

Département d'Architecture



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER ACADEMIQUE

Filière :

ARCHITECTURE

Spécialité :

ARCHITECTURE ET TECHNOLOGIE

Présenté par :

M^{elle}. Asma BOUSRI

M^{elle}. Radia FOUIAL

M^{elle}. Saida MERABET

THEME :

Les dispositifs de contrôle climatique dans la construction :

Cas de la façade à double peau.

Composition du Jury :

Le 18/10/2017

Nour Elhouda BOUHIDEL

M.A.A, université de Jijel, Président du jury.

Samira BOUKETTA

M.A.A, université de Jijel, Directeur de mémoire.

Ibtissem HALLAL

M.A.A, université de Jijel, Membre du Jury.

Remerciement

La réalisation de ce mémoire a bénéficié de la contribution et de l'appui de nombreuses personnes. En premier lieu, nous voulons remercier chaleureusement notre encadreur madame **BOUKETTA Samira** enseignante à l'université de Jijel, de nous avoir proposé ce projet et de nous avoir guider et encourager tout au long de notre études théoriques. Sa rigueur scientifique, sa créativité et ses qualités humaines se sont avérées essentielles à l'accomplissement de ce travail.

Nous voulons aussi témoigner notre reconnaissance envers les membres du jury, Madame **BOUHIDEL Nour Elhouda** et Madame **HELLAL Ibtissem** d'avoir accepté de consacrer du temps à la lecture et à l'évaluation de ce mémoire. Leurs recommandations ont su enrichir considérablement la valeur de ce travail.

Nous tiendrons à remercier tous les enseignants du département d'architecture qui ont contribué énormément à notre formation sans oublier nos collègues de formation.

Dédicace

A mon cher père, que le tout puissant lui accorde son infinie
miséricorde et l'accueille dans son éternel paradis,
A ma chère mère & ma famille,
A mes amis.

Asma "

Dédicace

A mes chers parents,

A mes chers frères et sœurs,

A tous les " *Fouial* ", et les " *Semlala* ",

A mes amis, et à ceux qui m'aiment et que j'aime.

Radia "

Dédicace

A mes très chers parents pour leur : amour, sacrifices, patiences, soutien moral et matériel depuis mon enfance jusqu'à ce jour.

A mon père "*Mahmoud*",

qui m'a encouragé et soutenu pendant toutes mes études.

A ma mère "*Chama*",

qui est toujours disponible pour nous, et prête à nous aider.

A mes chers frères "*Saïd et Adel*".

A mes sœurs adorées

"*Dalila, Nabila, Hadda, Hanan, Rima, Faiza, Asma*".

A toutes ma famille "*Merabet*".

A mes trinôme "*Radia et Asma*".

A mes chers amis.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Saida "

Sommaire

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	

Introduction générale

➤ Introduction	1
➤ Problématique	3
➤ Hypothèses	4
➤ Objectifs et structure de la recherche	5

Chapitre I : Construire en climat méditerranéen

Introduction

I.1.1. Le climat	6
I.1.1.1. Les éléments du climat	7
I.1.1.2. Classification du climat	7
I.1.1.3. Le climat en Algérie	7
I.1.1.4. Le climat de Jijel	10
I.2. Conception des bâtiments dans les régions du climat méditerranéen	11
I.2.1. Influence des paramètres climatiques dans la conception des bâtiments méditerranéens	11
I.2.1.1. L'ensoleillement	11
I.2.1.2. Le vent	11
I.2.1.3. L'humidité	11
I.2.1.4. Pluviométrie	11
I.2.2. Illustration d'une construction au climat méditerranéen	12
I.2.2.1. Données climatiques	12
I.2.2.2. Grandes orientations et dispositifs architecturaux	12
I.2.3. Interaction architecture et climat	13
I.2.3.1. Définition d'architecture bioclimatique :	16
I.2.3.2. Les principes de base de l'architecture bioclimatique :	17
Conclusion	18

Chapitre II : Les dispositifs de contrôle climatique dans la construction

Introduction	
II.1. Dispositifs de conception climatique	19
II.1.1. Implantation	19
II.1.2. Orientation	20
II.1.3. Les ouvertures	20
II.1.3.1. Orientation des ouvertures et exposition des façades	20
II.2. Dispositifs thermiques	22
II.2.1. Les masques et les protections solaires	22
II.2.2. Le mur capteur	24
II.2.3. Les serre solaires	25
II.2.4. Le capteur solaire	26
II.2.4.1. Capteurs solaires thermiques	26
II.2.4.2. Panneaux photovoltaïques	27
II.2.5. La végétation et de l'eau	28
II.2.5.1. La végétation :	28
II.2.5.2. L'eau	30
II.3. Dispositifs hygroscopiques	31
II.3.1. La ventilation :	31
II.3.2. Le puits canadien :	32
II.3.3. Les tours à vent	32
II.3.4. Façade intelligente (active)	34
II.3.4.1. Façade double peau	35
II.3.4.2. Façade ventilée	35
II.3.4.3. Façade active lucido	36
II.3.4.4. Une façade intelligente grâce à des brise-soleil automatisés	36
Conclusion	37

Chapitre II : La façade à double peau

Introduction	
III.1. Qu'est-ce qu'une façade à double peau ?	38
III.1.1. Définition	38
III.1.2. Le rôle d'une FDP	39
III.2. Historique	39
III.3. Composants de la façade à double-peau	42
III.3.1. Peau intérieure & peau extérieure	42
III.3.2. Canal	42
III.3.2.1. Espacement du canal	43
III.3.2.2. Type du canal	43
III.4. Mode de fonctionnement d'une FDP	45
III.5. Les échanges thermiques d'une FDP	46
III.6. Protections solaires	47
III.6.1. Type des protections solaires	47

III.6.2. Position des protections solaires -----	48
III.7. Différentes techniques des FDP -----	48
III.7.1. Les façades vitrées -----	48
III.7.2. Les façades métalliques -----	48
III.7.3. Les façades végétalisées -----	49
III.8. Système de Ventilation des FDP -----	50
III.8.1. Ventilation forcée -----	50
III.8.2. Ventilation naturelle -----	50
III.8.2.1. Façade étanche -----	51
III.8.2.2. Façade assurant la ventilation des locaux -----	52
III.8.3. Ventilation hybride -----	53
III.9. Stratégies de ventilation des FDP -----	53
III.10. Emplacement des ouvertures d'air -----	53
III.11. Avantages et inconvénients -----	55
III.11.1 Avantages -----	55
III.11.2. Inconvénients -----	56
III.12. Exemple d'utilisation de la façade à double peau -----	53
Conclusion -----	64
 Conclusion générale -----	 65

Références bibliographiques

Annexes

Résumés

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1. Carte des Climats dans le monde.....	7
Figure I.2 : Carte des zones climatiques d'Algérie	8
Figure I.3 : Carte de Jijel, Algérie	10
Figure I.4 : Données météorologiques de JIJEL en 2016.	10
Figure I.5 : Plan prototype des maisons	13
Figure I.6 : Les maisons troglodytes de Matmata, Tunisie	14
Figure I.7 : Les maisons troglodytes de Matmata, Tunisie	14
Figure I.8 : Vue intérieur d'un espace troglodytique à Matmata	15
Figure I.9 : place de l'occupant au centre de ses préoccupations	16
Figure I.10 : Principes de l'architecture bioclimatique	18
Figure II.1 : Zonage bioclimatique	21
Figure II.3 : Protection solaire : brise soleil.....	23
Figure II.2 : Protection solaire : volets roulants.....	23
Figure II.5 : Masque solaire « volets »	23
Figure II.4 : protection solaire par végétation.....	23
Figure II.6 : Types de murs trombe	24
Figure II.7 : schéma d'un mur Trombe.....	25
Figure II.9 : Maison en bois solaire	26
Figure II.8 : Fonctionnement d'hiver & d'été d'une serre.....	26
Figure II.10 : schéma de principe d'un capteur solaire thermique.....	27
Figure II.11 : schéma de principe d'un panneau photovoltaïque.....	27
Figure II.12 : mur végétal du jardin suspendu du quai Branly	28
Figure II.13 : Toit végétalisé à Steinhausen en Styrie (Autriche).....	28
Figure II.14 : les composants d'une toiture végétalisée.....	29
Figure II.15 : Coupe d'un mur végétal	29
Figure II.16 : Mur végétal	29
Figure II.17 : Jardins suspendus de Babylone, Maertenvan Heemskerck	30
Figure II.18 : configurations de ventilation naturelle.	31
Figure II.19 : principe de fonctionnement d'un puits canadien	32
Figure II.20 : Puits canadien	32
Figure II.22 : Les tours à vent de Masdar city, Dubaï	33
Figure II.21 : Les tours à vent de Yazd, Iran	33
Figure II.23 : configuration des tours à vent.....	33
Figure II.24 : éléments d'une façade double peau	34
Figure II.25 : La double peau de l'Office fédéral de la statistique à Neuchâtel	34
Figure II.26 : façade ventilée	35
Figure II.27 : façade double peau ventilée pour le centre hospitalier de Brive-la- Gaillarde.....	35
Figure II.28 : Immeuble de bureau « morija » valais, Suisse	36
Figure II.29 : façade intelligente grâce à des brise-soleil automatisés	37
Figure III.1 : Exemple façade à double peau	38
Figure III.2 : Schéma d'une double peau.....	39
Figure III.4 : Extension d'usine Steiff à Giengen, Allemagne	40
Figure III.3 : Usine Steiff à Giengen, Allemagne.....	40

Figure III.5 : Postal savigns bank, Autriche	40
Figure III.6 : Hall central de la banque, Autriche	40
Figure III.8 : Bâtiment Centorsoyus Russie	41
Figure III.7 : Bâtiment Narkomfin Russie	41
Figure III.9 : Cité de Refuge, Paris, France	41
Figure III.10 : l'Immeuble Clarté, suisse	41
Figure III.11 : Composants d'une double peau.....	42
Figure III.12 : Canal accessible	43
Figure III.13 : Exemple d'atrium.....	43
Figure III.14 : types des FDP selon le fractionnement du canal.....	44
Figure III.15 : Fonctionnement hivernal et estival d'une FDP	46
Figure III.16 : Fonctionnement hivernal et estival d'une FDP	47
Figure III.17 : Rideaux à bandes verticales d'une FDP.....	47
Figure III.18 : Stores à rouleau d'une FDP.....	47
Figure III.19 : exemples FDP vitrées.....	48
Figure III.20 : Exemples FDP métalliques	49
Figure III.21 : Exemples FDP végétalisées	49
Figure III.22 : les différents modes de ventilation d'une FDP	51
Figure III.23 : Ventilation des locaux.....	52
Figure III.24 : Ouvertures d'air fractionnées	54
Figure III.25 : Ouvertures décalées.....	54
Figure III.26 : Ouvertures non fractionnées.....	55
Figure III.27 : Emplacement du conduit pour l'évacuation de l'air chaud.....	55
Figure III.28 : Vue aérienne « Zone A » du campus	56
Figure III.29 : Vue aérienne du site de l'Université de Bordeaux.....	56
Figure III.30 : Sites universitaires bordelais concernés.....	56
Figure III.31 : campus de l'université de bordeaux avant rénovation.	57
Figure III.32 : Campus de l'université de bordeaux après rénovation.....	59
Figure III.33 : Comportement nouvelle enveloppe HIVER.	60
Figure III.34 : Comportement nouvelle enveloppe ETE.	60
Figure III.35 : protections solaires par rapport aux orientations.....	61
Figure III.36 : Rafraîchissement de l'air.....	62
Figure III.37 : schéma de ventilation.	62
Figure III.38 : Température de soufflage Adiabatique en fonction de l'humidité et de la température extérieure	62
Figure III.39 : consommation énergétique.....	63
Figure III.40 : performances visées.	63
Figure III.42 : Nouvelle façade bioclimatique bâtiment B8	63
Figure III.41 : Vue depuis l'intérieur de la façade Bioclimatique	63

Tableau I.1 : Les zones climatiques d'Algeries.....	9
Tableau III.1 : Consommation énergétique du campus.....	64

Introduction générale

*« Si l'architecture n'a pas de rêve, le bâtiment n'a pas d'âme.
Mais s'il ne respecte pas les contraintes physiques ou s'il ne sait pas
interpréter son rêve dans le langage des contraintes physiques,
son rêve ne trouvera pas de matérialisation ».*

Ljubica MUDRI.

➤ Introduction générale :

A la fin des années quatre-vingt, et avec l'apparition et la diffusion du concept de « développement durable¹ », on en vient à une approche plus globale : l'architecture devient écologique, verte, environnementale. Il ne s'agit plus simplement d'économiser l'énergie et de favoriser le confort mais de penser également à la santé des occupants, de gérer les ressources (énergie et matières) grâce notamment à l'étude des cycles de vie, tout en limitant les pollutions.

Le tout premier objectif de cette nouvelle architecture est de mettre en évidence le rôle du facteur climatique, et le soleil en particulier, dans la détermination de la forme des bâtiments, La prise en compte du climat en amont peut nous assurer l'amélioration des conditions du confort à l'intérieur de l'espace habitable et par conséquent la minimisation de l'impact sur l'environnement avec la possibilité d'économiser dans la consommation des énergies fossiles.

Une étude détaillée de « Pierre Fernandez et Pierre Lavigne »², a cité l'ensemble des impacts du bâtiment sur son environnement extérieur et intérieur. Pour l'environnement extérieur, elle les décrit aux trois échelles généralement considérées comme pertinent pour une approche environnementale correcte, soit :

- ✚ L'échelle globale ou planétaire : liée aux phénomènes atmosphérique globaux et à la gestion mondialisée des ressources ;
- ✚ L'échelle régionale : qui concerne la zone géographique et souvent climatique ;
- ✚ L'échelle locale : relative au bâtiment, à sa parcelle d'implantation et à son environnement proche.

Et pour l'environnement intérieur, il s'agit des impacts sur l'utilisateur qui, d'une part ressentira une sensation de confort ou d'inconfort et, d'autre part, risquera de contracter d'éventuelles maladies provoquées par le bâtiment lui-même.

¹ Un développement social, économique et politique répondant aux besoins présents, sans hypothéquer ou compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leur propre développement.

² « *Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes* », édition : le moniteur 2009.

La même étude nous a indiqué les impacts d'une bâtisse sur le confort. Il s'agit en premier lieu de l'action du bâtiment sur les ambiances physiques internes. Mal conçu, le bâtiment ne tiendra pas son rôle première d'abri et générera des sensations d'inconfort hygrométrique (ambiance ressentie comme trop chaude ou trop froide), acoustique (majorité des plaintes de voisinage), visuel (éclairage naturel insuffisant, éblouissement, contrastes trop violents, etc.) ou olfactif (souvent lié à une mauvaise ventilation).

La gêne due au vent concerne les espaces situés sur la parcelle. A proximité immédiat du bâtiment, également soumis, comme le bâtiment, aux effets gênants du vent. Elle provient de la double influence de l'opération (dimension et formes du bâtiment par rapport au site) et de son environnement extérieure (présence d'autre construction, climat).

