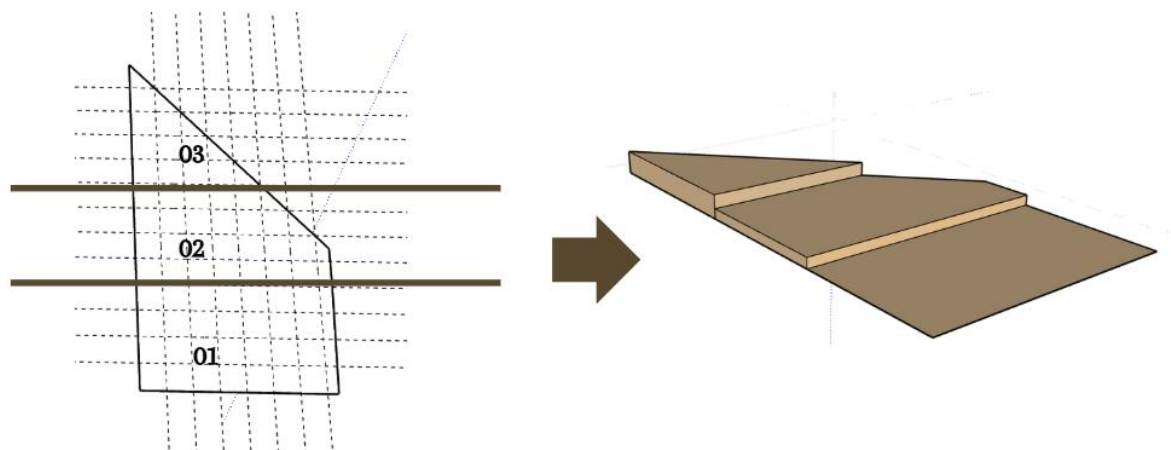


Figure 61: Étape 02 (Source: Auteur)

Étape 03 :

La fragmentation du projet selon un axe structurant représente une méthode efficace pour organiser les relations entre les différentes unités fonctionnelles et pour ancrer le projet dans la morphologie du site. Cet axe stratégique agit comme un fil conducteur, autour duquel les différentes entités s'articulent de manière cohérente et fluide. Ce dispositif offre une solution innovante pour définir le sens de la circulation, le positionnement des accès et la structuration des parcours internes. En outre, il crée des failles visuelles stratégiques qui permettent de relier l'espace de travail à la vue imprenable sur le paysage environnant. Cette approche a pour principaux bénéfices de renforcer la lisibilité du projet, d'optimiser l'orientation des usagers et de mettre en valeur les séquences architecturales. En plus de relier les fonctions entre elles, l'axe structurant joue un rôle dans la hiérarchisation des espaces, en distinguant clairement les zones publiques, semi-publiques et privées. Sa capacité à s'adapter aux spécificités du terrain permet de renforcer l'intégration environnementale du projet.

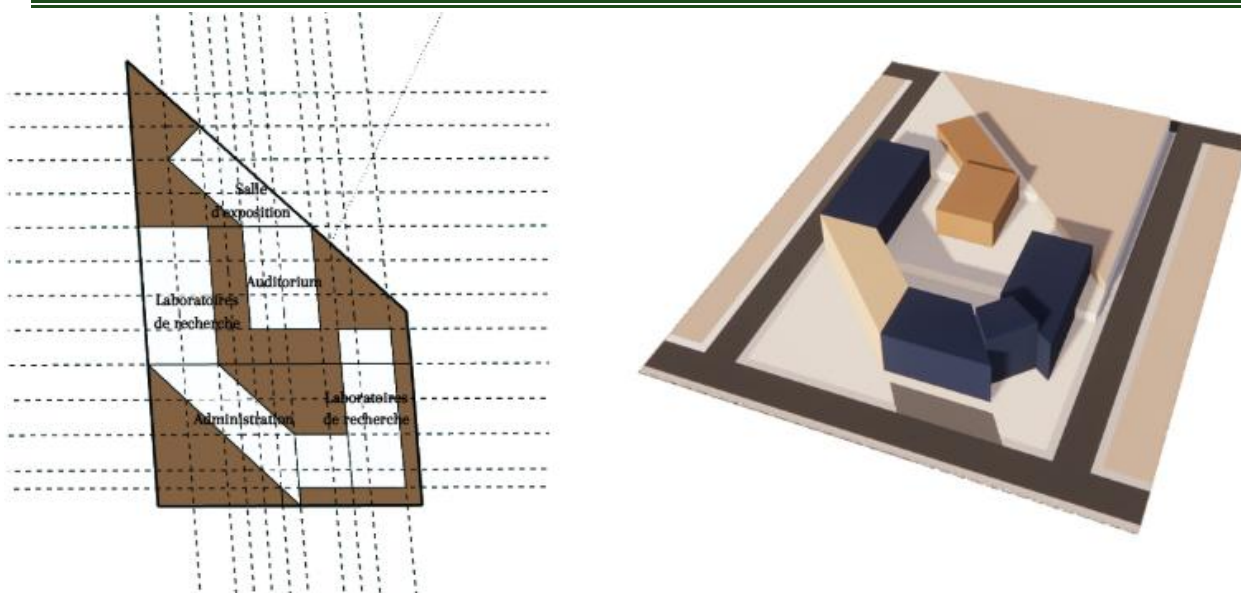


Figure 62: Étape 03 (Source: Auteur)

Étape 04 :

Lors de la conception des parcours piétons à l'intérieur du site, une attention particulière a été portée à leur orientation à l'inverse du sens de la pente. Cette approche permet de réduire les montées abruptes et d'offrir aux usagers des cheminements plus confortables et accessibles, en particulier dans un contexte topographique irrégulier. En outre, les parcours sont conçus comme des promenades paysagères, intégrant des espaces verts, des zones ombragées et des points de repos. Ces aménagements contribuent à l'excellence environnementale du projet, tout en renforçant la cohérence entre les différentes entités architecturales. Les circulations deviennent ainsi des éléments de liaison souples entre nature et architecture, favorisant la fluidité, la convivialité et l'ancrage du projet dans son environnement.

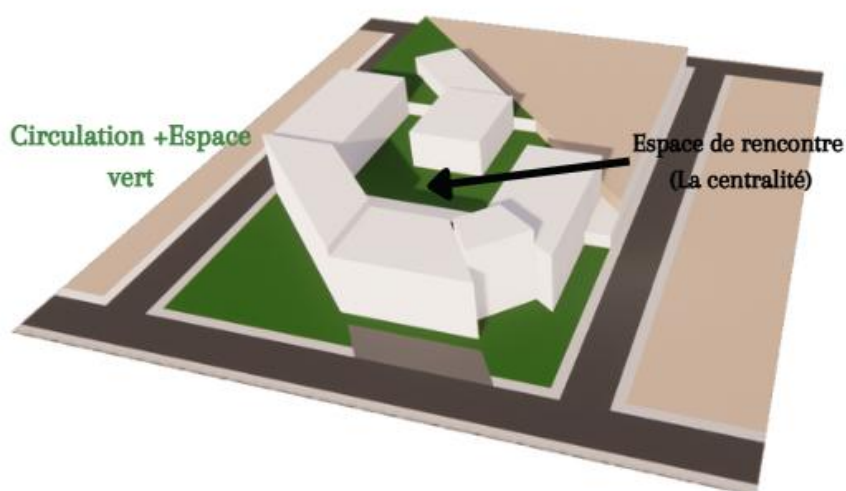


Figure 63: Étape 04 (Source: Auteur)

CHAPITRE 06 : Projet architectural

Étape 05 :

Le schéma illustre la distribution fonctionnelle des entités constituant notre centre de recherche. Le projet est structuré en plusieurs axes, organisés de manière méthodique et hiérarchique, pour garantir une lisibilité optimale du site et une circulation fluide entre les différentes fonctions. L'entité principale de recherche est subdivisée en six unités spécialisées, réparties selon les domaines scientifiques suivants : la mécanique, le génie civil, le génie des procédés, le génie électrique, l'électronique et l'architecture. Chaque entité dispose d'un espace dédié, tout en étant connectée aux zones partagées. En complément, nous disposons d'un espace d'exposition et de projection, spécifiquement conçu pour l'organisation d'événements scientifiques, de présentations de projets ou d'ateliers publics. Enfin, une entité de gestion logistique et administrative est positionnée de manière stratégique pour encadrer le bon fonctionnement global du centre. Cette configuration, illustrée dans le schéma, traduit notre engagement à créer un environnement de travail cohérent, fonctionnel et favorisant les interactions interdisciplinaires.

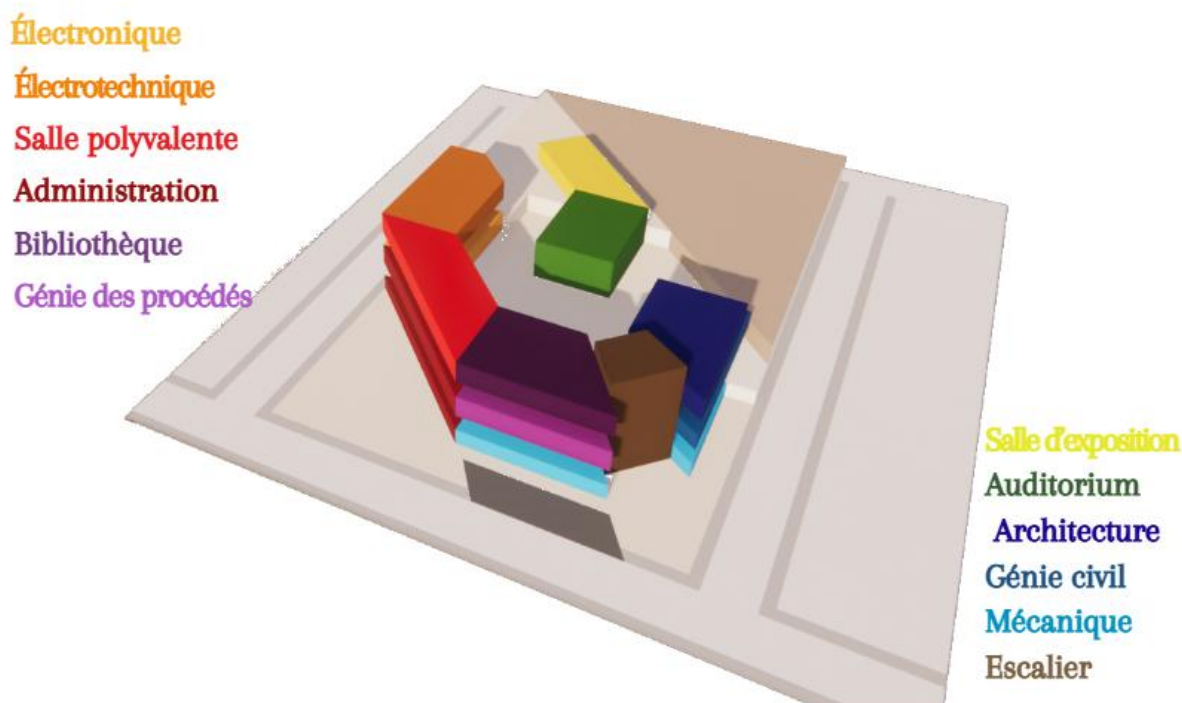


Figure 64: Étape 05 (Source: Auteur)