La sensation d'inconfort psychosociologique traduit soit la gêne engendrée par un déséquilibre psychologique, du côté de l'habitant, ou fonctionnel, du côté du bâtiment, soit l'inadéquation de l'opération avec le cadre social. Cet impact provient de la double influence de l'opération et de site sur l'occupant. A savoir : d'une part, l'architecture extérieure et intérieure, la qualité de la construction, la convivialité des espaces le rapport visuel avec l'extérieure, etc. et, d'autre part, la faible fonctionnalité du site, son éloignement des services et des transports, le voisinage difficile, etc.

Le syndrome des bâtiments malsains (SBM : fatigue, allergies, etc.) résulte de l'influence d'une association de caractéristiques du bâtiment sur la santé de l'usage très difficile à mettre en évidence. Il ne concerne que l'intérieure de l'enveloppe du bâtiment et n'est imputable qu'au bâtiment lui-même³.

La conception du bâtiment avec des techniques passives est donc la meilleure solution pour diminuer ces impacts. Cette conception est possible, par le choix judicieux de la bonne implantation, de l'orientation optimale, ainsi qu'une bonne maîtrise des facteurs climatiques environnementaux.

³ Pierre Fernandez et Pierre Lavigne, « *Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes* », édition : le moniteur 2009.

➤ **Problématique :**

*« Le principe consiste à donner pour un certain bâtiment les conditions extérieures pour lesquelles les réponses de l'enveloppe et de la structure conduira à des ambiances intérieures comprises à l'intérieure d'une zone de confort préalablement définie. La réponse du bâtiment étant intrinsèque, ce sont les données météorologiques qui, utilisées en entrées du diagramme, permettent de dire si telle ou telle solution architecturale est correcte ou non, par rapport au climat du lieu ou quelles conditions devront être prises pour réintégrer les conditions de confort ».*⁴

Tout bâtiment s'inscrit dans un environnement avec lequel il interagit et entretient un ensemble plus ou moins harmonieux de relations. La prise en compte du climat se place au cœur de ce dialogue entre l'architecture et son environnement dans un souci de création d'espaces de vie qui évoluent au fil des heures.

L'architecture climatique concrétise cette volonté d'accorder une juste place au climat parmi les dimensions fondamentales de l'architecture. Elle replace l'acte d'occuper un bâtiment dans un contexte dynamique, où l'enveloppe (au sens large) du bâtiment est considérée comme « *une troisième peau* », après la nôtre et les vêtements, qui joue le rôle de médiateur entre le climat extérieur et une ambiance intérieure⁵.

L'architecture climatique se base sur les architectures traditionnelles, mais aussi sur de nouvelles technologies. Elle prend en compte les facteurs climatiques pour la construction du bâtiment et également la notion d'économie d'énergie. C'est une architecture consciente. Elle est tout d'abord consciente des besoins des êtres vivants qui l'habitent, au niveau de la santé (soigner l'air intérieur des locaux), de la psychologie de l'espace (les formes et les couleurs), du confort thermique (conception bioclimatique) et du confort acoustique. Elle est aussi consciente des problèmes d'environnement en général, par le choix des formes et des matériaux. Avec l'architecture écologique, il s'agit de retrouver la sagesse naturelle qui permet de réaliser des constructions en harmonie avec le climat.

⁴ Jean-louis Izard- Alain Guyot - Archi Bio – éditions : parenthèses ; Paris, 1979

⁵ Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°3 (2009) 471 – 488, Le confort thermique entre perception et évaluation par les techniques d'analyse bioclimatique - Cas des lieux de travail dans les milieux arides à climat chaud et sec- p, 473.

Dans la construction d'un édifice, la fonction « enveloppe » du bâtiment désignant l'interface avec l'extérieur joue un rôle primordial dans la réduction des besoins énergétiques du bâtiment. Différents types de façades existent et permettent de répondre à ces attentes.

Les bâtiments d'une façon générale se trouvent confrontés face à des problèmes de détérioration d'enveloppe, d'inconfort, de changement négatif d'environnement, et de consommation irrationnelle des énergies non renouvelables. Pour cela, les architectes se sont attelés à mettre en place des dispositifs divers dont l'objectif est de contrôler et minimiser l'utilisation des énergies fossiles, et revaloriser les commodités de vie dans un environnement sain et propre. Notamment l'introduction des dispositifs passifs et actifs dans les constructions pour contrôler, maîtriser et optimiser le confort climatique des usagers.

Notre travail s'inscrit dans une optique globale de recherche sur l'amélioration de l'aspect qualitatif des constructions par l'intégration des dispositifs de contrôle climatique pour un confort optimale. Les principaux questionnements qui vont jalonner notre recherche :

- ✚ Quels sont les stratégies de conception à adopter, et les dispositifs à utiliser qui contribuent au contrôle climatique, l'amélioration de confort et de performances énergétiques des constructions du climat humide ?
- ✚ quel type de façade doit-on utiliser pour amender le confort climatique des bâtiments à construire et construits ?

➤ **Hypothèses :**

Au vu de cette problématique, notre hypothèse de recherche est énoncée comme suit :

- ✚ La conception climatique est la plus adéquate à utiliser comme réponse effective de l'interaction du climat et architecture ; une solution optimale pour maximiser le confort et les ambiances intérieurs du bâtiment.
- ✚ Introduction des dispositifs passifs (conception architecturale intégrée et principes de l'architecture bioclimatique) et des dispositifs actifs (technologie intégrée).
Ces dispositifs sont classés au même temps selon les éléments clés du climat méditerranéen : énergie solaire-ensoleillement- « dispositifs thermiques », vents et humidité « dispositifs hygroscopiques ».
- ✚ La façade "intelligente" est la meilleure à utiliser, grâce à ses équipements dynamiques et éléments préfabriqués elle s'adapte facilement aux besoins de confort des occupants et anticipe les besoins énergétiques du bâtiment. Parmi les différents types de cette

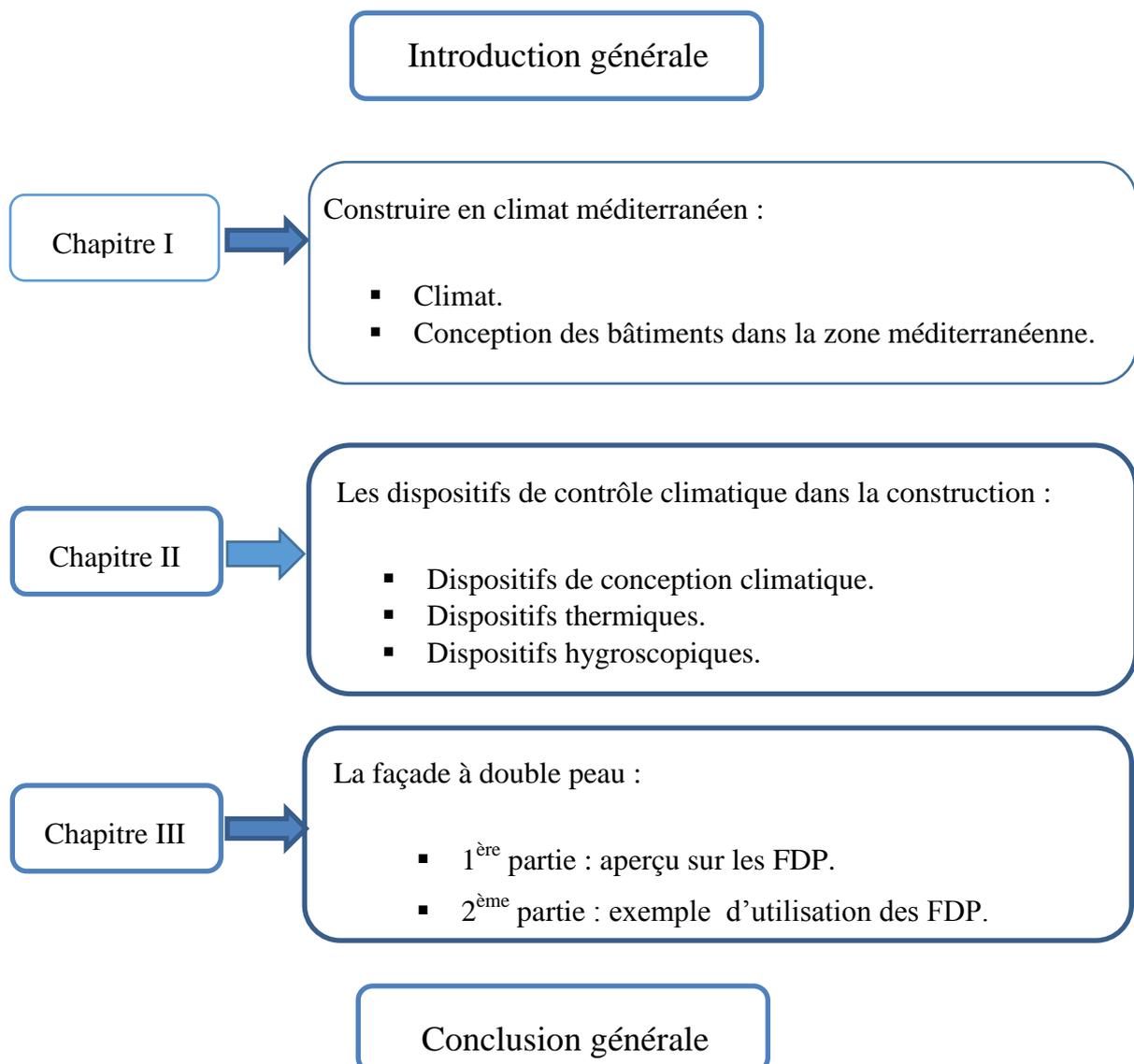
façade, « la double peau » permet d'associer l'esthétique, la modernité et les bonnes performances énergétiques.

➤ **Objectifs et structure de la recherche :**

Les objectifs de notre recherche s'inscrivent au confluent le raffermissement de confort climatique des constructions méditerranéennes. Ils se résument comme suit :

- ✚ Comprendre la notion « climat » et appréhender l'influence de ses paramètres sur le bâtiment.
- ✚ Introduire des dispositifs actifs/passifs de contrôle climatique dans les constructions.
- ✚ Comprendre le principe de la façade à double peau et bien saisir son comportement esthétique et énergétique.

Pour concorder à ces objectifs, nous avons divisé notre recherche en trois chapitres, organisés comme suit :



Chapitre I

Construire en climat méditerranéen

*« L'architecture est fatalement climatique, il n'y a architecture
que lorsqu'il y a contraintes. Le climat en est une à laquelle on
n'échappe pas ».*

Pierre Lavigne.

Le cadre bâti a toujours été influencé par le contexte climatique auquel il appartient, et souvent la conception architecturale s'évertue afin de présenter la meilleure adéquation avec l'environnement. C'est pour ça que la maîtrise du climat est aujourd'hui indispensable pour tout responsable soucieux de la conservation à long terme des biens à sa charge. L'étude climatique est l'un des outils pour atteindre cet objectif : à l'exploitation des données sont associées une interprétation et des recommandations qui seront autant de pistes pour améliorer ou maintenir les conditions climatiques.

A travers ce chapitre nous aborderons la notion du climat à travers sa définition, ses variables, ses éléments et ses types qui doivent être prises en compte lors des processus de conception architecturale dans un premier axe et les différents principes qui se rapportent directement à la conception bioclimatique dans deuxième axe.

I.1. Le climat

Selon Encarta 2009, Les définitions du climat sont nombreuses, dont la plus large est « L'ensemble des phénomènes météorologique qui se produisent au-dessus d'un lieu dans leur succession habituelle ».

Le climat désigne les conditions générales du temps et ce que l'on prévoit à cet égard. On peut envisager cette notion comme une condition locale ou l'appliquer à de plus vastes régions ou à la planète entière. « *Le climat est le résultat de plusieurs années de tous les phénomènes atmosphériques observés dans un endroit particulier* »⁶.

Le climat d'un lieu dépend :

- ✚ De sa position en latitude,
- ✚ De sa circulation atmosphérique générale,
- ✚ Des caractéristiques de l'environnement et du site (relief, végétation, eau, ville etc.)

On peut distinguer un ensemble d'éléments et des facteurs climatiques rapportés en catégorie selon ⁷:

- ✚ Facteurs énergétiques : rayonnement, lumière, et température,
- ✚ Facteurs hydrologiques : précipitations et hygrométrie,
- ✚ Facteurs mécaniques : vents et enneigements.

En relation avec les concepts de l'urbanisme et l'architecture « *Le climat est l'un des principales données de la morphologie des systèmes architecturaux et urbains* »⁸.

⁶⁶ Toufik Benlatreche, « Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics », mémoire de magistère, Université Mentouri Constantine, 2006, p.11

⁷ Pierre Estienne & Alain Godard., « climatologie » paris : édition Armand Colin 1970, p.76

I.1.1. Les éléments du climat

Les éléments du climat apparaissent en combinaison, il est difficile de déterminer leur degré d'importance. En plus de son aspect qualitatif, le climat présente un aspect quantitatif mais l'approche générale d'étude se base sur la sensation de confort.

Selon Konya, A⁹ ; les principaux éléments sont : la radiation solaire, la température de l'air, l'humidité, le vent et les précipitations.

I.1.2. Classification du climat

Il existe de nombreuses classifications des climats, elles varient en fonction des méthodes utilisées et des données observées. Suivant la classification de *Rosalie Mignon* ; elle distingue les climats généraux de son traité comme géographe général en huit climats fondamentaux :

- ✚ Climat polaire, Climat continental, Climat continental sec, Climat océanique, Climat méditerranéen, Climat aride chaud, Climat tropical & Climat équatorial.

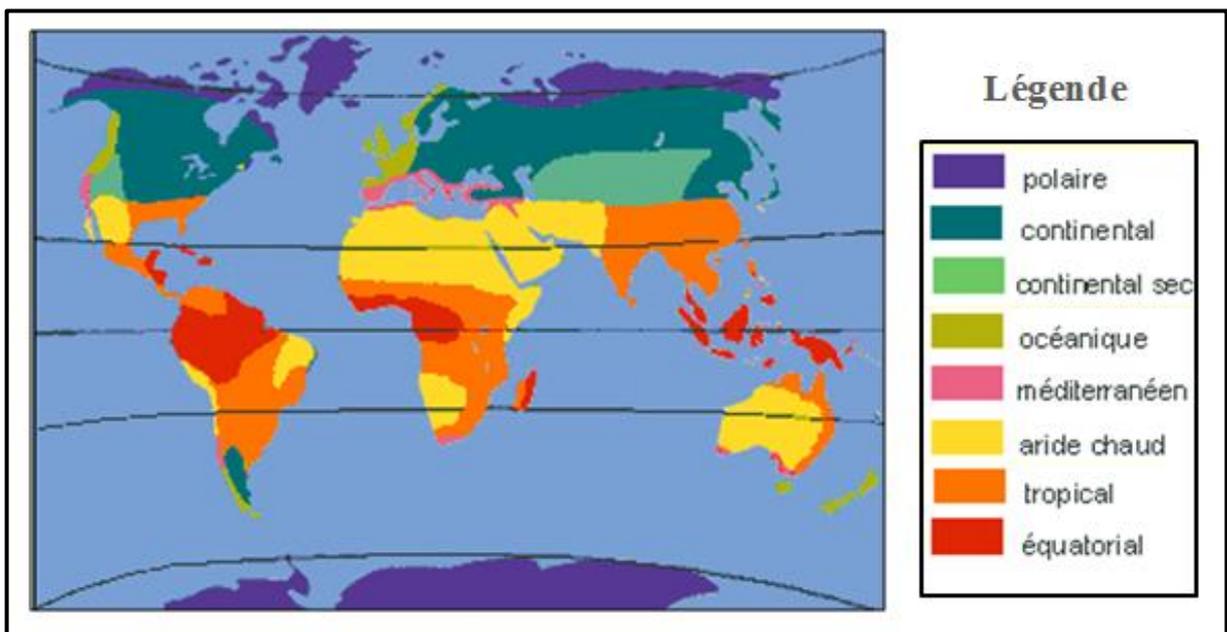


Figure I.1. Carte des Climats dans le monde

Source : Rosalie Mignon ; 1998

I.1.3. Le climat en Algérie

L'Algérie occupe une vaste étendue territoriale, sa superficie dépasse les deux millions de Km². Plus de 4/5 de sa superficie est désertique. D'où une large variété géographique et climatique

⁸ Michel Duplay & Claire Duplay , « Méthode illustrée de création architecturale », le moniteur 1982, p52.

⁹ Allan Konya, «*Design primer for hot climates*», Whitney Library of Design, 1980, p 9 -13.

allant du littoral au désert. La classification climatique en Algérie permet de distinguer quatre zones principales¹⁰ :

- ✚ Zone A : Littoral marin,
- ✚ Zone B : Arrière littoral montagne,
- ✚ Zone C : Hauts plateaux,
- ✚ Zone D : Présaharien et saharien.

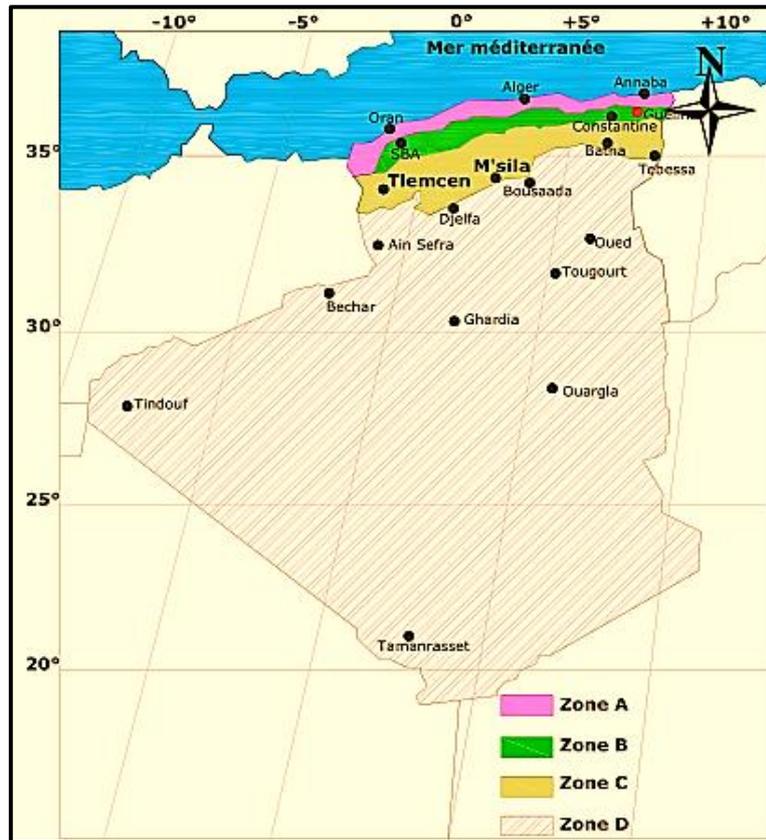


Figure I.2 : Carte des zones climatiques d'Algérie

Source : MAZOUZ Saïd, 2004.

¹⁰ Saïd MAZOUZ., « *Eléments de conception architecturale* », Alger : Edition O.P.U, Juillet 2004, p176-177.

Zone A : littoral marin	
Localisation	Latitude : entre la limite supérieure de 35°N à l'ouest à 37°25N à l'est La limite inférieure de 35°15 à l'ouest à 37° 35 à l'est,
Variations saisonnières	spectre climatique varié de chauds étés avec soleil abondants et peu de pluies et des hivers modérés,
Températures	20 à 25 °C,
Précipitations	assez pluvieux de 500 mm,
Humidité	peu élevée,
Vents	modérés, nord à nord ouest en hiver.

Zone B : Arrière littoral montagne	
Localisation	Latitude:entre la limite supérieure de 35°10 N à l'ouest à 37°35N à l'est La limite inférieure de 35°25 à l'ouest à 36° 25 à l'est,
Variations saisonnières	avec des hivers plus frais.

Zone C : Hauts plateaux	
Localisation	Latitude:entre la limite supérieure de35°25Nà l'ouest à 36°25N à l'est La limite inférieure de 34°50 à l'ouest à 35° à l'est,
Température	supérieure à 30°C. Ecart important (15-18). En hiver, les températures tombent en dessous de 0,
Précipitations	environ 300mm mais très variable,
Humidité	peu élevée,
Conditions célestes et rayonnement	ciel clair avec des périodes de nuage léger. Rayonnement diffus modéré, des nuages et rayonnement réfléchi par le sol de modéré à élevé,
Vents	Essentiellement de direction ouest. Tendent à être forts débutant en fin de matinée atteignent le maximum dans l'après midi. Nuits calmes.

Zone D : Pré-sahara et sahara	
Localisation	Latitude: entre la limite supérieure de 34°50N à l'ouest à 35°N à l'est. La limite inférieure de 19° à l'est et à l'ouest,
Variations saisonnières	02 saisons, chaude et froide,
Température	T°Moy, Max : 45°C et entre 20-30°C en hiver, variation saisonnière de 20°C. L'effet de la latitude les hivers deviennent de plus en plus froids,
Précipitations	Pluies rares, torrentielles par moments,
Humidité	réduite entre moins 20% après midi à plus de 40% la nuit,
Conditions célestes et rayonnement	ciel clair pour une grande partie de l'année, mais les vents sable et les tempêtes sont fréquents, arrivant généralement les après midis. Rayonnement solaire intense augmenté par les rayons réfléchi par le sol,
Végétation	extrêmement clairsemée,
Vents	généralement locaux.

Tableau I.1 : Les zones climatiques d'Algeries

Source : Saïd MAZOUZ Saïd, *Eléments de conception architecturale*, 2004.

I.1.4. Le climat de Jijel

Jijel, ville de nord-est algérien, se situe entre 36° 45' de latitude nord et 6° 0' de longitude Est avec une altitude de 8 m. Suivant la classification précédente, Jijel appartient à la zone climatique A (climat méditerranéen « littoral marin » qui se caractérise par un spectre climatique varié de chauds étés avec soleil abondants et peu de pluies et des hivers modérés).



Figure I.3 : Carte de Jijel, Algérie

Source : <https://fr.weather-forecast.com>

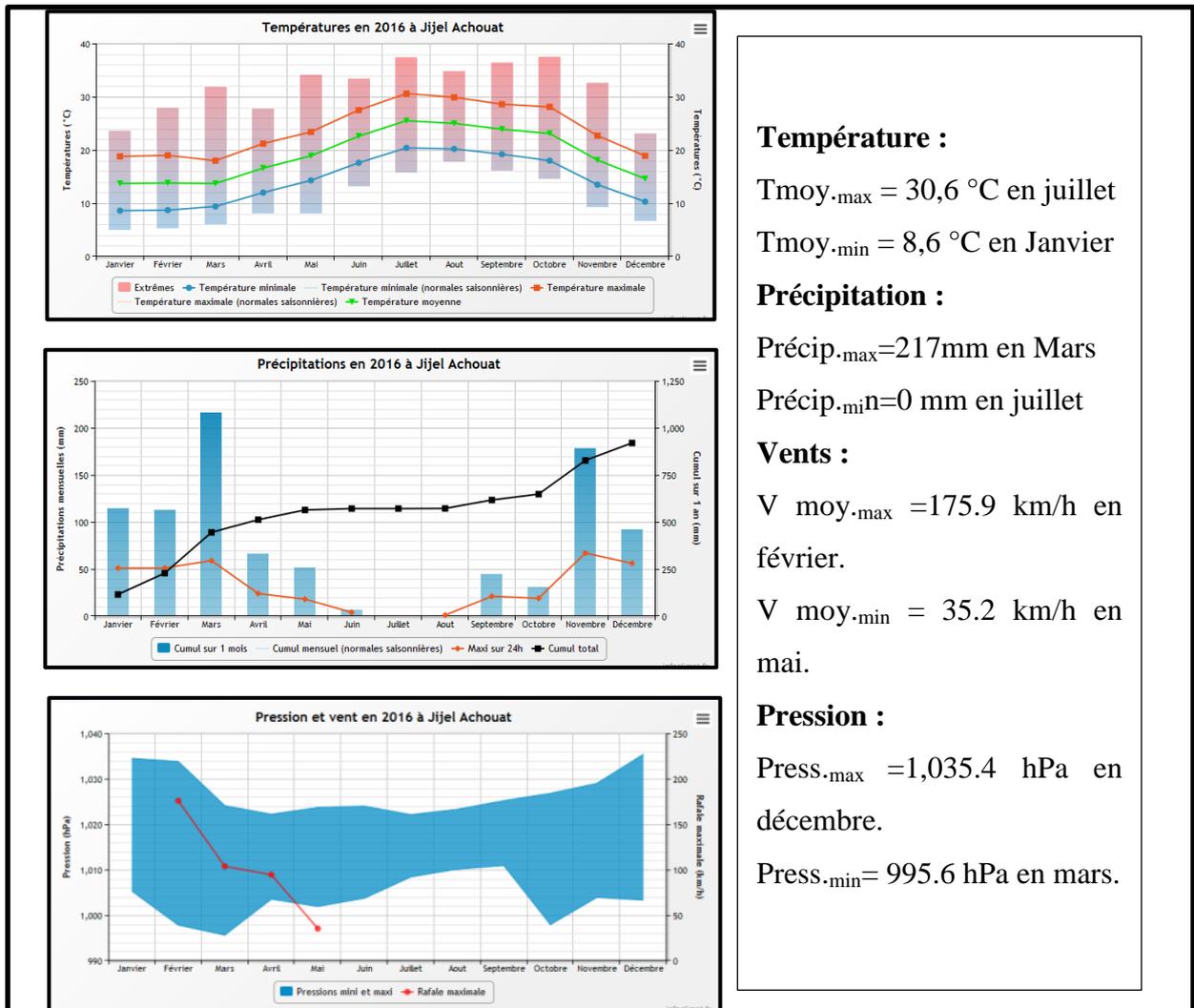


Figure I.4 : Données météorologiques de JIJEL en 2016.

Source : <https://fr.weather-forecast.com>

I.2. Conception des bâtiments dans les régions du climat méditerranéen

I.2.1. Influence des paramètres climatiques dans la conception des bâtiments méditerranéens ¹¹

I.2.1.1. L'ensoleillement

Les taux d'ensoleillement que représentent les fractions d'insolation sont très élevés. Ceci est très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire, depuis la conception solaire passive (apports gratuits de chaleur) à la valorisation au travers la production d'ECS (solaire thermique) ou la production d'électricité (solaire photovoltaïque). Il faudra également s'en protéger afin d'éviter l'inconfort thermique.

I.2.1.2. Le vent

Pour le bâtiment, il constitue une aggravation des charges thermiques du chauffage par infiltration par les menuiseries. Il vient souvent suractiver les échanges thermiques mais peut aussi être mis à contribution pour ventiler les locaux de jour comme de nuit. Son effet thermique dépend de la température de l'air : en hiver il accroît toujours la sensation de froid alors qu'en été, il peut soit apporter un peu de fraîcheur, soit au contraire rendre l'atmosphère irrespirable lorsque la température d'air dépasse 33 à 34°C. Il peut être tentant d'exploiter son énergie avec des éoliennes.

I.2.1.3. L'humidité

Du fait de la proximité de la mer l'humidité moyenne relative s'élève à 50% en été et 75% en hiver, ce qui est relativement élevé. Combinée à des températures douce cela pourra influencer sur les niveaux de confort : une ventilation performante devra être mise en place pour garantir le confort thermique et la qualité de l'air.

I.2.1.4. Pluviométrie

La région méditerranéenne est caractérisée par sa saison sèche, mais également par ses pluies orageuses abondantes en automne. Il faudra donc tenir compte du risque d'inondation et prévoir des systèmes de rétention adaptés.

¹¹ CSD Azur, Domene, In Vivo, « *construire en climat chaud caractéristiques du climat méditerranéen* », septembre 2010.

I.2.2. Illustration d'une construction au climat méditerranéen¹²

Il s'agit des maisons individuelles, au minimum de 120 m², en bande à Sousse, Tunisie. Latitude : 35,46° nord. L'habitude veut que les pièces s'organisent autour d'un patio.

I.2.2.1. Données climatiques

Climat contrasté : un hiver froid (le mois de janvier le plus froid), et un été chaud (mois d'aout le plus chaud).

Mois de janvier:	Mois d'aout:
<ul style="list-style-type: none">▪ $T_{\max} = 15^{\circ}\text{C}$▪ $T_{\min} = 7^{\circ}\text{C}$▪ Humidité relative 75%▪ Coefficient d'ensoleillement 0.6	<ul style="list-style-type: none">▪ $T_{\max} = 32.5^{\circ}\text{C}$▪ $T_{\min} = 21.5^{\circ}\text{C}$▪ Humidité relative 65%▪ Coefficient d'ensoleillement 0.8

I.2.2.2. Grandes orientations et dispositifs architecturaux

✚ Orientation des habitations en bande (mitoyenneté est/ouest) avec façades nord/sud (favorable hiver et été) :

- Ouvertures vitrées au sud,
- Couvertures du patio en forme de shed (avec casquette) orienté au sud, de telle sorte que :
 - L'hiver, les ouvertures sur l'extérieur et le vitrage sud du shed captent l'énergie solaire nécessaire,
 - En demi-saison, le vitrage sud puisse être ouvert,
 - L'été, la partie inclinée du shed puisse être recouverte de lattes ou peinte au lait de chaux¹³, afin de ne transmettre qu'un rayonnement solaire négligeable,
 - Les fenêtres en façade soient équipées de brises-soleils ou persiennes ou volet, ou moucharabiehs.

¹² Pierre Fernandez & pierre Lavigne « *architecture climatique : une contribution au développement durable* », tome2 : concepts et dispositifs, p.125-127.

¹³ La chaux vive diluée dans de l'eau.

- ✚ un plan tel que la pièce d'entrée « skifa », les dépendances et les pièces techniques se trouvent au nord, alors que la pièce principale est au sud et que les chambres sont principalement à l'est ou à l'ouest. Un traitement des surfaces à la chaux avant chaque été (surface sélective de faible absorptivité au rayonnement solaire).
- ✚ Une isolation importante des toitures et moyenne des murs.
- ✚ Une ventilation de nuit l'été organisée grâce à des manches orientées au vent dominant, fermées de façon étanche l'hiver et le jour durant l'été.
- ✚ Une bonne inertie par absorption de façon, d'une part, à réduire les oscillations de température par captage solaire d'hiver et, d'autre part, à permettre à la ventilation nocturne d'été d'être efficace. L'habitation doit être réalisée en maçonnerie intérieurement.