6.2. Dossier graphique :



Figure 65: Plan de masse (Source: Auteur)



Figure 66: Façade Nord (Source: Auteur)



Figure 67: Façade Est (Source: Auteur)

PARTIE II : PROJET STARTUP

CHAPITRE 07 : Projet innovant et BMC

Introduction :


Dans le contexte des enjeux climatiques actuels, la conception de bâtiments publics adaptés aux conditions environnementales locales devient une priorité stratégique, notamment dans les régions à climat chaud comme la ville de Chlef. Dans ce contexte, l'innovation dans le domaine de l'architecture durable et des solutions passives constitue une réponse pertinente et accessible pour améliorer le confort thermique des usagers, tout en réduisant la consommation énergétique des infrastructures publiques.

Le présent document est une version adaptée du guide du projet de diplôme/startup, élaboré dans le cadre de l'arrêté ministériel n° 1275, pour répondre aux spécificités d'un projet architectural local innovant. Ce projet a pour objectif d'accompagner une initiative portée par une étudiante en architecture. Cette initiative vise à développer un système passif d'amélioration du confort thermique basé sur le rafraîchissement évaporatif. Ce système sera intégré dans la conception des bâtiments publics de la ville de Chlef.

Ce projet s'inscrit dans une démarche durable, économe et reproductible, alignée sur les objectifs de transition écologique du secteur du bâtiment. Le guide suit une structure méthodologique en plusieurs axes (de l'idéation à la réalisation d'un prototype), permettant de transformer cette idée en solution concrète, applicable à l'échelle locale et nationale.

Carte d'information À propos de l'équipe d'encadrement du groupe de travail :

Équipe d'encadrement :

Équipe d'encadrement		
Encadrant principal : Dr. BENAMEUR Okba	Qualité : Enseignant chercheur en Architecture	
Représentant du partenaire socio-économique Mr. IDJRI Mohamed	Qualité : Chef service étude et suivi (Entreprise publique de wilaya de gestion des centres d'enfouissement technique)	

ÉquipeÉquipe de projet :

Équipe de projet	Faculté	Spécialité
KAHLERRAS Karima	Science et Technologie	Architecture

7.1. Premier axe : Présentation du projet :

7.1.1. L'idée de projet (solution proposée) :

Ce projet s'inscrit dans le cadre de l'architecture bioclimatique et de la construction durable, avec une attention particulière portée à la qualité environnementale des bâtiments publics dans un contexte climatique contraignant. Cette initiative a été motivée par une préoccupation majeure : la ville de Chlef, exposée à un climat chaud et sec durant la saison estivale, fait face à un déficit de confort thermique dans ses infrastructures publiques (telles que les écoles et les centres de santé), ce qui a un impact négatif sur le bien-être des usagers.

Afin de répondre à cette problématique, le projet prévoit la conception et l'intégration de panneaux passifs à rafraîchissement évaporatif. Conçus pour abaisser la température de l'air à l'intérieur des bâtiments, ces panneaux sont une solution innovante et respectueuse de l'environnement, qui permet de réduire la consommation d'énergie sans recourir à l'électricité. Le concept s'appuie l'évaporation de l'eau entraîne une réduction de la chaleur ambiante, induisant ainsi une baisse naturelle de la température, Ce système s'inspire des techniques traditionnelles de refroidissement, à l'instar des moucharabiehs, tout en étant adapté aux architectures modernes.

Ces panneaux sont conçus pour offrir un refroidissement thermique efficace, avec une baisse attendue de 4 à 6 °C, en fonction des conditions d'humidité et de ventilation leur mise en œuvre vise à minimiser la dépendance à la climatisation mécanique, à améliorer la qualité de l'environnement intérieur et à accroître les performances énergétiques des bâtiments publics.

7.1.2. Les valeurs proposées :

Notre projet vise à fournir une solution innovante et accessible pour optimiser le confort thermique des bâtiments publics. Cette approche s'appuie sur le principe du rafraîchissement évaporatif passif. Dans le cadre de notre stratégie de communication d'entreprise, nous avons identifié les valeurs que nous souhaitons transmettre à nos utilisateurs finaux. Ces valeurs sont les suivantes :

- Le système proposé est un atout de modernité, Il apporte une solution nouvelle et inédite dans le contexte algérien. Il s'agit d'une adaptation d'un principe physique ancien (l'évaporation) à des applications architecturales contemporaines. Cette approche novatrice est sans équivalent actuel dans les infrastructures publiques locales.
- Les panneaux sont conçus pour offrir une performance optimale, avec une baisse de température de 4° à 6°C, ce qui se traduit par une amélioration significative du confort thermique intérieur, notamment pendant les périodes de forte chaleur.
- Le système se distingue par sa flexibilité, offrant une modularité et une adaptabilité à diverses configurations architecturales, Cette caractéristique facilite son intégration dans des bâtiments existants ou en phase de construction, optimisant ainsi l'efficacité et l'intégration du système dans l'environnement bâti.
- La conception adaptée est une priorité pour notre entreprise, nous avons conçu un design de panneaux qui s'intègre harmonieusement dans l'architecture des bâtiments publics notre objectif est de garantir un fonctionnement optimal des panneaux.
- Le choix de la solution a conduit à une réduction des coûts, avec une baisse des dépenses énergétiques et d'entretien sur la durée. Cette efficacité est le résultat d'une stratégie de réduction de la consommation d'électricité, notamment par une limitation du recours à la climatisation électrique.

7.1.3. Objectifs du projet :

Ce projet, initié dans un premier temps pour répondre à une problématique publique et environnementale, présente également un fort potentiel de valorisation économique. Notre mission est de transformer une solution technique innovante, conçue pour améliorer le confort

thermique dans les bâtiments publics, en un produit reproductible et commercialisable, destiné aux acteurs du secteur du bâtiment durable.

- Dans le cadre de notre stratégie de croissance, ce projet vise à développer un produit local : un panneau passif à rafraîchissement évaporatif, spécifiquement conçu pour les bâtiments publics situés en zones à climat chaud (écoles, administrations, centres de santé, etc.).
- Cette solution se veut être à la fois écologique et économique. Elle se caractérise par une consommation d'énergie réduite et un coût modéré, ce qui en fait une option pertinente pour compléter ou remplacer un système de climatisation existant.
- Dans le cadre de notre stratégie de développement, nous souhaitons valoriser le projet sous forme entrepreneuriale. Pour cela, nous envisageons la création d'une startup ou d'une micro-entreprise.

7.1.4. Calendrier de réalisation du projet :

Tableau 5: Calendrier de réalisation du projet

		Mois					
		1	2	3	4	5	6
01	Études préalables : analyse thermique, choix du bâtiment test, documentation	✓					
02	Conception du panneau (dessins, simulations thermiques, validation technique)		✓	✓			
03	Fabrication du prototype			✓	✓		
04	Installation du prototype					✓	
05	Suivi et relevés des performances thermiques (avant/après, température, humidité)après, température, humidité)						✓

7.2. Deuxième axe : Aspects innovants

7.2.1. Nature des innovations :

Ce projet s'inscrit dans une démarche de pointe en matière d'architecture et d'environnement, qui a pour objectif d'améliorer le confort thermique des édifices publics par l'intégration de systèmes passifs de rafraîchissement évaporatif. Cette solution low-tech, conçue pour une intégration optimisée dans l'enveloppe bâtie, illustre l'engagement de l'entreprise à trouver des solutions durables et efficaces. Selon le modèle d'analyse croisant l'incertitude du marché et l'incertitude technologique, l'innovation développée dans le projet peut être classée parmi les innovations croissantes, avec une ouverture vers les innovations du marché.

Le projet se concentre sur l'adaptation d'une technologie éprouvée, désignée sous le nom de « rafraîchissement évaporatif passif », à un nouveau domaine d'application dans le secteur de l'architecture. Plus précisément, cette intégration a pour objectif l'utilisation de cette technologie dans l'enveloppe des bâtiments publics situés dans des zones à climat chaud. Cette solution présente un risque technologique faible, car elle utilise des matériaux simples et des procédés éprouvés. Cependant, elle est appliquée à un secteur peu exploité : celui des équipements publics durables. En outre, le projet présente une proposition novatrice sur le marché, en ciblant des acteurs institutionnels tels que les collectivités locales, les établissements scolaires et les services publics, qui actuellement disposent de peu d'options économiques alternatives à la climatisation. Il s'agit d'un point de convergence stratégique entre la valorisation d'un savoir-faire établi et la réponse proactive à des besoins émergents. Cette démarche est en cohérence avec les enjeux de durabilité, d'efficacité énergétique et de résilience climatique.

7.2.2. Domaines d'innovation :

Ce projet s'inscrit dans une démarche d'innovation couvrant plusieurs domaines, notamment l'innovation architecturale: un atout concurrentiel majeur pour notre entreprise mise en œuvre de nouvelles enveloppes bioclimatiques qui offrent une contribution active à la régulation thermique tout en enrichissant le langage architectural du bâtiment..