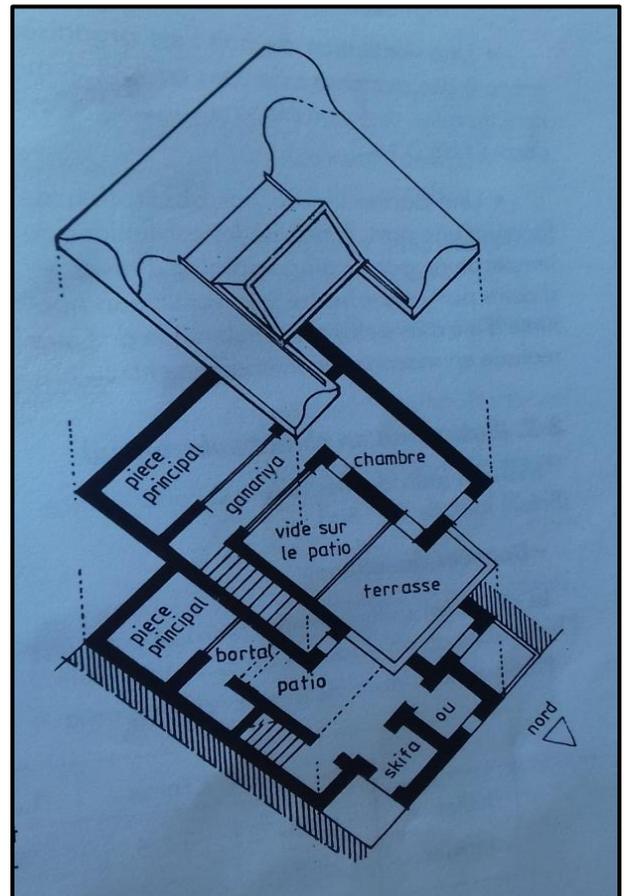


Figure I.5 : Plan prototype des maisons

Source : Pierre Fernandez & pierre Lavigne
« architecture climatique : une contribution au
développement durable »,

I.2.3. Interaction architecture et climat

Le climat a toujours joué un rôle déterminant dans la création de la forme bâtie. L'architecture savante, depuis Vitruve, et l'architecture vernaculaire ont toujours cherché à s'intégrer au climat environnant et à en tirer parti ; le village de maisons de Matmata au sud de la Tunisie est l'un des meilleurs exemples de cette architecture

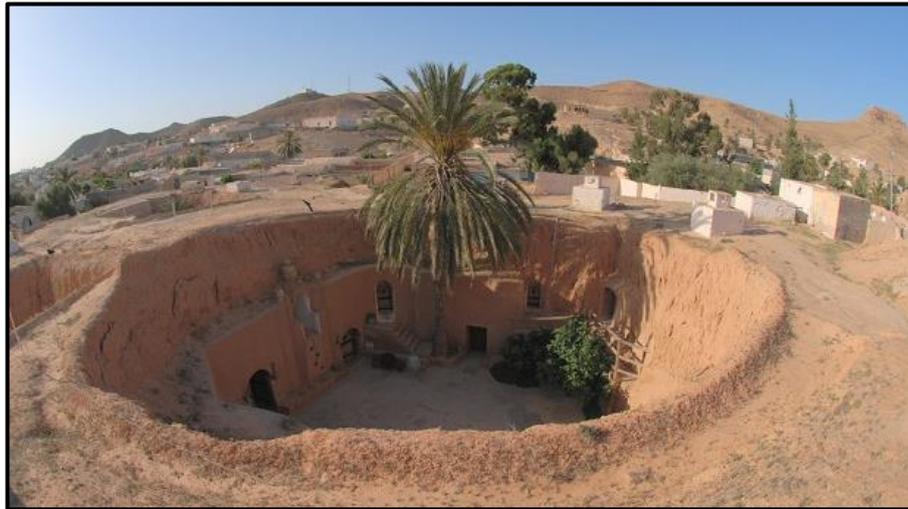


Figure I.6 : Les maisons troglodytes de Matmata, Tunisie

Source : <https://maison-monde.com>.

Matmata a été créé en creusant dans la colline de pierre et en creusant des grottes dans la roche. Chaque maison dans le village a été créée en grattant la roche, petit à petit, jusqu'à ce que les maisons soient formées. Chaque grotte, avec ses multiples pièces, est devenue une maison individuelle, avec ces maisons elles-mêmes réunies en communauté isolée¹⁴.

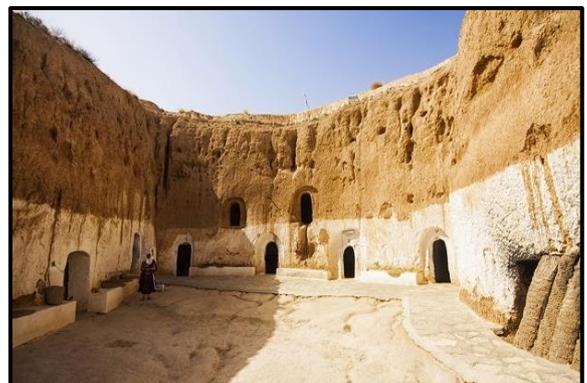
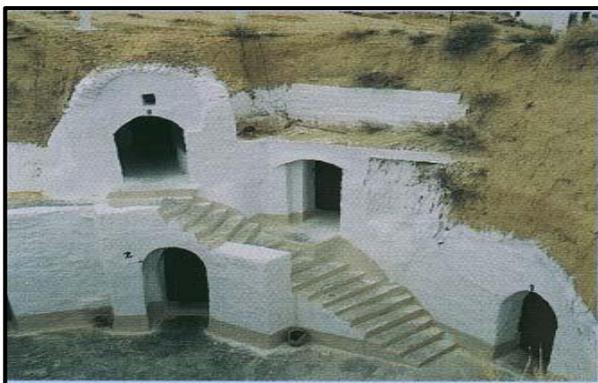


Figure I.7 : Les maisons troglodytes de Matmata, Tunisie

Source : <https://maison-monde.com>.

Ce village a été construit afin d'éviter le massacre prévu par l'invasion romaine et les soldats égyptiens. Les habitants ont quitté leurs villages et ont fait leurs maisons dans les grottes, qui se fondent parfaitement dans le décor ce qui rend difficile leur repérage et une seconde raison de cette conception c'est parce qu'ils protègent les habitants des fortes températures rencontrées dans cette région. En effet, les canicules reviennent plusieurs fois par mois à Matmata et ce, à longueur

¹⁴ <https://maison-monde.com/les-maisons-troglodytes-de-Matmata>, consulté le 21/09/2017.

d'année. Grâce à ces maisons, les habitants ont donc un lieu frais pour se protéger de la chaleur, même si cette dernière peut atteindre les 25°C à l'ombre lorsqu'il fait très chaud.



Figure I.8 : Vue intérieur d'un espace troglodytique à Matmata

Source : <http://mes-voyages.ameriquedusud.org>

En général, La conception des bâtiments dans la zone méditerranéenne, doit répondre à certaines spécificités qui peuvent mettre en valeur les opportunités climatiques méditerranéennes et en contrepartie, empêcher ou minimiser l'effet de différents facteurs pouvant générer un micro climat désagréable au sein du bâtiment, on rappelle toutefois que l'humidité dans cette zone est assez importante alors que l'éclairage solaire est peu violent, il s'agit particulièrement de concevoir ces bâtiments pour que¹⁵:

- ✚ Les entrées solaires, même si l'éclairage solaire est relativement faible, soient minimales ;
- ✚ Les oscillations de température intérieure soient minimales et le renouvellement d'air soit efficace en ayant une grande inertie thermique, au moins intérieure ;
- ✚ Éviter les protections, en ayant une orientation dominante Nord/Sud qui évitent le plus que possible les ouvertures à l'Est et l'Ouest ;
- ✚ Les bâtiments à plusieurs étages font partie des grands bâtiments qui fonctionnent comme des puits de cheminée géantes, particulièrement pendant l'hiver lorsqu'il faut chauffer l'air intérieur. Pour cette raison, il faut éviter d'ouvrir les fenêtres, car si c'est le cas et que les fenêtres restent ouvertes à chaque étage, l'air frais est introduit à la base, et l'air chaud est repoussé vers le haut, il s'agit de l'effet de cheminée. En conséquence ceux qui se trouvent aux étages inférieurs gèlent et ceux qui sont aux étages supérieurs étouffent (Roulet, 2004) ;
- ✚ Recourir à la ventilation pour réduire l'humidité spécifique à l'été méditerranéen ;

¹⁵ Dallel Kaoula. & mohamed Lehtihet., « construire avec le climat : réflexion sur les outils d'architectures en climat méditerranéen/cas de la ville de Jijel », 1 st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

- ✚ Le patio s'avère la meilleure solution pour l'apport de la lumière, l'air et la température qui sont d'une qualité agréable au moins les trois quarts de l'année

Le but de la conception, de la rénovation, et de la construction d'un bâtiment est de réaliser un microcosme en concordance optimale avec son environnement et de donner ainsi au climat une juste place parmi les dimensions fondamentales de toute intervention de l'architecte sur l'environnement. L'architecture ainsi définie inclue le climat et la dynamique qu'il implique : c'est *l'architecture bioclimatique*.

I.2.3.1. Définition d'architecture bioclimatique

C'est une démarche de conception architecturale qui vise à composer entre l'homme et son environnement afin de trouver le meilleur équilibre, en tirant avantage du climat. Ce néologisme a été appliqué à l'architecture par Olgyay Victor¹⁶. Elle est considérée comme voie alternative qui fait un intermédiaire entre le climat extérieur et l'ambiance intérieure. L'occupant est au centre de l'architecture bioclimatique.

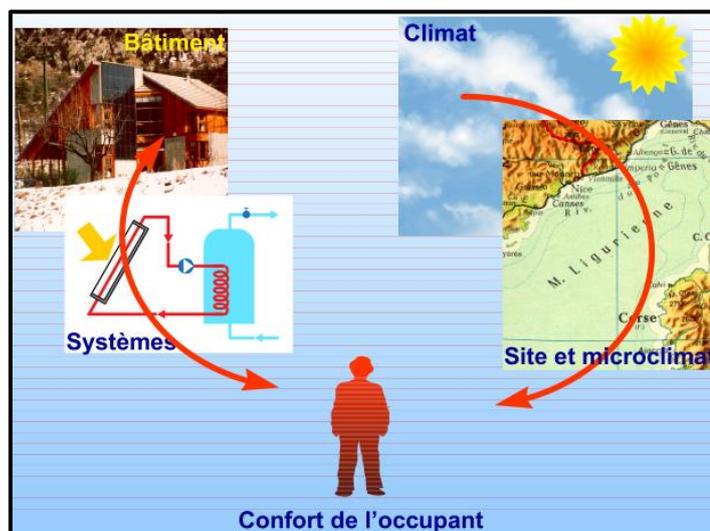


Figure I.9 : place de l'occupant au centre de ses préoccupations

Source : Alain Liébard & André De Herde, « *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* ».

Elle n'existe que dans l'objectif d'essayer de répondre à des exigences de confort. L'architecture bioclimatique se préoccupe donc des paramètres qui conditionnent le bien-être de l'habitant¹⁷.

¹⁶ Victor Olgyay "Design with climate", a bioclimatic approach to architectural regionalism, Princeton university press, 1963.

¹⁷ Alain Liébard & André De Herde, « *traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* », le moniteur 2005, p60.

Le concept de l'architecture bioclimatique est à l'origine de l'émergence des nouveaux concepts comme : « Haute Qualité Environnementale, HQE » ou mieux encore « Très Haute Performance Energétique », « Architecture Ecologique », « Architecture Durable » et « Architecture Verte ». Le concept de l'architecture bioclimatique mérite une explication plus profonde. L'hypothèse est que cette affiliation mène aux réactions favorables en termes de performance, de santé humaine et même les situations émotionnelles¹⁸.

I.2.3.2. Les principes de base de l'architecture bioclimatique¹⁹

- ☺ Minimisation des pertes énergétiques en s'adaptant au climat environnant :
 - Compacité du volume,
 - Isolation performante pour conserver la chaleur,
 - Réduction des ouvrants et surfaces vitrées sur les façades exposées au froid ou aux intempéries.
- ☺ Privilégier les apports thermiques naturels et gratuits en hiver :
 - Ouvertures et vitrages sur les façades exposées au soleil,
 - Stockage de la chaleur dans la maçonnerie lourde,
 - Installations solaires pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.
- ☺ Privilégier les apports de lumière naturelle :
 - Intégration d'éléments transparents bien positionnés,
 - Choix des couleurs.
- ☺ Privilégier le rafraîchissement naturel en été :
 - Protections solaires fixes, mobiles ou naturels (avancées de toiture, végétation,...),
 - Ventilation,
 - Inertie appropriée.

¹⁸Amjad Almusaed., «*Biophilic and Bioclimatic Architecture*», Springer-Verlag, London, 2011.

¹⁹ Karima benhalilou, «*impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estivale du bâtiment : cas du climat semi-aride* », mémoire de magistère, 2008, p.37

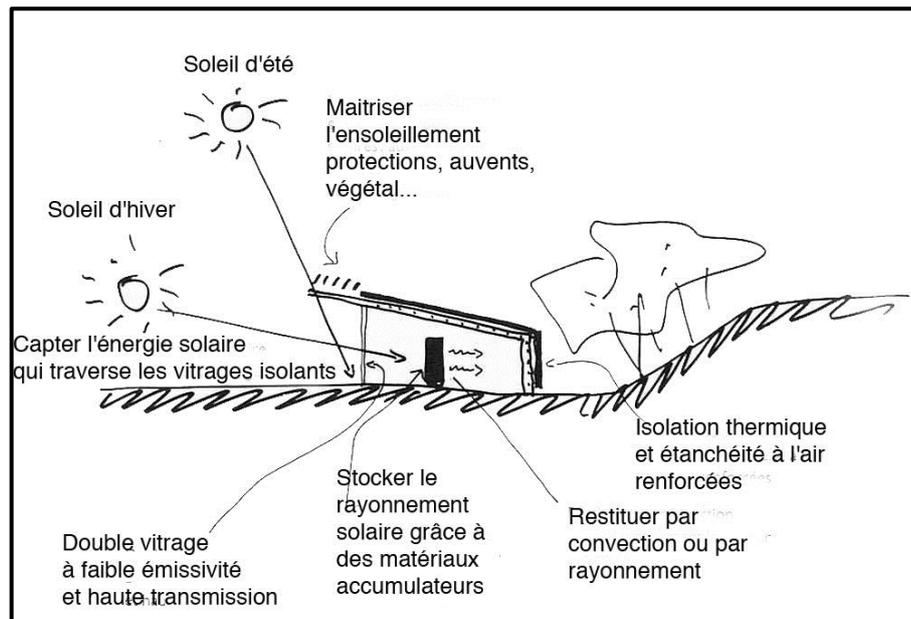


Figure I.10 : Principes de l'architecture bioclimatique

Source : <http://caueactu.fr>

Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de comprendre que l'architecture bioclimatique est déterminée par une série de facteurs dont un seul ne varie jamais, « le climat ». Notons que les variables climatiques sont déterministes et inchangeables et souvent interactives et conflictuelles, ce qui rend leur intégration dans le processus de conception dans sa totalité difficile. Intégrer l'ensemble de ces contraintes en préalable à la conception architecturale est indispensable pour réussir le projet architectural. De ce fait, l'architecte doit avoir une bonne connaissance et maîtrise de ces variables pour pouvoir lutter aux aléas climatiques et afin de concevoir une éco construction.

Chapitre II

Les dispositifs de contrôle climatique dans la construction

«No house should ever be on a hill or on anything.

It should be of the hill. Belonging to it.

Hill and house should live together each the happier for the other ».

Frank Lloyd Wright.

Le but d'architecture bioclimatique est l'harmonisation de l'environnement intérieur du bâtiment avec son environnement extérieur en prenant compte les constituants du climat : lumière, degré d'humidité, vitesse d'air, température ambiante, pour ne citer que cela. Pour y parvenir, il est recommandé de composer avec tous ces paramètres dès la conception de départ : orientation, ouvertures, végétation, protections solaires, isolation thermique, matériaux naturels..., afin d'assurer un certain confort.

Ce chapitre donc, présente un aperçu sur les différents dispositifs qui participent au contrôle climatique et l'amélioration du confort dans la construction selon les paramètres de la zone méditerranéenne.

II.1. Dispositifs de conception climatique

II.1.1. Implantation

Le site et l'environnement proche d'un bâtiment, influent sur le type de construction. L'architecture soucieux d'une insertion réussie cherche en effet à exploiter le potentiel du site, à contourner ses contraintes défavorables et à accorder les ambiances dans et hors de son bâtiment au microclimat du lieu. Pour ce faire, il procède à la collecte de l'information par une analyse du site et à une estimation des interactions entre le projet et site, selon le filtre de concepts architecturaux caractérisant l'implantation²⁰.

Les caractéristiques suivantes doivent être particulièrement prises en compte :

- ✚ le relief (l'orientation de la pente conditionne fortement les paramètres du microclimat, etc.),
- ✚ le contexte urbain (la forme urbaine modifie l'ensoleillement disponible et la pression du vent sur les façades, etc.),
- ✚ le type de terrain (humidité, albédo²¹ su sol, etc.),
- ✚ la végétation (effets sur l'humidité et la réduction de la vitesse du vent, etc.),
- ✚ la direction, la vitesse et la fréquence du vent, en tenant compte de leurs évolutions possibles dans le temps (développement urbain, croissance de la végétation, etc.).

²⁰ Pierre Fernandez, & Pierre Lavigne, « *concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes* », le moniteur 2009, p.29

²¹ Définit le taux d'absorption et de réflexion de la matière.

II.1.2. Orientation

Une bonne orientation suppose une bonne compréhension de la géométrie solaire, elle permet la combinaison entre les apports solaires en hiver avec une protection du soleil en été et en mi- saison, il est admis que toute forme allongée suivant l'axe est-ouest présente les meilleures performances thermiques²². En effet, une bonne orientation permet de :

- ✚ Couvrir les besoins en lumière naturelle pour assurer un confort visuel,
- ✚ Optimiser l'utilisation des rayons solaires pour chauffer en hiver tout en assurant une protection contre les surchauffes en été,
- ✚ Se protéger contre la présence de vents dominants froids d'hiver.

II.1.3. Les ouvertures

Indépendamment du passage des personnes, les ouvertures sont à considérer dans leur sens le plus large : d'une part ouvertures à la lumière naturelle et à l'énergie solaire et, d'autre part, ouvertures au passage d'air que nécessite la ventilation d'été.

Au plan thermique, même les fenêtres les mieux isolées présentent encore aujourd'hui un coefficient de déperdition thermique K nettement supérieur à celui des parois isolées. Elles constituent donc une des sources principales de déperditions du bâtiment. La déperdition peut être améliorée si l'on recourt à des volets isolants ou à des rideaux.

En hiver, la pénétration du soleil par les ouvertures assure une économie d'énergie. En été, elle peut avoir l'effet opposé s'il devient nécessaire de refroidir l'habitation. L'orientation, l'inclinaison et la distribution des ouvertures sont des éléments décisifs dans la conception du projet²³.

II.1.3.1. Orientation des ouvertures et exposition des façades

²² Said Mazouz, « *éléments de conception architecturale* », OPU, 4^{ème} édition, 2008.

²³ Alain Liébard & André De Herde, « *traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* », le moniteur 2005, p67.

II.1.3.1.1. Exposition nord

En climat tempéré, on minimisera les ouvertures coté nord pour la façade principale, car elle est très défavorable en hiver et en demi-saison ou les rayons de soleil sont recherchés pour chauffer. Par contre, en climat chaud, elle est très intéressante.

II.1.3.1.2. Exposition est et ouest

Pour ces orientations, le soleil est bas, la direction des ses rayons se rapproche de l'horizontale. L'exposition des ouvertures à ces deux directions rend leur protection difficile. L'ouest est l'exposition la plus défavorable, vu que l'après midi est le moment le plus chaud de la journée²⁴.

II.1.3.1.3. Exposition sud

C'est la plus intéressante du point de vue bioclimatique parce qu'elle est plus facile à maîtriser : l'ensoleillement d'hiver est maximal et l'ensoleillement d'été minimum, il est facile de s'en protéger moyennant un simple masque horizontal.

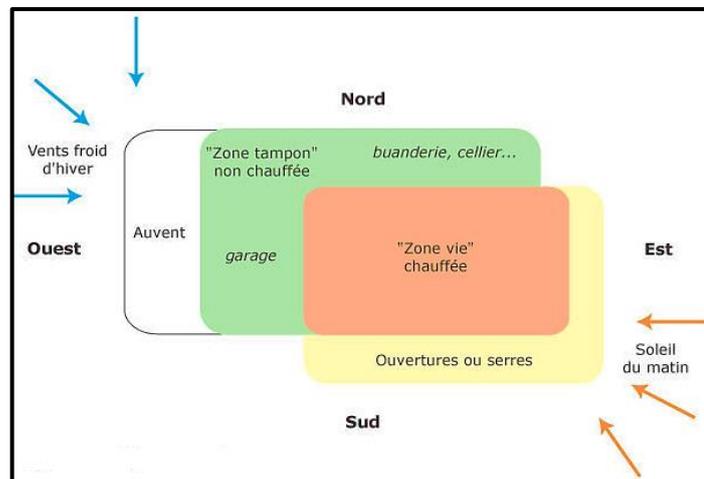


Figure II.1 : Zonage bioclimatique

Source : <https://www.forumconstruire.com>

²⁴ Jean Jacques Delétré, « Mémento de prises de jour et de protections solaires », E.A Grenoble, novembre 2003, p.7.

II.1.3.1.4. Toiture, la cinquième façade

Comme c'est la partie la plus exposée en été, il est recommandé, pour éviter les surchauffes, d'orienter les prises de jour de façon à éviter autant que possible les pénétrations solaires directes.

Dans le cas de tissus à patio, cette façade est la principale source d'éclairage naturel et de régulation climatique.

II.2. Dispositifs thermiques

II.2.1. Les masques et les protections solaires

On appelle protection solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillé. Les protections solaires ont pour but de :

- ✚ Réduire les surchauffes dues au rayonnement solaire. Si l'on identifie un problème de surchauffe, il faudra préférer un système de protection solaire extérieure, qui bloque le rayonnement avant production de l'effet de serre.
- ✚ Améliorer l'isolation en augmentant le pouvoir isolant des fenêtres. Cette propriété sera principalement recherchée durant les nuits d'hiver.
- ✚ Contrôler l'éblouissement. Un ensoleillement excessif peut rendre tout travail impossible. Ce phénomène est aussi important pour des fenêtres orientées au sud durant la saison chaude que lorsque le soleil est bas sur l'horizon : le matin, pour les fenêtres orientées à l'est, le soir, pour les fenêtres orientées à l'ouest, ou encore au sud en hiver. De même, dans les locaux orientés au nord, la vision directe d'un ciel trop lumineux peut devenir gênante et nécessiter une protection. La luminosité peut être contrôlée par un système de protection installé indifféremment à l'extérieur ou à l'intérieur.

Les protections solaires peuvent être intégrées à l'architecture : structurales (porche, véranda, brise soleil) ou appliquées (stores, persiennes, volets). Elles peuvent également être fixes ou mobiles (louvre), intérieures ou extérieures, verticales (principalement pour l'est et l'ouest) ou horizontales²⁵.

²⁵ Alain Liébard & André De Herde, « traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques », le moniteur 2005, p69.



Figure II.2 : Protection solaire : volets roulants

Source : <https://www.batiproduits.com>



Figure II.3 : Protection solaire : brise soleil

Source : <https://www.pinterest.fr>

Les protections solaires peuvent également être liées à l'environnement. La végétation à feuilles caduques procure un ombrage naturel saisonnier. On recherchera des essences avec peu de branchages, pour avoir un ombrage minimum en hiver, mais avec feuillage dense pour la raison inverse, en été.



Figure II.4 : protection solaire par végétation

Source : <https://deavita.fr/design-exterieur>

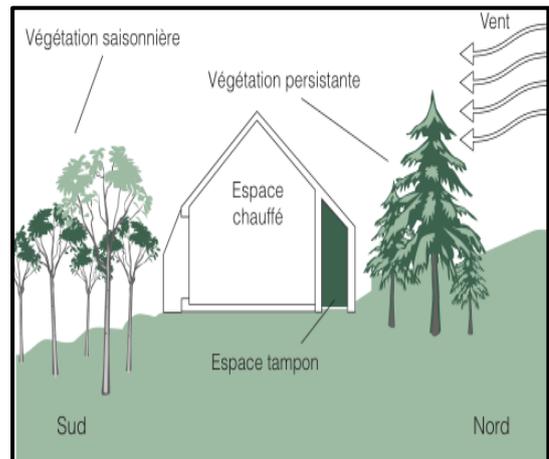


Figure II.5 : protection solaire par végétation

Source : Brigitte vu. Extrait « Guide de l'habitat passif »

En ville, les bâtiments voisins constituent un masque important au rayonnement solaire. Le relief peut aussi devenir un élément essentiel de l'accessibilité du rayonnement solaire sur un bâtiment. En effet, si un bâtiment se trouve sur un terrain en pente, exposé au nord, celui-ci risque de ne jamais recevoir de rayonnement solaire en hiver.

II.2.2. Le mur capteur

Le mur capteur est également appelé *mur trombe* d'après les premiers travaux réalisés par le professeur *Félix Trombe*, en 1956, au centre national de la recherche scientifique.

Il s'agit d'un mur en maçonnerie lourde placé quelques centimètres derrière un vitrage performant, qui limite une lame d'air. Cette dernière peut être : soit non ventilée, soit ventilée sur l'intérieur. Ce type de mur, provoque un inconfort en certaines périodes et présente des pertes thermiques importantes, un mur trombe avec une couche isolante du côté intérieur qui limite une lame d'air ventilée par thermosiphon a été également conçue.

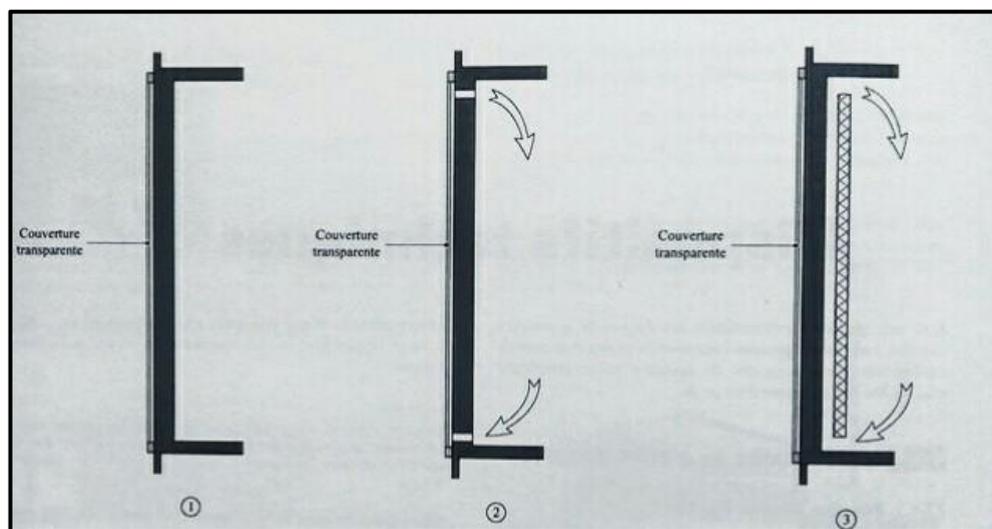


Figure II.6 : Types de murs trombe

.Source : Pierre Fernandez, & Pierre Lavigne, « Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes »

Les murs capteurs captent l'énergie solaire, l'accablent dans leur masse, l'amortissent et la restituent sous forme de chaleur à l'ambiance intérieure après un déphasage de plusieurs heures.

Les murs capteurs sont constitués d'une masse thermique importante, permettant l'accumulation de la chaleur, couplée à un vitrage exposé au soleil et permettant de diminuer les pertes par convection. L'énergie solaire, transmise par le vitrage et absorbée par le mur, chauffe la surface externe du mur capteur ; puis la chaleur migre vers l'intérieur par conduction dans la masse du mur. La chaleur ne parvient à la surface interne qu'après un certain temps de déphasage et avec un certain amortissement. Ce déphasage dépend de l'épaisseur du mur et de la nature des matériaux.

Un déphasage d'environ 6 à 8 heures permet de bénéficier de l'échauffement maximum, en face intérieur, au de la nuit²⁶.

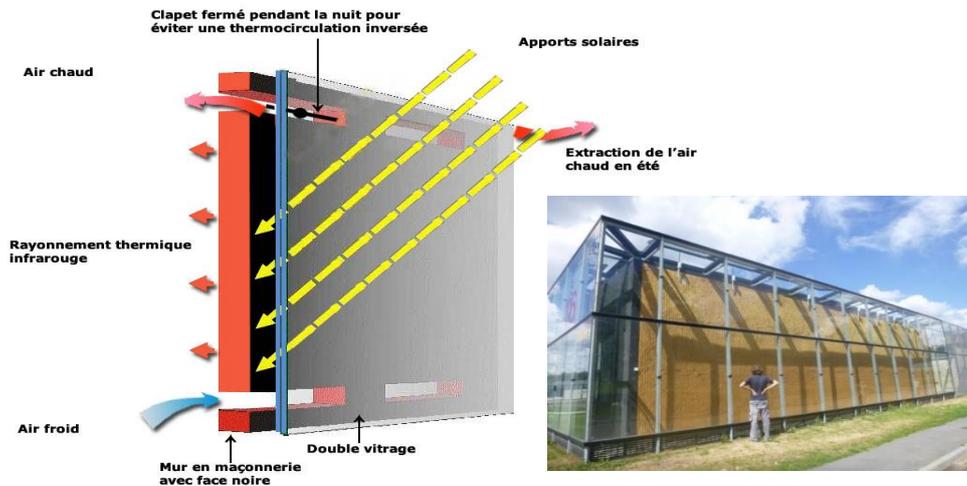


Figure II.7 : schéma d'un mur Trombe

Source : <https://www.picbleu.fr>

La performance des murs capteurs est liée à la latitude du lieu, au site, à l'orientation et à l'inclinaison du mur : la meilleure orientation est toujours le sud ; la meilleure inclinaison tend vers la verticale plus la latitude augmente ; le site doit être exempt d'effet de masquage significatif. Le rendement des murs capteurs dépendra également de la nature des vitrages et des absorbeurs utilisés.