Innovation énergétique: dans le contexte des bâtiments publics la réduction significative des besoins en climatisation artificielle a permis une baisse de la consommation d'énergie, cet objectif est au cœur de nos engagements en matière de développement durable et de performance énergétique.

Innovation sociale: l'amélioration du confort des usagers des services publics nous visons à améliorer directement le confort des usagers des services publics, notamment dans les zones défavorisées où les bâtiments sont rarement équipés de systèmes thermiques efficaces.

7.3. Troisième axe : Analyse stratégique du marché

7.3.1. Le segment du marché :

Le marché potentiel :le marché potentiel du projet a été défini comme l'ensemble des institutions publiques et des collectivités locales qui expriment une demande en matière d'amélioration du confort thermique dans leurs infrastructures. Cette demande concerne particulièrement les régions arides et chaudes de l'Algérie. Dans le cadre de cette étude, le marché considéré inclut les établissements scolaires, les centres de santé, les mairies, les bibliothèques publiques et les centres administratifs. Ces acteurs, qui sont des entités centrales du réseau local, sont au cœur de la dynamique de notre analyse. Ces structures, fréquemment déficientes en termes de conception thermique, sont en quête de solutions économiques, durables et indépendantes de toute consommation d'énergie. L'objectif de ces recherches est double : d'une part, l'amélioration des conditions de travail et d'accueil du public, et d'autre part, la réduction des dépenses énergétiques. Ce marché est vaste et théorique, englobant toute structure potentielle intéressée par la solution.

Le- marché cible (le segment): Le marché ciblé (segment) : Le marché cible, plus restreint et stratégique, désigne le groupe spécifique de clients auquel le projet s'adresse prioritairement. Dans le cadre de notre démarche qualité, nous avons identifié les acteurs clés concernés par cette initiative, à savoir les collectivités locales (APC), les directions locales de l'équipement (DLEP), ainsi que certains établissements publics pilotes (tels que les écoles, les bibliothèques ou les centres de soins à Chlef).

Ces acteurs font preuve d'une gestion budgétaire rigoureuse, leur permettant de financer des projets de réhabilitation. Ces acteurs sont accessibles par le biais d'appels d'offres publics ou

de partenariats locaux, et démontrent une volonté tangible d'investir dans des solutions durables. Ce segment a été sélectionné pour sa réceptivité aux innovations écologiques, sa capacité à contractualiser et son potentiel à servir de vitrine pour un déploiement futur plus large.

7.3.2. Mesure de l'intensité de la concurrence :

Concurrents directs : Le projet mentionné précédemment est un acteur majeur du marché, avec une faible concurrence directe à l'échelle locale et nationale. Notre expertise principale réside dans la collaboration avec des bureaux d'études spécialisés en architecture bioclimatique, des laboratoires universitaires et des projets pilotes liés à la recherche. Notre mission est de proposer des solutions d'amélioration du confort thermique passives, telles que les murs végétalisés, les systèmes d'ombrage fixes ou la ventilation naturelle. Cependant, ces initiatives restent à l'état expérimental, peu adaptées au marché public, et ne se concentrent pas sur le développement de panneaux passifs à rafraîchissement évaporatif. Leur part de marché est donc marginale, mais leur expertise est reconnue et leur potentiel de croissance est apprécié. Leurs points forts résident dans la qualité de conception et la rigueur scientifique, mais ils présentent des lacunes en termes de production standardisée, de coûts souvent élevés et d'adaptation aux contraintes locales (budget, maintenance, matériaux).

Concurrents indirects : Les concurrents indirects bénéficient d'une visibilité accrue sur le marché. Notre portefeuille client inclut des entreprises spécialisées dans la climatisation, des revendeurs de ventilateurs industriels ainsi que des fournisseurs de matériaux isolants conventionnels. Ces solutions, bien que non durables, sont souvent privilégiées dans les projets publics par habitude ou facilité d'accès. Leur part de marché est significative, notamment dans le secteur des programmes de réhabilitation classique. Leur principal avantage concurrentiel réside dans leur accessibilité immédiate et leur présence bien établie dans le réseau de distribution. Cependant, ces solutions s'avèrent être des sources de consommation d'énergie élevées, nécessitant un entretien régulier et une adaptabilité aux fréquentes interruptions de courant, caractéristiques de certaines régions. De plus, elles ne répondent pas aux exigences actuelles de durabilité environnementale, constituant ainsi un point faible majeur face à une solution passive et écologique comme celle proposée dans ce projet.

7.3.3. La stratégie marketing :

La stratégie marketing du projet est fondée sur une analyse approfondie du marché des bâtiments publics dans les zones arides, où les besoins en confort thermique sont élevés et non satisfaits. Notre produit se positionne comme une solution innovante, passive et économique, en contraste avec les systèmes de climatisation traditionnels, coûteux et énergivores.

Notre stratégie de commercialisation repose sur un produit simple et local, un prix abordable, une promotion ciblée (prototypes, démonstrateurs, réseaux universitaires et institutionnels) et une distribution régionale via des artisans ou des partenaires techniques. La stratégie de communication sera déployée à travers des canaux ciblés, tels que des présentations locales, des supports visuels et des événements, pour garantir une personnalisation optimale du message en fonction des profils des décideurs publics.

7.4. Quatrième axe : Plan de production et d'organisation

7.4.1. Le Processus de production :

Étude thermique et simulation : Analyse des données sur le climat local (température, humidité, soleil, vent). On fait des simulations numériques pour trouver la meilleure forme, l'épaisseur et les matériaux du panneau. On a défini un modèle architectural adapté aux bâtiments publics de Chlef.

Achat des matières premières : Utilisation de matériaux écologiques et locaux : terre cuite.

Fabrication : Dans le cadre du processus de fabrication, l'intégration du système absorbant et du canal de diffusion d'eau au sein des extrémités du panneau est effectuée. Par la suite, le module évaporatif est assemblé et prêt à être installé. Un contrôle qualité, dont l'objectif est de vérifier la solidité, la capillarité et la performance thermique du panneau, est effectué avant son conditionnement.

Emballage : Les panneaux sont emballés dans des caisses en bois ou en carton renforcé. Ils sont prêts à être livrés.

Installation : Les modules sont ensuite transportés vers le bâtiment où l'expérimentation aura lieu. Une fois sur place, ils sont posés et installés là où ils sont censés se trouver.

Ensuite, on vérifie que le système fonctionne bien.



Figure 68: Le Processus de production

7.4.2. L'Approvisionnement :

Le projet s'inscrit dans une démarche d'achat responsable, privilégiant l'utilisation de matériaux naturels, locaux et respectueux de l'environnement. Dans le cadre de notre processus de production, nous avons sélectionné deux matières premières essentielles : la terre cuite et les tuyaux en PVC.

7.4.3. La main d'œuvre :

Le projet prévoit la création de huit postes directs, nécessaires à sa mise en œuvre technique, administrative et logistique. Notre équipe se compose de profils clés, chacun avec un rôle spécifique et essentiel à la réalisation de nos projets. Nous avons un maître d'œuvre qui assure la coordination générale, un technicien en génie civil pour le suivi technique, un architecte (devenant ou expérimenté) qui supervise la conception et l'intégration urbaine, un responsable marketing qui gère la communication et la valorisation du projet, un secrétaire pour les tâches administratives, un agent de sécurité et des femmes de ménage pour l'entretien des locaux. En outre, l'équipe est complétée par une main-d'œuvre flexible, composée d'ouvriers du bâtiment, qui est mobilisée en fonction des besoins spécifiques à chaque phase du projet (fabrication, montage, installation). À l'exception des postes techniques (architecte et technicien), les fonctions ne requièrent pas de qualifications spécifiques, facilitant ainsi le recrutement local et la promotion de l'emploi dans la région de Chlef. Par ailleurs, le recours à la manutention manuelle est favorisé, en raison de la légèreté des matériaux utilisés, ce qui simplifie la logistique, limite les coûts et permet une meilleure accessibilité aux profils non qualifiés.

7.4.4. Les principaux partenaires :

Partenaires académiques et scientifiques :

- Université (faculté d'architecture, laboratoire de thermique du bâtiment)
- Enseignants-chercheurs : expertise en conception bioclimatique, conception paramétrique, mécanique des fluides, et matériaux de construction passive.

Partenaires techniques et opérationnels :

- Techniciens / entreprises du bâtiment : Aide à l'assemblage et à l'installation du panneau sur site.
- Coopératives : Fourniture de matériaux naturels (terre, briques) avec la participation à la fabrication du prototype.

Partenaires en innovation et entrepreneuriat :

- Incubateur universitaire / régional : structuration du projet et développement en startup avec l'accès à des financements, concours, événements de valorisation.

7.5. Cinquième axe : Plan financier

Le plan financier est un élément clé de l'évaluation de la viabilité du projet. Il permet d'évaluer la rentabilité, d'anticiper les besoins de financement et d'assurer la viabilité à court, moyen et long terme.