II.2.3. Les serre solaires

Elles jouent plusieurs rôles : systèmes de rafraîchissement en été, espaces tampons et captage solaire en hiver. Espaces tampons essentiellement transparents et voulus traversés par le rayonnement solaire, en profitant de l'effet qui porte leur nom les serres ont un rôle thermique certain. Toutefois, ce dernier ne justifie pas seul le parti des serres qui constituent des espaces semi extérieurs à considérer comme espaces de vie à concevoir comme tels par l'architecte.

²⁶ Op.cit., p.72

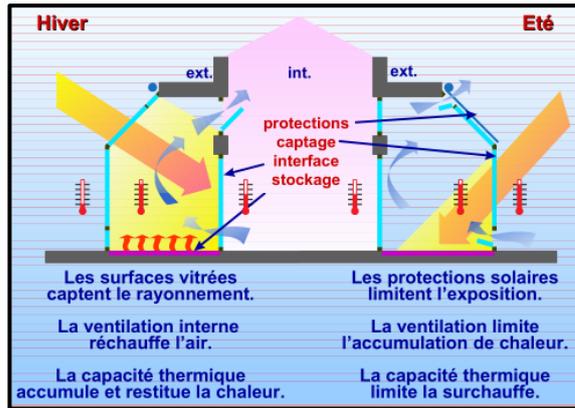


Figure II.8 : Fonctionnement d'hiver & d'été d'une serre

Source : Alain Liébard & André De Herde, « traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques »,



Figure II.9 : Maison en bois solaire

Source : <https://architecteo.com>

Le capteur solaire transforme l'énergie du soleil (gratuite et disponible) en une énergie utile produite de l'eau chaude ou de l'électricité.

Un capteur solaire ou panneau solaire est un élément d'une installation solaire destiné à recueillir l'énergie solaire pour le convertir en énergie thermique et le transférer à un fluide caloporteur (air, eau) ou en énergie électrique. Nous distinguons principalement deux types de capteurs solaires : le capteur solaire thermique et le capteur solaire photovoltaïque.

II.2.4.1. Capteurs solaires thermiques

Ils permettent la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage. On peut utiliser des capteurs plans (panneaux solaires). Les vitrages solaires thermiques ou les capteurs sous vide (composés de tubes ou de capteurs plans dans lesquels le vide est fait), recommandés pour obtenir des températures très élevées, sont peu esthétiques, donc à éviter.

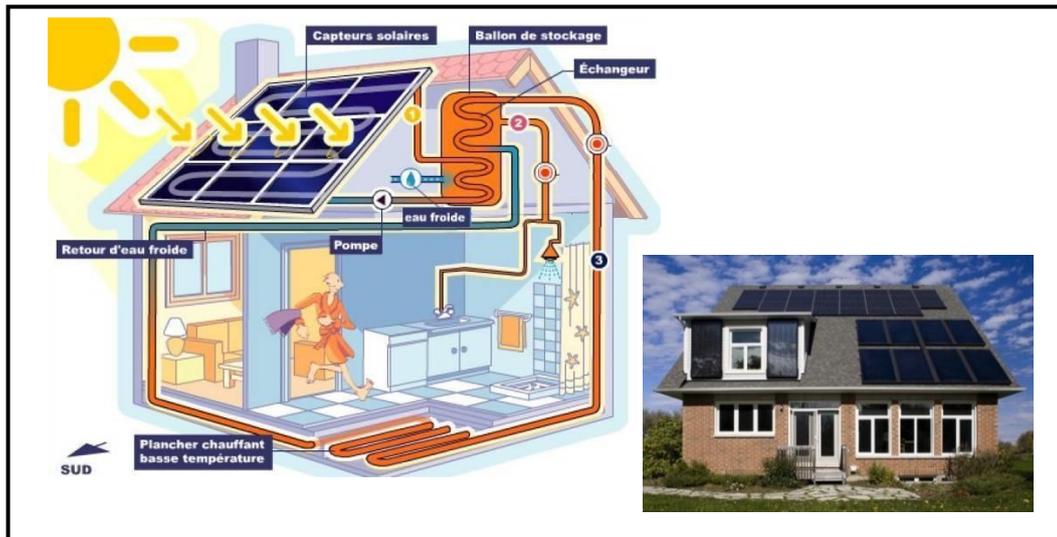


Figure II.10 : schéma de principe d'un capteur solaire thermique.

Source : <http://solclim.com>

II.2.4.2. Panneaux photovoltaïques

Ils permettent la production d'électricité pour l'éclairage et les appareils électroménagers. Ils sont déconseillés pour le chauffage électrique trop gourmand en énergie par rapport à ce que les capteurs peuvent produire.

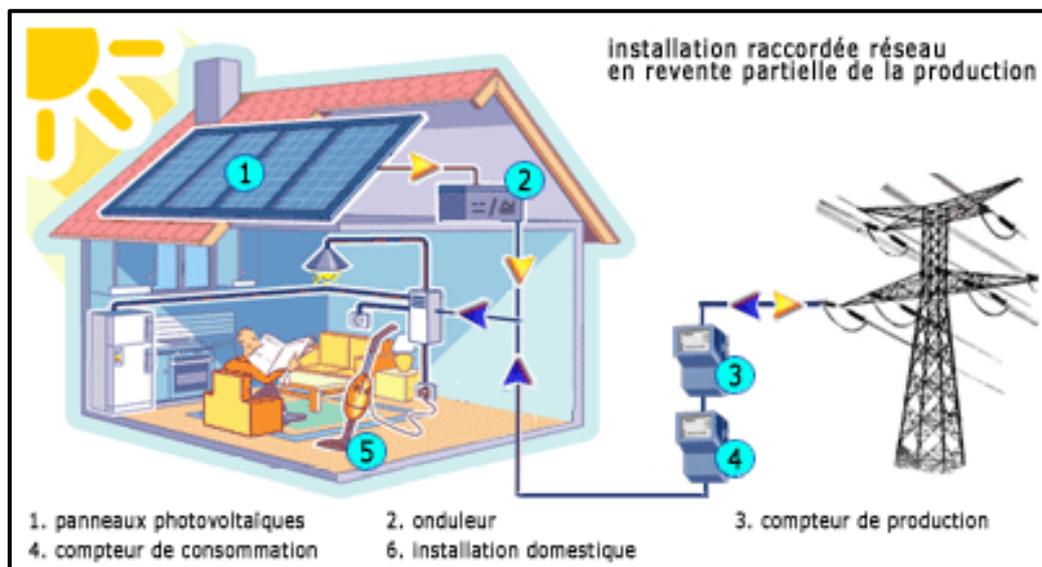


Figure II.11 : schéma de principe d'un panneau photovoltaïque

Source : http://www.sigma-tec.fr/textes/texte_raccordements.html

II.2.5. La végétation et de l'eau

II.2.5.1. La végétation :

La végétation joue un rôle protecteur sur les constructions environnantes. Haies et rangées d'arbres protègent le bâtiment du vent et de l'excès d'ensoleillement en été. Si les espèces sont à feuilles caduques, l'ombrage qu'elles offriront en été se réduira en hiver pour laisser entrer les rayons du soleil. A cet égard, il est préférable de choisir une espèce à large feuille, faisant peu de bois, pour maximiser l'ombrage en été et minimiser le blocage du soleil en hiver.

La végétation grimpante contribue également à réduire les pertes par convection au droit de l'enveloppe du bâtiment et améliore son comportement énergétique. La vapeur d'eau émise par évapotranspiration des feuillages permet de rafraîchir l'air ambiant.

Par ailleurs, la végétation filtre la lumière naturelle. En effet, la lumière diffuse assurée par une couverture végétale atténue les effets de réverbérations ou d'éblouissement dus à la présence d'ombre et de soleil²⁷.

La végétation est utilisée sous forme des dispositifs architecturaux comme une réponse des soucis climatiques, dont les plus utilisés sont : Les toitures végétalisées, les murs végétaux, La pergola.



Figure II.12 : mur végétal du jardin suspendu du quai Branly

Source : <https://dpr974.wordpress.com>



Figure II.13 : Toit végétalisé à Steinhausen en Styrie (Autriche).

Source : <https://bionique.artbite.fr>

²⁷ Op.cit., p.77

Toiture végétalisée :

Le principe de la toiture végétale (que l'on appelle aussi : toit vert ou toit végétalisé) consiste à recouvrir d'un substrat végétalisé un toit plat ou à faible pente. Son succès était alors dû à ses diverses propriétés d'isolation, d'étanchéité, de résistance au feu et au vent, le tout avec des matériaux facilement disponibles localement²⁸.

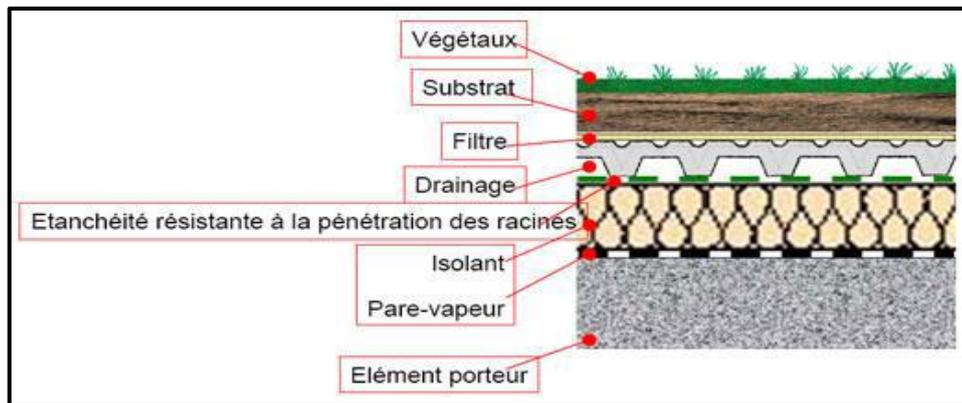


Figure II.14 : les composants d'une toiture végétalisée

Source : toiture-vegetalisee.architecteo.com.

➤ Le mur végétal :

On distingue deux types : les murs végétaux traditionnels et les murs végétaux contemporains.

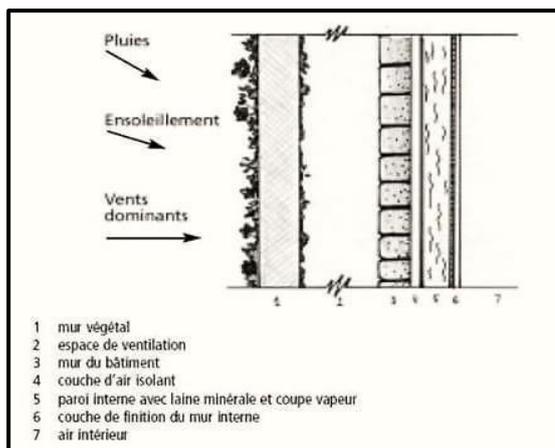


Figure II.15 : Coupe d'un mur végétal

Source : <https://www.pinterest.com>



Figure II.16 : Mur végétal

Source : www.vegitalid.fr

²⁸ Publication du Conseil de l'enveloppe du bâtiment du Québec (CEBQ).
<http://www.cebq.org/documents/Lignesdirectricesdeconceptiondetoisverts.pdf>

II.2.5.2. L'eau

L'utilisation de plans d'eau permet de créer des microclimats et d'atténuer les variations journalières de température. Différents systèmes d'aspersion permettent également de rafraîchir l'air ambiant.

L'eau trouve dans l'air ambiant la chaleur nécessaire pour passer de l'état liquide à l'état de vapeur ; la température de l'air se voit ainsi réduite et l'humidité relative de l'air augmente. Pour maximiser cet effet, il convient d'augmenter la surface de contact air/eau (plans d'eau, etc.). De nombreuses réalisations dans les climats chauds et secs utilisent l'eau pour rafraîchir les ambiances.

Par ailleurs, l'eau a souvent été utilisée pour ses capacités de stockage de la chaleur (murs de bidons, etc.) et a inspiré des systèmes constructifs complexes, tels que le « roof pond » ou des réservoirs d'eau, constituant la dalle de toiture, permettant d'atténuer la variation des températures²⁹.



Figure II.17 : Jardins suspendus de Babylone, Maerten van Heemskerck

Source : www.ruchewarre.net

²⁹ Alain Liébard & André De Herde, « *traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* », le moniteur 2005, p.77

II.3. Dispositifs hygroscopiques

II.3.1. La ventilation :

La Ventilation est considérée comme un élément clé d'une architecture climatique. Elle permet de renouveler l'air et d'évacuer l'air vicié. Ayant pour rôle principale de rafraichir l'ambiance en baissant la température.

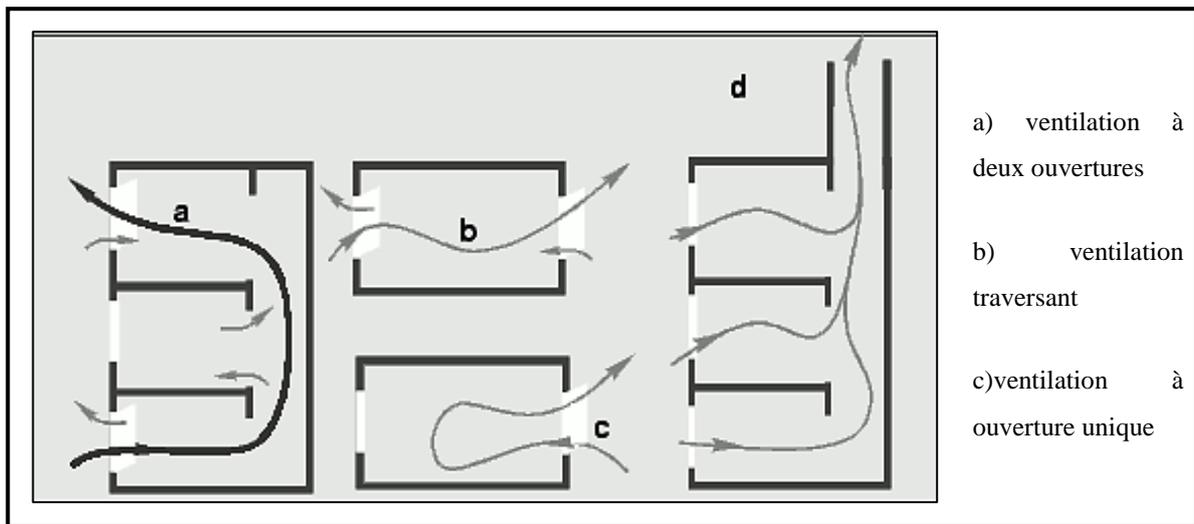


Figure II.18 : configurations de ventilation naturelle.