	N-1 (historique)	Année 01	Année 02	Année 03	Année 04
DZD	FY23	FY24	FY25	FY26	FY27
Chiffre d'affaires	-	2.950.000	6.200.000	10.350.000	15.400.000
Achats consommés	(600.000)	(2.200.000)	(3.400.000)	(5.800.000)	(6.850.000)
Marge brute	(600.000)	750.000	2.800.000	4.550.000	8.550.000
Charges externes	-	(479.000)	(454.000)	(454.000)	(454.000)
Salaires et charges sociales	(1.209.600)	(1.209.600)	(1.209.600)	(1.890.000)	(1.890.000)
EBITDA	(1.809.600)	(938.600)	1.136.400	2.206.000	6.206.000
Amortissements et provisions		(412.500)	(412.500)	(412.500)	(412.500)
EBIT		(1.351.100)	723.900	1.793.500	5.793.500
Charges financières					
Résultat avant impôts		(1.351.100)	723.900	1.793.500	5.793.500
Impôts sur les sociétés		-	-	-	-
Résultat net		(1.351.100)	723.900	1.793.500	5.793.500
Evolution du chiffre d'affaires			110%	67%	49%
<i>Tx de marge brute</i>	<i>#DIV/0!</i>	25%	45%	44%	56%
<i>Tx d'EBITDA</i>	<i>#DIV/0!</i>	-32%	18%	21%	40%

CHAPITRE 07 : Projet innovant et BMC

	Année 01	Année 02	Année 03	Année 04	Année 05
DZD	FY24	FY25	FY26	FY27	FY28
Immobilisations	2.887.500	2.475.000	2.062.500	1.650.000	1.237.500
Actif immobilisé	2.887.500	2.475.000	2.062.500	1.650.000	1.237.500
Clients	122.917	258.333	431.250	641.667	812.500
Stock	152.778	236.111	402.778	475.694	534.722
Actifs courants (hors tréso)	275.694	494.444	834.028	1.117.361	1.347.222
Fournisseurs	(223.250)	(321.167)	(521.167)	(608.667)	(679.500)
Autres passifs courants					
Total passifs courants	(223.250)	(321.167)	(521.167)	(608.667)	(679.500)
BFR	52.444	173.278	312.861	508.694	667.722

	Année 01	Année 02	Année 03	Année 04
DZD	FY24	FY25	FY26	FY27
EBITDA	(938.600)	1.136.400	2.206.000	6.206.000
Variation de BFR	(52.444)	(120.833)	(139.583)	(195.833)
<i>BFR d'exploitation</i>	52.444	173.278	312.861	508.694
<i>BFR hors exploitation</i>				
BFR	52.444	173.278	312.861	508.694
IBS	-	-	-	-
Flux de trésorerie provenant de l'exploitation	(991.044)	1.015.567	2.066.417	6.010.167
CAPEX (Investissements)	(3.300.000)	-	-	-
Flux de trésorerie provenant de l'investissement	(3.300.000)	-	-	-
Free cash flow	(4.291.044)	1.015.567	2.066.417	6.010.167
Emprunt bancaire				
Apport en capital				
Charges financières	-	-	-	-
Dividendes				
Flux de trésorerie provenant du financement	-	-	-	-
Net Cash flow	(4.291.044)	1.015.567	2.066.417	6.010.167
Solde initial	-	(4.291.044)	(3.275.478)	(1.209.061)
Solde final	(4.291.044)	(3.275.478)	(1.209.061)	4.801.106

Bilan

DZD	FY24	FY25	FY26	FY27	FY28
Immobilisations	2.887.500	2.475.000	2.062.500	1.650.000	1.237.500
Clients	122.917	258.333	431.250	641.667	812.500
#Stock	152.778	236.111	402.778	475.694	534.722
Autres actifs courants					
Autres passifs courants					
Trésorerie	(4.291.044)	(3.275.478)	(1.209.061)	4.801.106	14.098.078
Fournisseurs	(223.250)	(321.167)	(521.167)	(608.667)	(679.500)
Actif Net	(1.351.100)	(627.200)	1.166.300	6.959.800	16.003.300
Capital social					
Résultat de l'exercice	(1.351.100)	723.900	1.793.500	5.793.500	9.043.500
Réserves légales					
Reports à nouveau		(1.351.100)	(627.200)	1.166.300	6.959.800
Total capitaux propres	(1.351.100)	(627.200)	1.166.300	6.959.800	16.003.300
Check	-	-	-	-	-

Tableau 6: Investissement

E L E M E N T S D E P R O D U C T I V I T E		Année 01	Total
			Période
	Ordinateur de bureau	80.000	80.000
	Machine CNC semi-professionnelle	2.000.000	2.000.000
	Bureau (moblier)	160.000	160.000
	Imprimante(multifonction)	40.000	40.000
	Outils et matériel	20.000	20.000
	Matériel N°10	0	0
	Matériel N°11	0	0
	Matériel N°12	0	0
	Matériel N°13	0	0
	Matériel N°14	0	0
	Matériel N°15	0	0
	Matériel N°16	0	0
	Matériel N°17	0	0
	Matériel N°18	0	0
	Matériel N°19	0	0
	Sous-Total (01)	2.300.000,00	2300000

Tableau 7: Achat directs

A c h a t s d i r	Prestation	Total
		MATIERE PREMIERE
	Produit/Service N°02	700.000
	Produit/Service N°03	0
	Produit/Service N°04	0
	Produit/Service N°05	0
	Sous-Total (03)	2200000

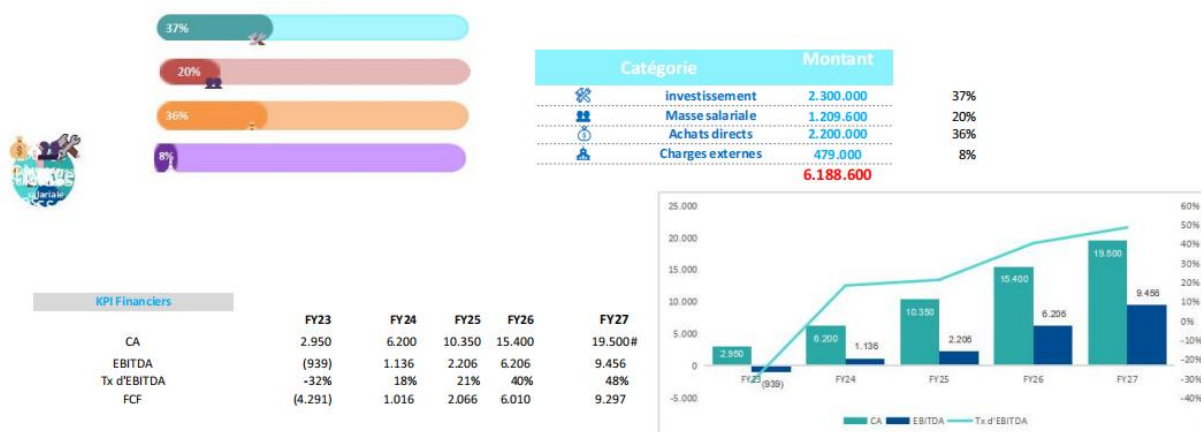
Tableau 8: Masse salariale

R M A N E N T		ETP	Total
		Maître d'œuvre(Architecte	1,00
	Responsable marketing	1,00	0
	Technicien	1,00	680.400
	Secrétaire	1,00	529.200
	Poste N°06	2,00	0
	Poste N°10	0,00	0
	Sous-Total (2)		1.209.600

Tableau 9: Charges externes

	Libellé	Total
Charges	Sous-traitance	50000
	Loyers	240000
	Energie/eau/gaz	24000
	Frais Marketing	0
	Honoraires d'avocat	0
	Honoraires du Notaire	15000
	Honoraires d'expert-comptable	10000
	Honoraires Commissaire aux Comptes	10000
	Frais du transit	100000
	Frais télécom	30000
	Divers fournitures	0
	0	0
	0	0
	Sous-Total (04)	

Tableau 10: Synthèse



7.6. Sixième Axe : Prototype expérimental

7.6.1. Description du prototype :

Comme précédemment mentionné, notre prototype intègre un dispositif d'ombrage de type moucharabieh, décliné en différentes dimensions, afin de moduler l'apport lumineux et de réduire les gains thermiques solaires. Ce dispositif est associé à un système de rafraîchissement passif par évaporation, visant à améliorer le confort thermique intérieur.

L'ensemble du système, illustré dans la figure ci-dessous, combine des stratégies architecturales traditionnelles et des principes bioclimatiques pour optimiser les performances énergétiques du bâtiment.

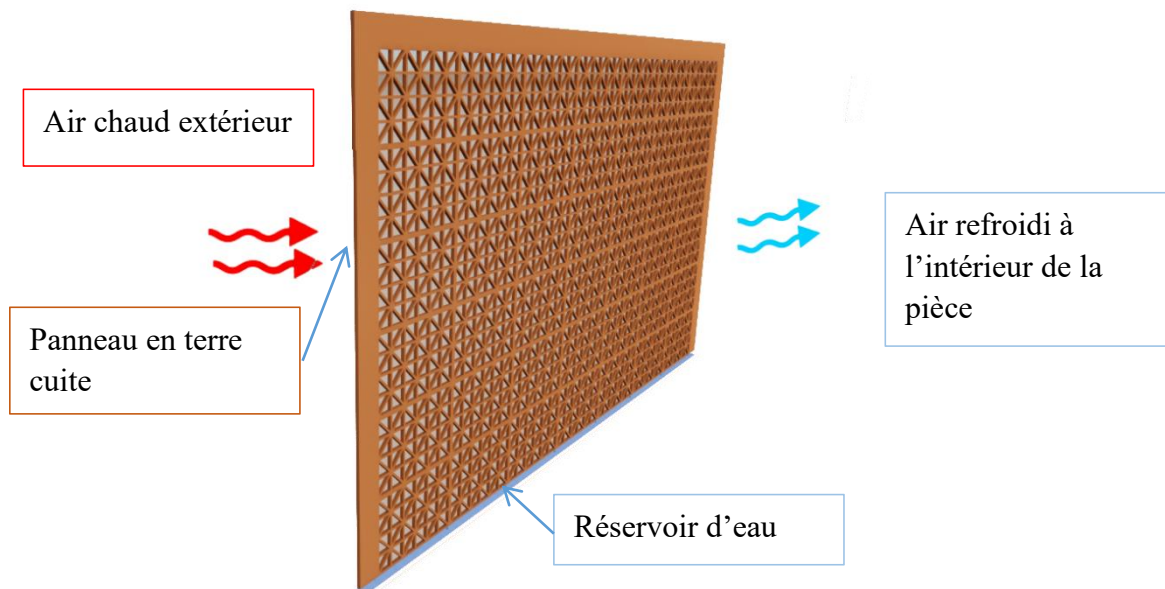


Figure 69: Schéma de fonctionnement

La figure ci-dessous illustre la disposition des différents panneaux composants notre modèle de façade ombrée.

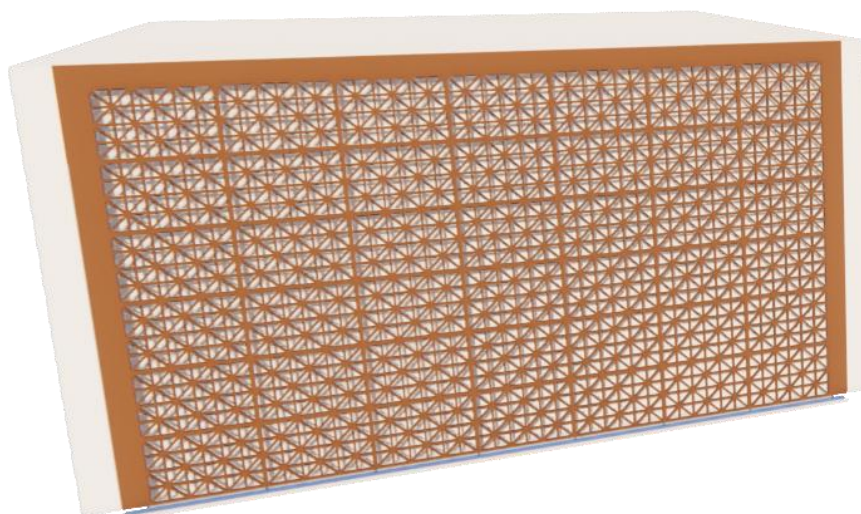


Figure 70: Disposition des panneaux sur la façade

7.6.2. Modélisation et simulation :

Dans une perspective de validation de notre prototype, nous avons opté pour une approche méthodique alliant la modélisation architecturale paramétrique et la simulation de dynamique des fluides (CFD). Cette démarche nous permet d'évaluer avec précision l'efficacité thermique des dispositifs passifs proposés. Dans le cadre de notre démarche d'excellence, nous avons déployé deux outils numériques de pointe : Rhinoceros 3D (Rhino), solution de pointe pour la conception architecturale paramétrique du bâtiment (parametric design), et « COMSOL Multiphysics », expert en simulation dynamique des fluides (CFD) et des transferts thermiques. Cette approche méthodique et intégrée permet une évaluation cohérente et détaillée des performances thermiques et aérauliques du projet, en tenant compte des spécificités climatiques de la ville de Chlef qui a été mentionné dans le chapitre d'analyse de site.

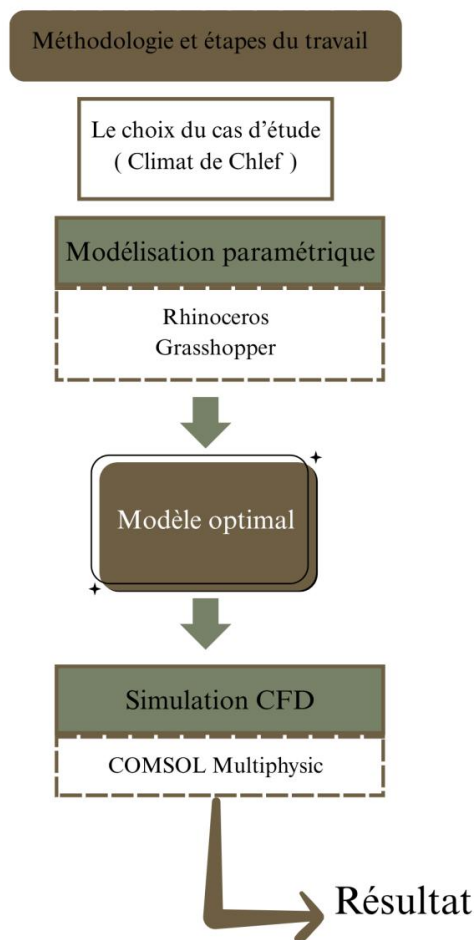


Figure 71: Méthodologie et étape de travail

7.6.2.1. Modélisation paramétrique dans Rhino + Grasshopper

Rhinoceros 3D est un logiciel de conception en 3D. Il est utilisé par les architectes pour créer des formes complexes avec une grande précision. Il se connecte facilement à d'autres logiciels, ce qui facilite son utilisation dans un flux de travail numérique interdisciplinaire.

Grasshopper, son plugin de programmation visuelle, permet une modélisation paramétrique en contrôlant les formes à l'aide de variables. Il est particulièrement adapté aux conceptions bioclimatiques, en permettant l'adaptation des géométries aux données climatiques.



Figure 72: Logo du logiciel Rhinoceros + Grasshopper (Source: Cove, 2025)

Dans le cadre de notre projet, nous avons utilisé le logiciel Rhinoceros 3D, en association avec son module complémentaire Grasshopper, afin d'intégrer une dimension paramétrique à notre processus de conception. Cette approche méthodique nous a permis de modéliser de manière précise les différentes étapes du projet architectural. Cette approche permet de générer une géométrie flexible, contrôlée par des variables ajustables, facilitant l'adaptation du modèle aux contraintes environnementales et climatiques spécifiques à la ville de Chlef.

Grasshopper a permis de développer un système de conception innovant basé sur des paramètres stratégiques tels que l'orientation des panneaux, la taille et la position, ainsi que la disposition des dispositifs passifs. Tous ces paramètres ont été modélisés selon des règles géométriques définies en fonction des données climatiques locales, ce qui a permis de garantir une précision optimale et une conformité aux normes en vigueur.

Cette approche paramétrique a également été utilisée pour optimiser les dispositifs placés sur les ouvertures, en agissant sur leur dimensionnement, leur espacement et leur inclinaison. L'objectif était d'améliorer la ventilation naturelle et de réduire les gains thermiques indésirables.

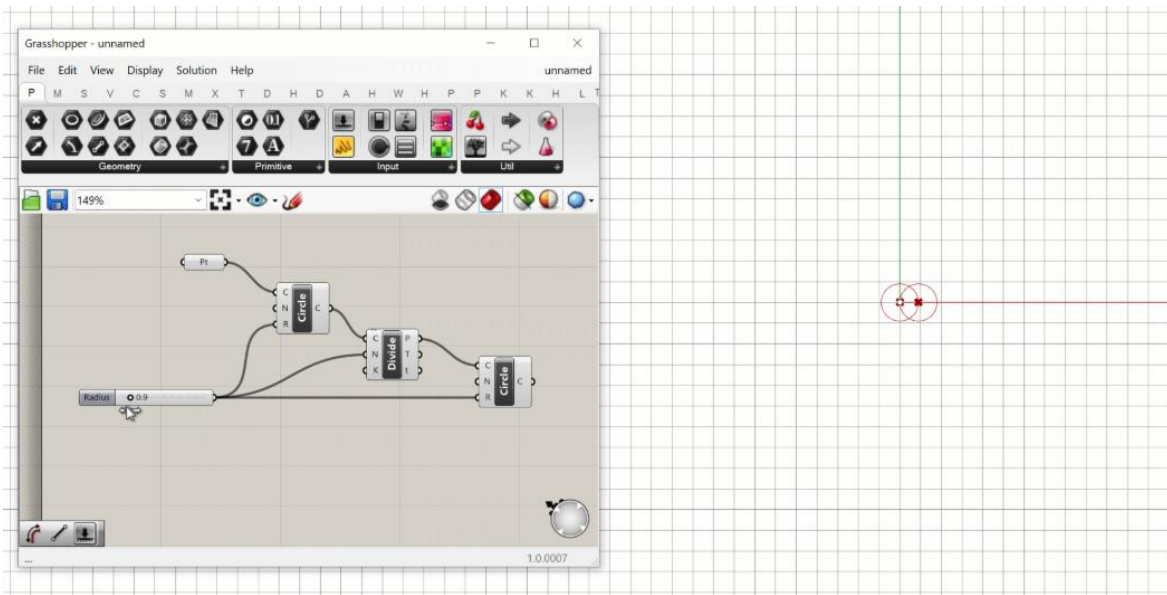


Figure 73: Interface Rhino (Source: Pointify.be, 2025)

7.6.2.2. Simulation CFD avec COMSOL Multiphysics :

Le logiciel «*COMSOL Multiphysics*» est un outil de simulation numérique qui facilite la modélisation multiphysique couplée, incluant la dynamique des fluides (CFD), le transfert thermique et d'autres phénomènes physiques. Il est largement utilisé pour analyser le comportement des systèmes complexes et optimiser les solutions techniques, grâce à son interface flexible et ses capacités avancées de résolution numérique (COMSOL, 2023).

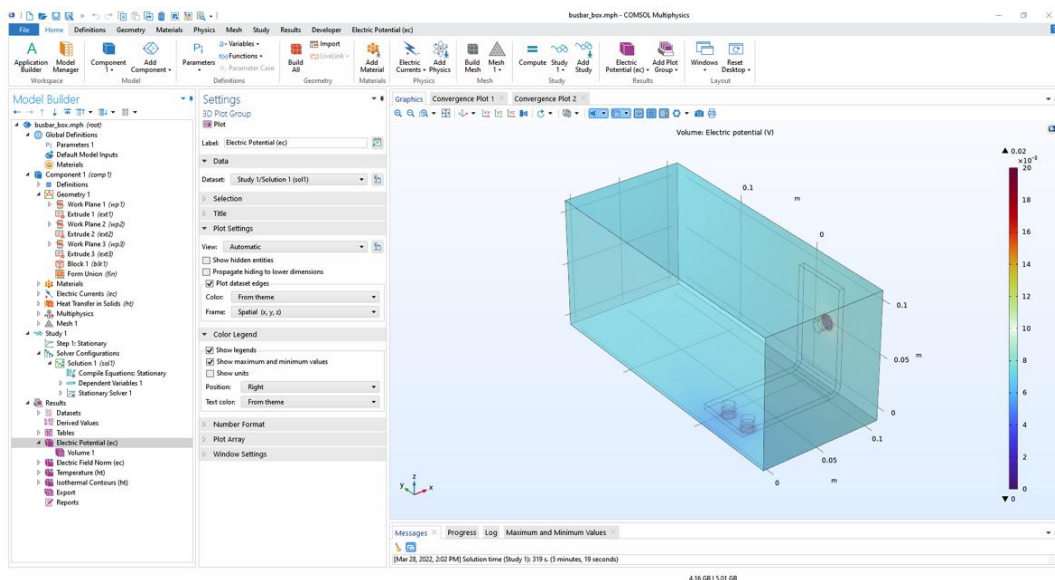


Figure 74: L'interface de COMSOL (Source: comsol.fr, 2025)

Afin d'évaluer les performances thermiques et aérodynamiques des dispositifs passifs, une simulation a été réalisée avec le logiciel COMSOL Multiphysics en utilisant le module CFD. Le modèle, conçu dans Rhino + Grasshopper, a été importé dans COMSOL, où les conditions

climatiques réelles de Chlef (température, vent, humidité) ont été intégrées. Le domaine fluide a été défini autour des zones clés (ouvertures, patios, surfaces évaporatives), avec un maillage adapté. Les propriétés des matériaux (conductivité, capacité thermique, perméabilité) ont été intégrées dans l'analyse. Le modèle de simulation a permis de résoudre les équations de la chaleur en prenant en compte les effets d'évaporation. Les résultats ont permis de visualiser les flux d'air et de chaleur, et d'ajuster la conception pour améliorer le confort thermique passif.