Source : <http://old.ader.ch/energieaufutur/efficacite/batiments.php>

Assurer une ventilation nocturne dans un bâtiment permet de rafraichir la construction et d'éviter les surchauffes en journée. Un rafraichissement plus important du bâtiment par de bons débits de renouvellement d'air est favorisé par l'exposition des façades. On peut y parvenir en assurant une ventilation traversante.

Cependant, la possibilité d'assurer une ventilation nocturne est aussi liée à l'environnement urbain. Si le bâtiment se situe en zone bruyante ou si un risque d'effraction existe, il n'est pas possible d'ouvrir les fenêtres sans pénaliser le confort acoustique ou la sécurité. La circulation d'air, dans ce cas, peut être activée par la disposition des ouvertures et leur grandeur. En principe les ouvertures doivent se trouver en face l'une de l'autre et celle par où l'air pénètre doit être plus petite que celle de sortie. Ce mécanisme est cependant conditionné par l'organisation interne du bâtiment qui doit permettre la libre circulation de l'air³⁰.

³⁰ Naima Hassas.ép.KHalef, « étude du patrimoine architecturale de la période ottomane : entre valeurs et confort », mémoire de magistère, université de Tizi-Ouzou, 2012.

II.3.2. Le puits canadien :

Le puits canadien est un système économique et écologique qui consiste à ventiler, chauffer ou refroidir un bâtiment via un échangeur géothermique air-sol. Le puits canadien exploite à la fois l'air frais provenant de l'extérieur et la température du sol. Composé de :

- ✚ Entrée d'air neuf ou une borne de prise d'air extérieur,
- ✚ Conduites ou gaines enterrées,
- ✚ Système d'évacuation des condensats (regard ou siphon),
- ✚ Ventilateur et système de régulation du puits et accessoires nécessaires au raccordement .

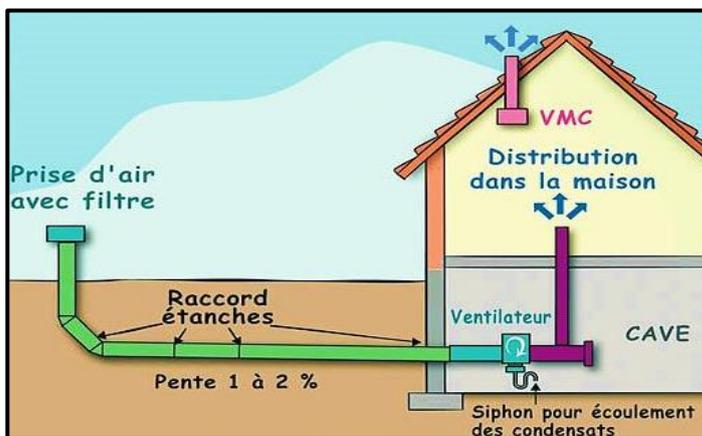


Figure II.19 : principe de fonctionnement d'un puits canadien

Source : <http://www.terrevivante.org>



Figure II.20 : Puits canadien

Source : <http://www.genersys-services.com>

L'air destiné à la ventilation des locaux passe dans un conduit enterré où la température du sol est beaucoup plus stable que celle de l'air extérieur, il est ensuite insufflé dans le bâtiment. Par ce système, l'air est préchauffé en hiver et prérafraîchi en été.

II.3.3. Les tours à vent

La tour à vent telle que son nom l'indique, est un outil de ventilation utilisé pour obtenir un refroidissement naturel.



Figure II.21 : Les tours à vent de Yazd, Iran

Source : <http://openbuildings.com>



Figure II.22 : Les tours à vent de Masdar city, Dubaï

Source : <http://openbuildings.com>

Les tours à vent sont des dispositifs destinés à capter les vents en hauteur afin de les diriger vers l'intérieur du logement à ventiler. Le capteur fonctionne par la différence de température entre le vent et l'air ambiant intérieur. Le vent, plus frais, moins poussiéreux et moins humide, de par la hauteur à laquelle il est capté, pénètre par le capteur pour descendre au rez-de-chaussée de l'habitation. L'air neuf ainsi introduit chasse l'air intérieur plus chaud et plus vicié. Si, par contre, l'air ambiant est plus frais que le vent en hauteur, une pression empêche la pénétration du vent dans le capteur. Il est préférable de prévoir, pour les saisons froides, des dispositifs qui permettent d'obstruer les bouches³¹.

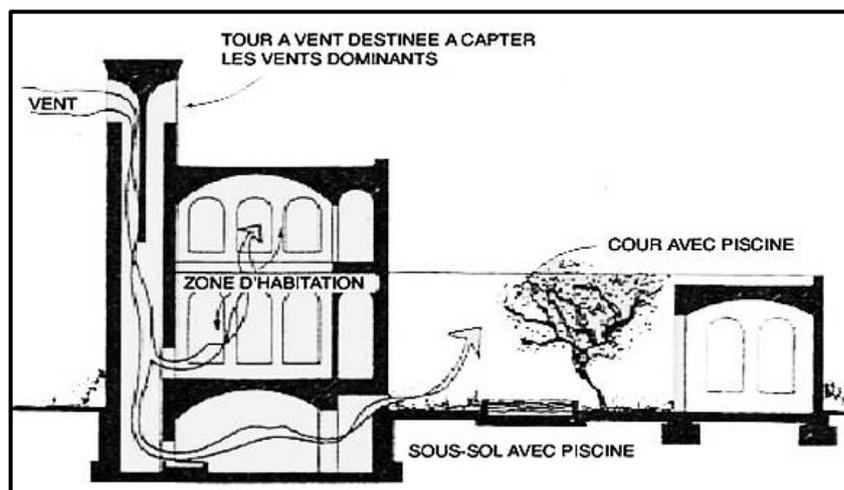


Figure II.23 : configuration des tours à vent

Source : <https://www.detailsdarchitecture.com>

³¹Sabrina KHALDI, « étude numérique de la ventilation naturelle par la cheminée solaire », mémoire de magistère, université de Tlemcen, 2013.

II.3.4. Façade intelligente (active)

« Une façade intelligente est un produit complexe qui s'auto-adapte par ses composants (actif ou passif) aux changements produits par son environnement ou à l'intérieur de la construction. »³²

Une façade "intelligente" est une façade, capable grâce à ses équipements dynamiques et éléments préfabriqués de s'adapter aux besoins de confort des occupants et d'anticiper les besoins énergétiques du bâtiment. elle n'est pas un modèle mais plutôt des types, dont on cite :

II.3.4.1. Façade double peau

Une façade à double peau d'un bâtiment se compose d'une paroi intérieure et l'autre externe, elle fournit au bâtiment l'isolation thermique. Elle a une fonction de régulation thermique du bâtiment.

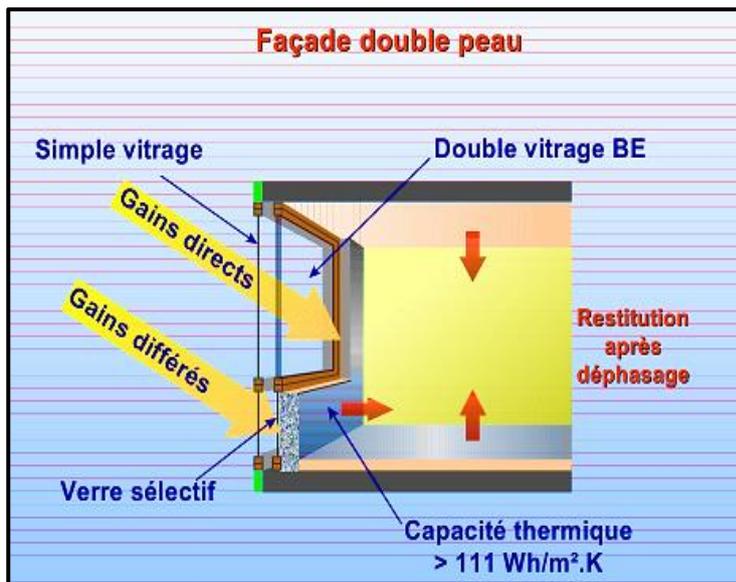


Figure II.24 : éléments d'une façade double peau

Source : Alain Liébard & André De Herde « traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques »,



Figure II.25 : La double peau de l'Office fédéral de la statistique à Neuchâtel

Source : <https://actu.epfl.ch>

La façade à double peau protège le bâtiment aux contraintes météorologiques par rapport aux rayonnements directs du soleil, elle évite les surchauffes d'été et limite le recours à la climatisation. En évitant l'action directe du vent, elle supprime l'effet de paroi froide en hiver, qui

³² Eleanor Lee et Al, « High-performance commercial building façades » 2002,

produit l'inconfort d'intérieur. Elle permet aussi d'apporter une température et une humidité de l'air agréable. En comparant avec la façade glacée traditionnelle. Elle peut également être employée pour la ventilation naturelle du bâtiment³³.

II.3.4.2. Façade ventilée

Les façades « double peau », aussi appelées « Double Façade Ventilées », sont composées de deux façades parallèles généralement vitrées et séparées par une cavité de quelques centimètres à plusieurs mètres dans certains cas.

Les doubles façades ventilées peuvent être classées selon trois principaux critères : le type de ventilation, le compartimentage de la cavité et le mode de ventilation.

➤ Les trois types de ventilation :

- ✚ La ventilation naturelle : la circulation de l'air au sein de la paroi est réalisée grâce au phénomène de tirage thermique. L'effet de serre au sein de la façade crée une différence de température entre l'extérieur et la cavité ou bien entre l'intérieur du bâtiment et la cavité.
- ✚ La ventilation mécanique : la circulation d'air est créée artificiellement par des extracteurs d'air.
- ✚ La ventilation hybride : Il s'agit de l'association des deux premiers types de ventilation. C'est la solution la plus utilisée en pratique, la ventilation mécanique venant en appoint de la ventilation naturelle lorsque celle-ci ne permet pas une circulation d'air suffisante.

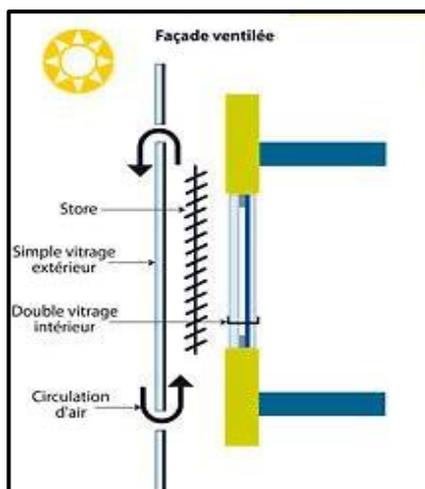


Figure II.26 : façade ventilée

Source : <http://fr.saint-gobain-glass.com>

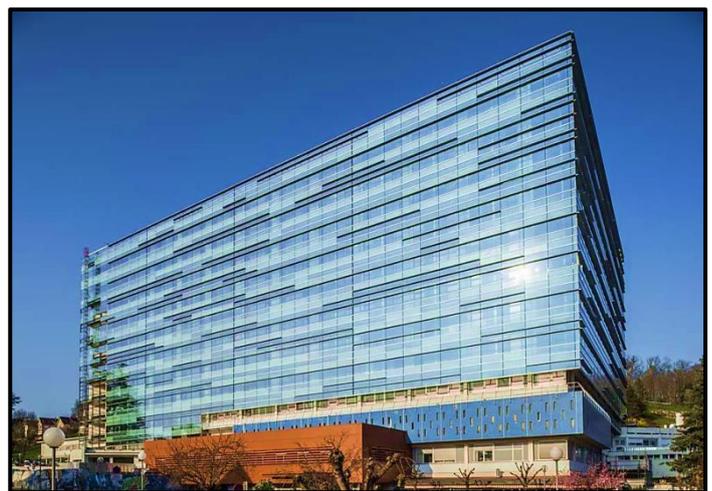


Figure II.27 : façade double peau ventilée pour le centre hospitalier de Brive-la- Gaillarde

Source : <http://www.lemoniteur.fr>

³³ Sabrina KHALDI, « étude numérique de la ventilation naturelle par la cheminée solaire », mémoire de magistère, université de Tlemcen, 2013.

I.3.4.3. Façade active lucido

Cette façade est une façade solaire, qui se compose d'un verre solaire, un élément absorbant en bois et un mur isolant. La façade utilise l'énergie solaire, gagnée par le système et stockée dans celle-ci, comme force isolante naturelle³⁴.



Figure II.28 : Immeuble de bureau « morija » valais, Suisse

Source : <https://www.charpente-concept.com>

La façade solaire à lamelle en bois est un principe utilisable pour tous types de construction et de rénovation. Ce type de façade est capable de produire, avec l'énergie solaire, plus d'énergie qu'elle n'en a besoin. De ce fait, le bilan énergétique d'une construction avec une façade en principe solaire est excellent ; celle-ci utilise de 50% à 100% moins d'énergie qu'une façade conventionnelle ce qui rend le bâtiment écologiquement intéressant.

II.3.4.4. Une façade intelligente grâce à des brise-soleil automatisés

Une façade « intelligente », capable grâce à ses équipements dynamiques de s'adapter aux besoins de confort des occupants et d'anticiper les besoins énergétiques du bâtiment est sans doute un des défis à relever pour réaliser de l'habitat bioclimatique.

Ce système est élaboré par Jean-Louis Caumont (en 2009 dans un article de presse aux éditions de moniteur). Le système est composée d'une double peau ; à l'extérieur une menuiserie vitrée simple vitrage, ou un mur rideau simple vitrage, et à l'intérieur, placé à 42 cm, le composant de façade dynamique solaire, qui se présente sous la forme d'un brise soleil à lames isolantes

³⁴ <https://www.charpente-concept.com/fr/ecoconstruction/la-facade-active-lucido>, consulté le 28/09/2017

thermiques de 9 cm d'épaisseur, équipées d'un traitement particulier et différent sur chacune des faces. Le système s'oriente automatiquement selon l'angle du soleil. Fermé, il forme une paroi opaque, véritable manteau isolant thermique protecteur, identique à un mur très bien isolé et atteint un coefficient de transmission thermique U de 0,35 W/m².K. Ouvert, le procédé constitue une surface vitrée transparente à la lumière et au rayonnement solaire et affiche suivant certains effets, un facteur solaire SW de 0,8, traduisant sa capacité à transmettre la chaleur solaire à l'intérieur de l'habitation³⁵.