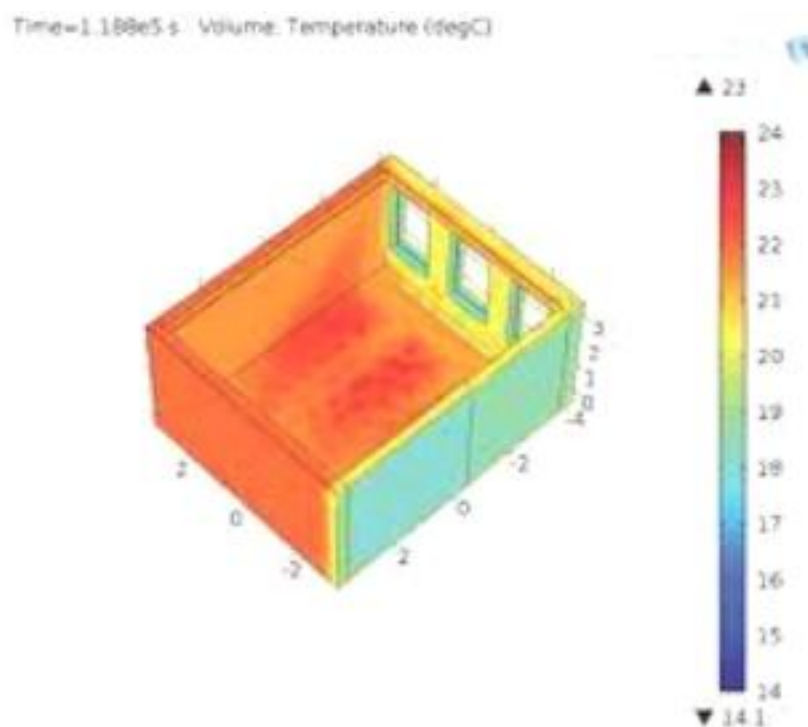


Figure 75: Carte thermique 3D d'un espace clos modélisé sous COMSOL Multiphysics (Source: Zalesak, 2025)

7.6.3. Résultat et interprétations :

Cette partie présente les principaux résultats obtenus à partir des simulations numériques réalisées avec Rhinoceros/Grasshopper et COMSOL Multiphysics. L'objectif est d'évaluer l'efficacité thermique et aéraulique des dispositifs passifs proposés dans le contexte climatique de Chlef.

Pour la première phase de simulation, nous avons procédé à l'analyse de deux configurations pour examiner l'effet des protections solaires sur les radiations transmises à l'intérieur des espaces de travail de notre cas d'étude.

Le modèle simulé dans son état initial (sans protection), comme illustré dans la figure.

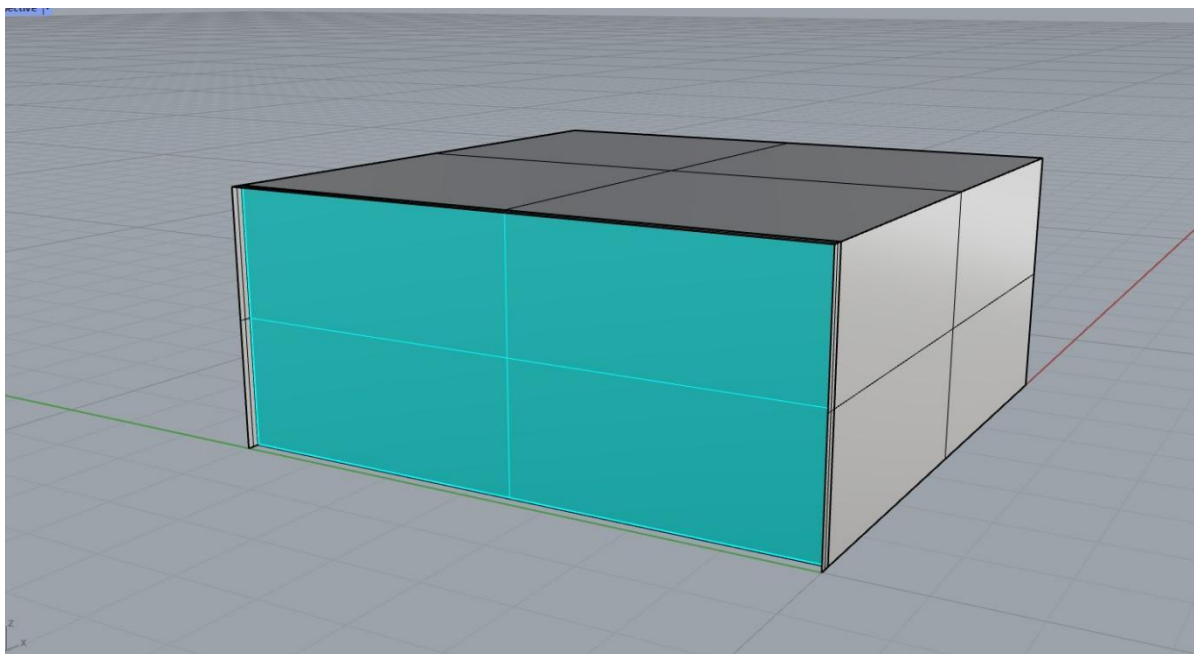


Figure 76: Visualisation de la géométrie sur Rhino (Sans Protection)

Dans un deuxième temps, nous avons effectué une simulation du modèle avec les protections.

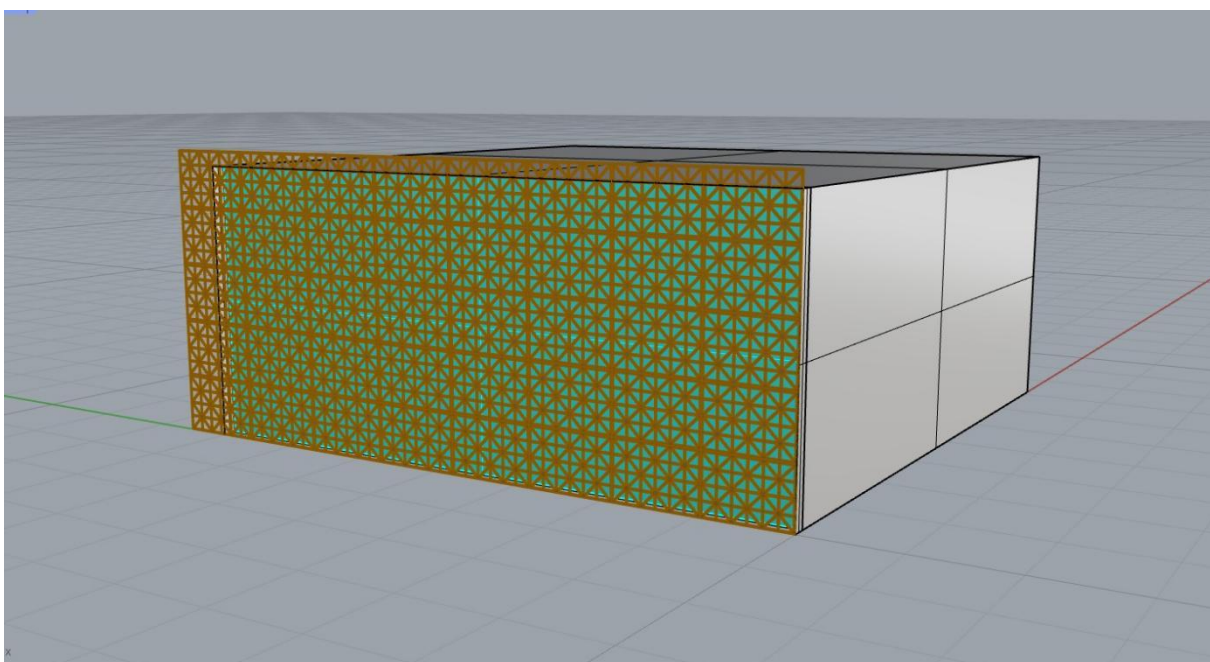


Figure 77: Visualisation de la géométrie sur Rhino (Avec Protection)

Le graphique ci-dessus illustre le ratio de radiation solaire transmise (%) sur trois façades principales du prototype : Est, Sud et Ouest. Ces valeurs représentent la proportion de l'énergie solaire incidente effectivement transmise vers l'intérieur du bâtiment, en tenant compte de l'orientation.

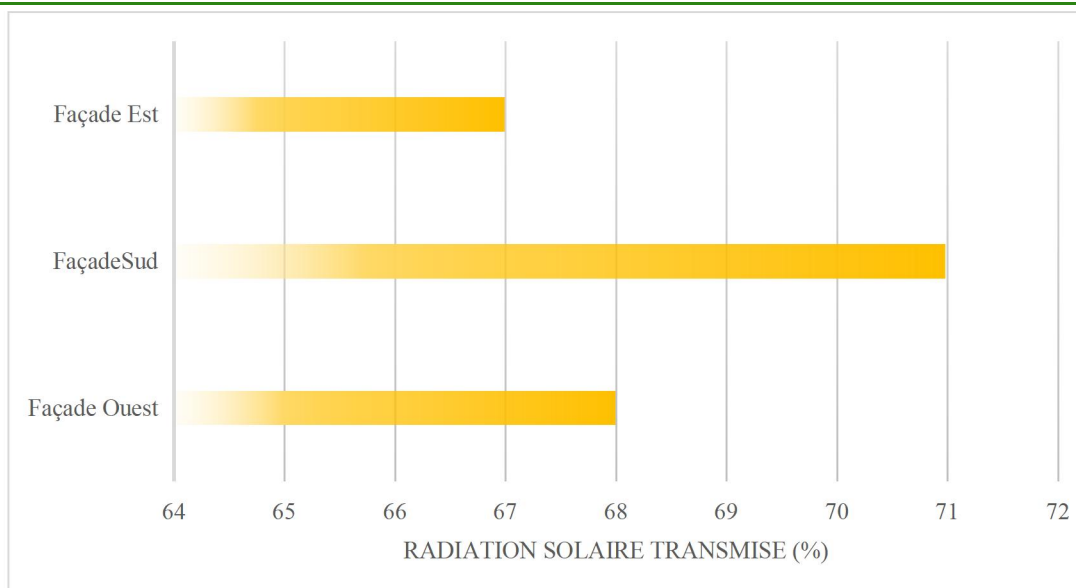


Figure 78: Radiation solaire transmise selon chaque façade

Cette figure montre la variation de la quantité de rayonnement solaire transmise à travers les différentes façades du prototype, en fonction de leur exposition. Les résultats observés sont les suivants :

Dans le cas du modèle dépourvu de protection, la façade sud présente une transmission solaire de 71 %, ce qui entraîne une exposition significative de l'intérieur aux gains thermiques directs.

Bilan énergétique annuelle selon l'orientation des Moucharabieh :

L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'impact des moucharabieh, selon leur position sur les différentes façades du prototype (Est, Sud, Ouest), sur le bilan énergétique annuel du bâtiment. Ce bilan intègre les apports solaires utiles en hiver, ainsi que la réduction des gains thermiques excessifs en été, permettant d'optimiser le confort thermique passif et de réduire les besoins de chauffage ou de rafraîchissement.

L'analyse énergétique de la façade sud met en évidence l'impact positif de l'intégration d'un moucharabieh sur la performance thermique du bâtiment. Les résultats montrent une réduction notable de la consommation liée au refroidissement, passant de 130 à environ 120 kWh/m²/an, grâce à l'effet de filtrage du rayonnement solaire en période estivale. Cette amélioration du confort d'été s'accompagne toutefois d'une légère augmentation des besoins en chauffage hivernal, due à la diminution des apports solaires directs en hiver, bien que cette hausse reste modérée.

Enfin, la consommation pour l'éclairage artificiel varie très peu, ce qui témoigne de la capacité du moucharabieh à conserver un bon niveau de lumière naturelle, tout en régulant les apports thermiques. Ce bilan confirme la pertinence bioclimatique du moucharabieh sur les façades exposées au sud dans le contexte climatique de Chlef.

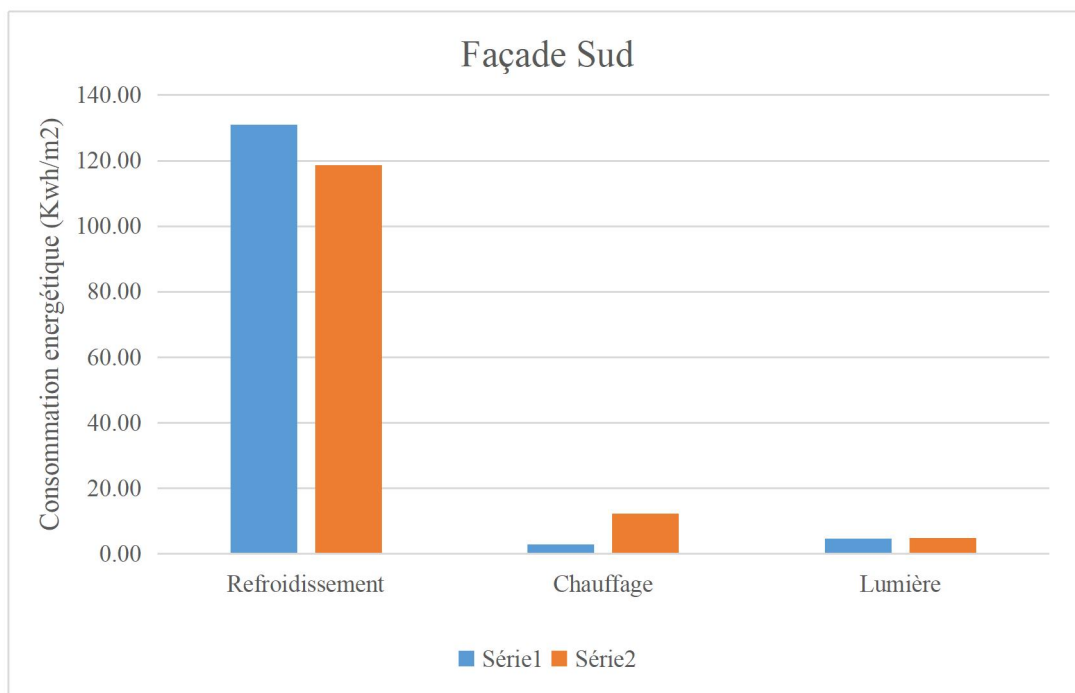


Figure 79: L'analyse énergétique de la façade sud

L'installation de protections solaires, notamment sous forme de moucharabiehs, sur les façades est et ouest permet de réduire de manière significative la consommation énergétique liée au refroidissement. Sur la façade Est, la consommation passe ainsi d'environ 146 kWh/m²/an à 122 kWh/m²/an, tandis que sur la façade Ouest, elle diminue de 140 kWh/m²/an à 120 kWh/m²/an. Ces baisses s'expliquent par l'efficacité des protections à filtrer le rayonnement solaire direct, que ce soit le soleil matinal à l'est ou le rayonnement intense de fin de journée à l'ouest, caractéristiques des périodes estivales.

Concernant le chauffage, la consommation reste globalement stable sur les deux façades, avec de très légères diminutions, indiquant que les apports solaires hivernaux sur ces orientations ne sont pas déterminants pour le confort thermique.

En ce qui concerne l'éclairage naturel, la présence des moucharabiehs entraîne une variation minimale de la consommation énergétique, confirmant leur capacité à préserver un niveau d'éclairage satisfaisant tout en apportant de l'ombre.

Ainsi, ces résultats mettent en évidence l'intérêt d'intégrer des protections solaires adaptées sur les façades Est et Ouest, permettant de réduire les besoins en climatisation estivale sans compromettre le confort lumineux ni les apports thermiques en hiver.

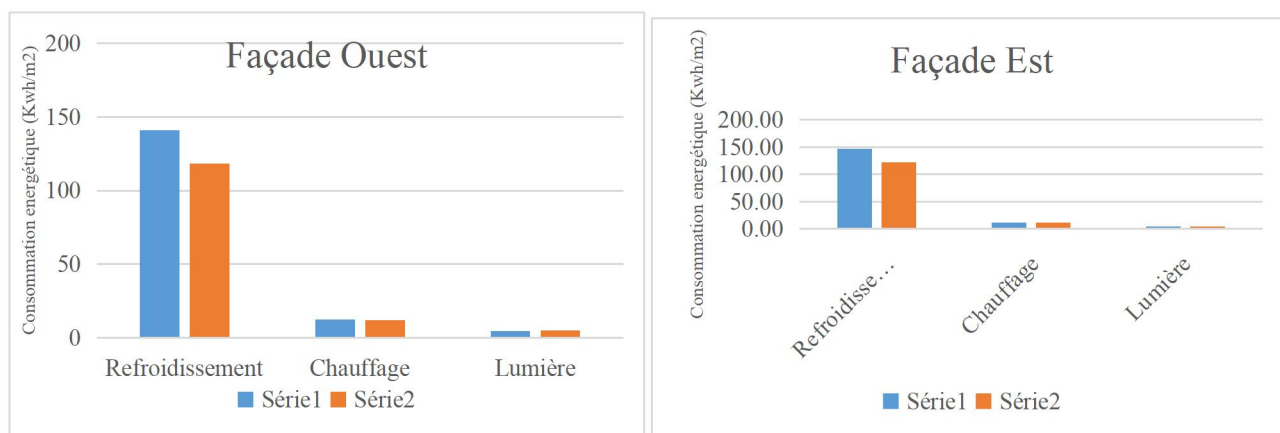


Figure 80: L'analyse énergétique de la façade Ouest/ est

La simulation paramétrique des façades, réalisée à l'aide de Grasshopper et Rhino, a permis de démontrer l'efficacité du système de refroidissement passif proposé. Les résultats de l'étude montrent une baisse significative de la température intérieure pouvant atteindre 4 °C, ce qui a un impact positif sur le confort thermique des occupants. Cette avancée est d'autant plus significative dans un contexte climatique chaud et sec, tel que celui de Chlef.

Dans la deuxième phase de notre projet, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour analyser l'effet du refroidissement par évaporation à l'intérieur du dispositif et son impact sur le confort thermique des espaces intérieurs. Grâce à la modélisation thermo-fluidique, nous avons pu simuler les échanges de chaleur et de masse dans le système. Les résultats obtenus ont mis en évidence une baisse significative de la température intérieure, confirmant l'efficacité du système proposé pour améliorer le confort thermique dans un contexte aride.

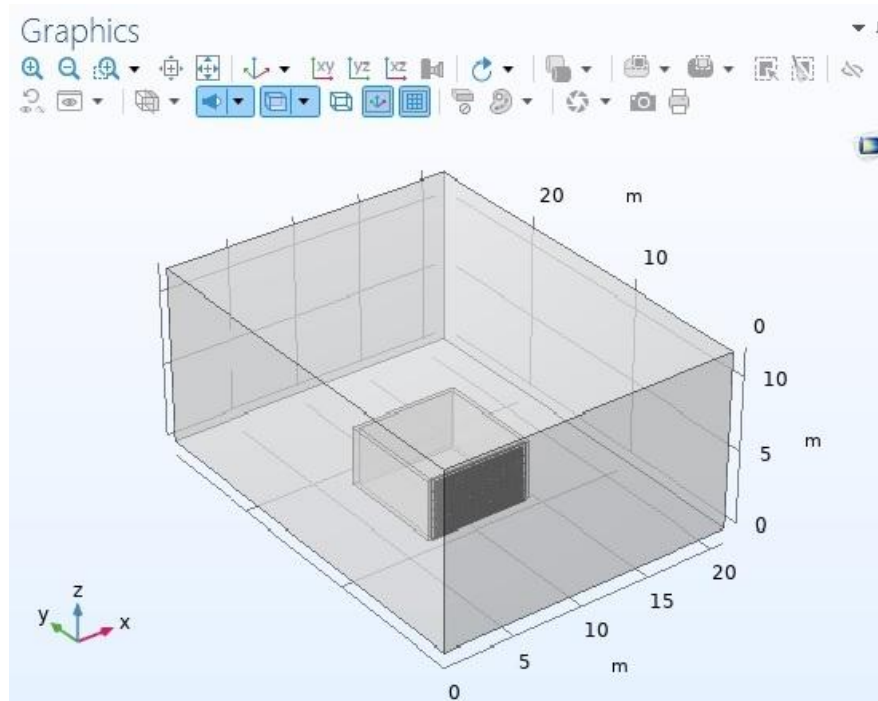


Figure 81: Visualisation de simulation sur Comsol Multiphysics

Cette phase a permis d'analyser les paramètres clés du confort thermique intérieur, notamment la température, la ventilation et l'humidité relative. Elle a contribué à évaluer l'efficacité du système de rafraîchissement passif, révélant une baisse potentielle de température intérieure pouvant atteindre jusqu'à 5 °C. Toutefois, certaines contraintes techniques, telles que le temps restreint et la complexité computationnelle du logiciel, n'ont pas permis de finaliser l'ensemble du processus de simulation. Malgré ces limitations, les résultats partiels obtenus sont encourageants et mettent en évidence un fort potentiel d'application du dispositif, notamment dans les régions à climat chaud et sec.

Globalement, ce processus de validation montre que le prototype développé constitue une solution passive efficace pour améliorer le confort thermique intérieur tout en réduisant les besoins énergétiques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans une réflexion sur la manière de concevoir des bâtiments mieux adaptés aux conditions climatiques extrêmes, notamment dans les régions arides comme la ville de Chlef, en Algérie. Face aux défis croissants liés à la hausse des températures et à la consommation énergétique excessive des systèmes de climatisation classiques, notre démarche a consisté à proposer une solution durable s'inspirant des stratégies passives de l'architecture bioclimatique.

Le projet consiste à concevoir des panneaux passifs à évaporation afin d'améliorer le confort thermique intérieur et de réduire la consommation énergétique des bâtiments publics. Cette solution tire parti du principe du refroidissement par évaporation, qui est particulièrement efficace dans les climats secs, et s'appuie sur des références architecturales traditionnelles telles que les moucharabiehs, revisités à l'aide d'outils numériques avancés tels que «Grasshopper» pour la conception paramétrique et «COMSOL» pour les simulations thermiques.

Les résultats obtenus, bien que partiels en raison de certaines contraintes techniques, montrent une réduction notable de la température intérieure pouvant atteindre 4 à 6°C. Cela confirme le potentiel réel de cette solution pour améliorer les performances thermiques des enveloppes bâties, sans recourir systématiquement à des systèmes actifs.

Ce travail représente une contribution à la recherche architecturale durable, en cohérence avec les orientations nationales en matière d'innovation, et ouvre la voie à d'éventuelles applications concrètes ou initiatives entrepreneuriales. En associant innovation technologique et responsabilité environnementale, ce projet propose une réponse pertinente et contextualisée aux enjeux contemporains de l'architecture dans les zones arides.

Références bibliographiques :

Ouvrages:

- Abada, D. (2021). Intégration d'un système de rafraîchissement par évaporation dans le bâtiment [Mémoire de master, Université de Constantine 3].
- Alothman, H. (2017). An evaluative and critical study of mashrabiya in contemporary architecture. LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Amer, O. (2017). A heat pipe and porous ceramic-based sub wet-bulb temperature evaporative cooler: A theoretical and experimental study [Doctoral dissertation, University of Nottingham].
- Bagasi, A. A., & Calautit, J. K. (2021). Evaluation of the integration of the traditional architectural element mashrabiya into the ventilation strategy for buildings in hot climates. *Energies*, 14(3), 530. <https://doi.org/10.3390/en14030530>
- Belkacem, N. (2017). Contribution à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales d'un habitat individuel bioclimatique : Cas de la maison pilote de Souidania-Alger [Thèse de doctorat, Université de Chlef].
- Ben Bacha, C. (s.d.). Les façades dynamiques : Moyen de contrôle solaire pour accroître l'efficacité énergétique des équipements administratifs en climat aride [Mémoire, Université Salah Bounider Constantine 3].
- Courgey, S., & Oliva, J. (2012). La conception bioclimatique (2e éd.). Terre Vivante.
- El Semary, Y., Attalla, H., & Gawad, I. (2017). Modern mashrabiya with high-tech daylight responsive systems.
- Fathy, H. (1973). Architecture for the poor: An experiment in rural Egypt. University of Chicago Press.
- Fernandez, P., & Lavigne, P. (2009). Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements et méthodes. Le Moniteur.

- García-González, M., Cheng, G., Bui, D. T., & López-Leyva, J. A. (2024). Heat exchanger improvement of a counter-flow dew point evaporative cooler through COMSOL simulations. *Thermo*, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/thermo4010001>
- Givoni, B. (1978). *L’homme, le climat et l’architecture* (Trad. J.-L. Izard). Éditions du Moniteur.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons.
- Haile, M., Garay-Martinez, R., & Macarulla, A. M. (2024). Review of evaporative cooling systems for buildings in hot and dry climates. *Buildings*, 14(11), 3504. <https://doi.org/10.3390/buildings14113504>
- Irkakene, O., & Araoudiou, D. (2016). *Conception et développement des espaces de travail : Cas d’un centre de recherche universitaire [Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou]*.
- Liébard, A., & De Herde, A. (2005). *Traité d’architecture et d’urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Observ’ER.
- Lufu, R., Ambaw, A., & Opara, U. L. (2024). Evaporative cooling systems for perishables in Sub-Saharan Africa—A review. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 1811–1826. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03200-2>
- Parsons, K. (2014). *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance* (3rd ed.). CRC Press.
- Samuels, W. (2019). *Performance and permeability: An investigation of the mashrabiya for use within the Gibson Desert [Master’s thesis, Curtin University]*.
- Watt, J. R. (2012). *Evaporative air conditioning: Applications for environmentally friendly cooling*. Butterworth-Heinemann.

Site web

- Algérie Solidaire. (2018). La consommation électrique en Algérie 10 fois supérieure à la norme. <https://algeriesolidaire.net/la-consommation-electrique-en-algerie-10-fois-superieure-a-la-norme/>
- Arch2O. (2025). Watt Family Innovation Center / Perkins & Will. <https://www.arch2o.com/watt-family-innovation-center-perkinswill/>
- ArchDaily. (2024). Tasik Creative and Innovation Center / SHAU Indonesia. <https://www.archdaily.com/1012814/tasik-creative-and-innovation-center-shau-indonesia>
- Atelier Nova. (2024). La ventilation par convection naturelle dans l'habitat. <https://atelier-nova.ch/blog/la-ventilation-par-convection-naturelle-dans-lhabitat>
- Atlas climatique. (2024). Gaz à effet de serre. <https://atlasclimatique.ca/gaz-effet-de-serre>
- AUA Toulouse. (2023). Adaptation au changement climatique : Les 5 leviers pour rafraîchir la ville. <https://www.aua-toulouse.org/adaptation-au-changement-climatique-les-5-leviers-pour-rafraichir-la-ville/>
- Cercle Promodul / INEF4. (2024). Enveloppe du bâtiment – Base de connaissance. <https://lab.cercle-promodul.inef4.org/knowledge/post/enveloppe-du-batiment>
- Cerema. (2022). Îlots de chaleur : Agir sur les territoires pour adapter les villes au changement climatique. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/ilots-chaleur-agir-territoires-adapter-villes-au-changement>
- Climat et Voyages. (2025). Climat à Chlef (Algérie). <https://www.climatsetvoyages.com/climat/algerie/chlef>
- COMSOL AB. (2023). COMSOL Multiphysics® software. <https://www.comsol.com>
- DGRSDT. (2023). Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique. <https://www.dgrsdt.dz>
- Écono-Écolo. (2025). Le bioclimatisme : Des stratégies adaptées aux saisons. <https://www.econo-ecolo.org/bioclimatisme/#En-hiver-strategie-du-chaud>
- GIEC. (2023). Rapport de synthèse du GIEC 2023. Climat.be. <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec/2023-rapport-de-synthese>
- Guide Bâtiment Durable. (2024). Protections solaires extérieures. <https://guidebatimentdurable.brussels/protections-solaires-externes>

- Guide HQE. (2025). Confort thermique – Cible 8 HQE. <https://www.hqe.guidenr.fr/cible-8-hqe/confort-thermique-aspect-physique-echangeur-chaaleur.php>
- La Réunion Durable. (2024). Qu'est-ce que l'architecture bioclimatique ? <https://labreunion.fr/quest-ce-que-larchitecture-bioclimatique>
- Marble Fairbanks. (2024). A new library typology. <https://www.marblefairbanks.com/project-process/a-new-library-typology/>
- Organisation des Nations Unies. (2024). Le changement climatique. <https://www.un.org/fr/global-issues/climate-change>
- Pointify. (2025). Rhino & Grasshopper. <https://pointify.be/rhino-grasshopper/>
- Save 4 Planet. (2025). Réchauffement climatique : Causes et conséquences. <https://www.save4planet.com/ecologie/16/rechauffement-climatique-causes-et-consequences>
- Weather Spark. (2024). Météo moyenne à Chlef International Airport, Algérie. <https://fr.weatherspark.com/y/147899/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Chlef-International-Airport-Alg%C3%A9rie>