Figure II.29 : façade intelligente grâce à des brise-soleil automatisés

Source : <http://www.lemoniteur.fr>

Conclusion

Ce deuxième chapitre nous montre les alternatives et les dispositifs à utiliser pour avoir un bâtiment bioclimatique moins énergivore. Une construction bioclimatique est une construction qui profite des ressources et du climat. Bien orientée, abritée des vents dominants, respectant les structure en place (topographie, végétation, écoulement des eaux...etc.), qui n'est pas forcément construite avec des matériaux naturels, des équipements ou décorée avec des matériaux non polluants, mais plutôt une construction qui utilise à la fois des méthodes passifs (conception architecturale intégrée) et des méthodes actives (technologie intégrée) et qui va profiter, par sa disposition, l'agencement de ses fenêtres ou son isolation, des apports extérieurs offerts par l'environnement.

³⁵ <http://www.lemoniteur.fr/article/une-facade-intelligente-grace-a-des-brise-soleil-automatisees-1027059> consulté le 28/09/2017.

Chapitre III

La façade à double peau

«Une façade intelligente est un produit complexe qui s'auto-adapte par ses composants (actif ou passif) aux changements produits par son environnement ou à l'intérieur de la construction ».

Eleanor Lee.

On exige toujours plus des façades qui, outre leur rôle de protection passive contre la pluie, la chaleur et le froid, deviennent à présent actives en réagissant à leur environnement et en jouant en quelque sorte le rôle d'une peau où siègent des échanges entre l'intérieur et l'extérieur. Il en va ainsi des façades dites "climatiques", "double peau" ou "interactives", qui ont pour fonction d'améliorer le climat intérieur d'un bâtiment par des techniques actives et/ou passives.

A travers ce chapitre on présente une façade active dite : façade double peau FDP (ses composants, principe de fonctionnement, types...etc.), qui constitue un dispositif hygrothermique important pour les constructions bioclimatiques.

III.1. Façade à double peau ?

III.1.1. Définition

Une façade double à peau (FDP) peut être définie comme une façade simple traditionnelle doublée à l'extérieur par une façade essentiellement vitrée. L'objectif d'une telle façade est multiple, soit comme cité ci-dessus : diminuer les déperditions thermiques, créer une isolation phonique. Mais la principale utilisation est en général l'utilisation de l'effet de serre générée par la façade vitrée pour réchauffer les pièces et créer une ventilation naturelle du bâtiment.

Une façade double peau est assimilable aux espaces tampons habituellement utilisés dans la conception bioclimatique. Ces espaces, comme leur nom l'indique, ont pour objet de venir « absorber » les variations du climat pour réguler la température intérieure des espaces. Ils permettent ainsi au bâtiment d'économiser de l'énergie, soit parce qu'ils protègent du froid et du vent, soit parce qu'ils stockent de la chaleur comme les serres solaires passives³⁶.

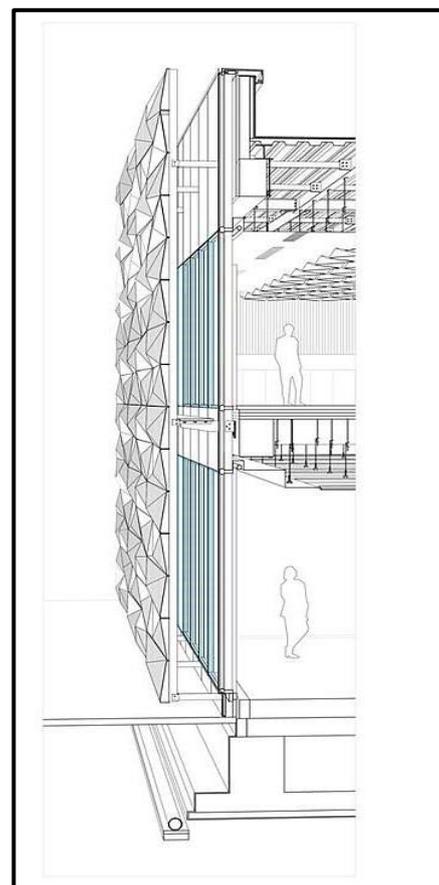


Figure III.1 : Exemple façade à double peau

Source : <https://www.pinterest.com>

³⁶ Jean-Baptiste Aubert, « *Projet de fin d'Etude : Restructuration de la Tour ESCA, Intervention sur le lot façade en phase de Conception – Préparation – Construction* » INSA de Strasbourg, p.10

III.1.2. Le rôle d'une FDP

La façade double peau a pour fonction la régulation thermique du bâtiment. Elle le protège des contraintes météorologiques. Par rapport aux rayonnements directs du soleil, elle évite les surchauffes en été et limite le recours à la climatisation. En évitant l'action directe du vent, elle supprime l'effet de paroi froide en hiver, qui produit un inconfort intérieur. Elle permet aussi d'apporter une température et une humidité de l'air agréable.

Cette double façade peut être assimilée à un écran protecteur, une enveloppe autour du bâtiment. De la même manière que nous portons un vêtement adapté au climat qui nous environne, la double peau de la façade peut elle aussi se moduler suivant les changements extérieurs en jouant sur l'inclinaison des pare-soleil, le choix des vitrages suivant l'orientation des façades.

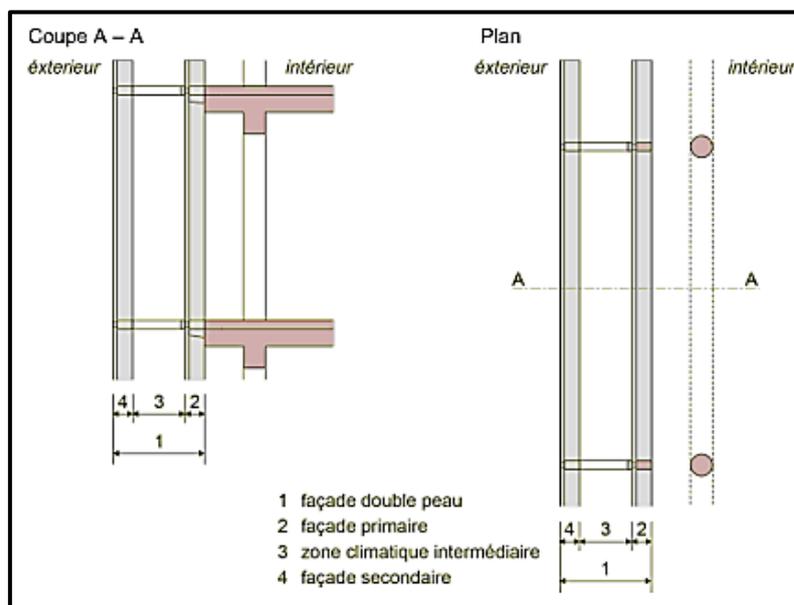


Figure III.2 : Schéma d'une double peau

Source : Jean-Charles CROIX et Charles BASSIL, *Gestion et performances des façades actives de type « double peau »*

III.2. Historique

Le premier exemple de façade rideau en double peau apparaît en 1903 à l'usine Steiff à Giengen en Allemagne. Ce projet donnait la priorité à l'éclairage naturel en prenant en compte le climat froid et les vents forts de la région. La solution adoptée était une structure de trois niveaux

avec un rez-de-chaussée pour un espace de stockage et deux niveaux consacrés aux espaces de travail³⁷.

Devant le succès rencontré, deux ajouts ont été construits en 1904 et 1908 suivant le même principe mais avec des structures en bois au lieu de l'acier pour des raisons budgétaires. Ces bâtiments sont encore en service de nos jours.



Figure III.3 : Usine Steiff à Giengen, Allemagne

Source : <http://facadesconfidential.blogspot.com>



Figure III.4 : Extension d'usine Steiff à Giengen, Allemagne

Source : <http://facadesconfidential.blogspot.com>

En 1903, Otto Wagner gagna le concours pour le bâtiment Postal Savings Bank situé à Vienne en Autriche. Le bâtiment construit en deux phases de 1904 à 1912, est conçu avec une peau en partie zénithale pour le hall central.



Figure III.5 : Postal savigns bank, Autriche

Source : <https://www.architecturaldigest.com>

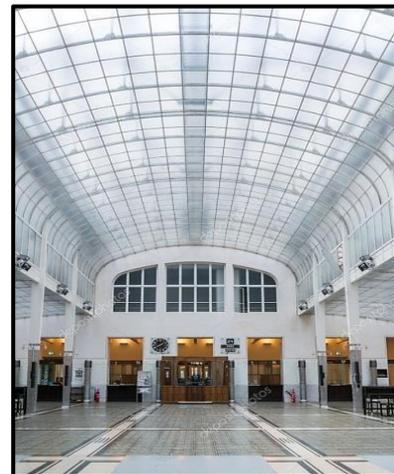


Figure III.6 : Hall central de la banque, Autriche

Source : <https://fr.depositphotos.com>

³⁷ Harris Poirazis, "Double Skin Façades for Office Buildings" Lund University, Scandinavia 2004, P.19



Figure III.7 : Bâtiment Narkomfin Russie

Source : <https://www.pinterest.com>



Figure III.8 : Bâtiment Centorsoyus Russie

Source : <https://www.pinterest.com>

Entre 1920 et 1930 le concept des doubles peaux fut développé avec d'autres priorités. Deux cas peuvent être clairement identifiés. L'un en Russie où Moisei Ginzburg expérimenta le concept pour les logements sociaux du bâtiment Narkomfin (1929), l'autre par Le Corbusier pour la conception du Centorsoyus également à Moscou



Figure III.9 : Cité de Refuge, Paris, France

Source : <http://www.fondationlecorbusier.fr>



Figure III.10 : l'Immeuble Clarté, suisse

Source : <https://www.espazium.ch>

Peu ou pas d'avancée sur ce type de façade vitrée n'a été constaté jusqu'à la fin des années 70 et le début de la décennie 1980. Ensuite la plupart de ces façades sont conçues dans le cadre de l'approche environnementale comme les bureaux de Leslie et Godwin. Dans d'autres cas l'aspect esthétique a été l'argument principal retenu pour la conception architecturale.

Au cours de la décennie des années 1990, deux facteurs influencèrent fortement le développement des doubles peaux : les préoccupations environnementales associées aux aspects techniques et l'influence technique ce qui rend les bâtiments verts une bonne image de l'architecture corporelle.

III.3. Composants de la façade à double-peau

III.3.1. Peau intérieure & peau extérieure

La peau intérieure est la couche de verre marquant la frontière entre l'environnement habitable et le canal. Elle doit être bien isolante car l'air du canal n'est pas forcément des plus confortables. En général, il s'agit d'un double vitrage.

La peau extérieure est donc l'autre couche, c'est-à-dire entre le canal et l'extérieur. Son but n'est pas de déployer une grande isolation, mais bien de délimiter un canal. Elle représente quand même un premier obstacle au vent, au son, aux rayons du soleil et à la chaleur. Elle est donc constituée d'un verre simple. Il peut arriver qu'elle soit porteuse de protections solaires, sur sa surface extérieure. Ceci reste une généralité, l'emplacement du double vitrage peut être en peau extérieure dans le cas d'une façade étanche intérieure par exemple³⁸.

III.3.2. Canal

Le canal est l'espace délimité entre les deux couches de verre. Il s'agit du cœur de la façade. Il est généralement ventilé à l'aide d'un système mécanique ou naturelle. Egalement, une ventilation hybride ou mixte est souvent utilisée pour le cas des grands bâtiments. Un compromis entre "économie d'énergie" et "confort des individus" est l'intérêt majeur de cette ventilation³⁹.

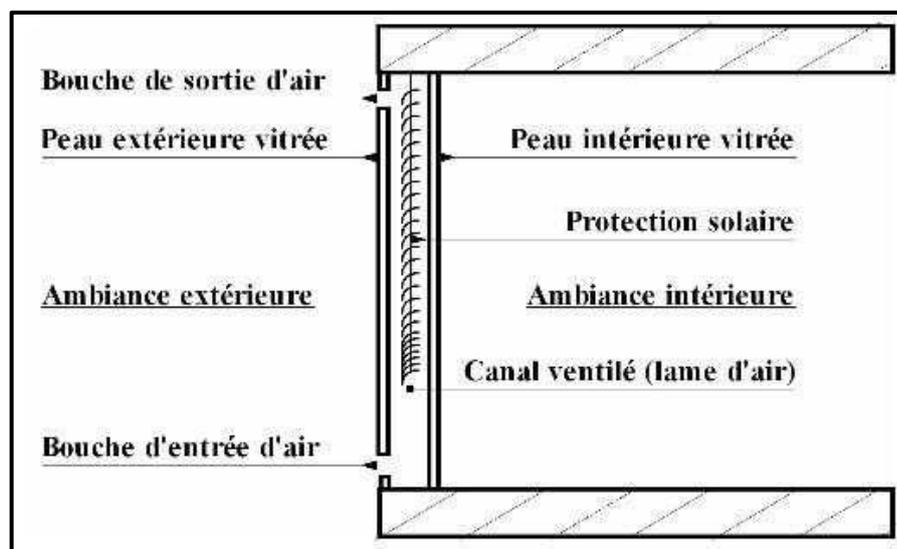


Figure III.11 : Composants d'une double peau

³⁸ Karima Haddouche, « *l'apport de l'élément préfabriqué dans la façade intelligente* », mémoire de magistère, centre universitaire de Souk Ahras, 2012.

³⁹ Nassim SAFER « *Typologie des façades de type double-peau* » Thèse en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2006, p.29

III.3.2.1. Espacement du canal

Il est possible de classer les "façades de type double-peau" en fonction de l'épaisseur du canal. Trois catégories peuvent être proposées :

- ✚ De 5cm à 50cm : ce sont les canaux les plus utilisés. Ils ne permettent pas cependant, un accès humain au canal.
- ✚ De 50cm à 200cm : à partir De ces dimensions, le canal devient accessible pour la maintenance, le nettoyage, ou toute autre activité nécessitant de pénétrer dans le canal. Cet accès est un critère important dans l'élaboration d'habitations.
- ✚ Plus de 200cm : L'accès est aisé, mais cela reste surtout utilisé pour les grands atriums et espaces intérieurs⁴⁰.



Figure III.12 : Canal accessible
Source : <https://www.pinterest.com>



Figure III.13 : Exemple d'atrium
Source : <https://www.pinterest.com>

III.3.2.2. Type du canal

Le type du canal est important pour le bon fonctionnement des FDP puisque son impact sur le comportement thermo-aéraulique est important. Le choix du canal influence notamment la sensation de confort thermique à l'intérieur des locaux. Enfin, ce choix doit tenir compte de la sécurité incendie.

Il existe trois grandes catégories distinctes basées sur un fractionnement horizontal et/ou vertical du canal de la façade⁴¹ :

⁴⁰ Op.cit., p.32

⁴¹ Idem, p.33

- ✚ la première catégorie comprend les canaux fractionnés horizontalement. Dans ce cas, la "façade de type double-peau" s'étend seulement sur un seul niveau (étage). Ce type de canal est très répandu dans les bâtiments de très grande hauteur. En effet, un canal qui s'étend sur plusieurs étages (non fractionné) nuit au confort thermique puisque la température de l'air augmente d'étage en étage.
- ✚ la deuxième catégorie comprend les canaux non fractionnés horizontalement. Dans ce cas, la "façade de type double-peau" est continue sur plusieurs étages. Ce type de canal est très utilisé dans le cas des bâtiments moyens (de 3 à 5 étages). Pour des bâtiments plus grands (dépassants les 5 étages), il serait plus intéressant de fractionner la façade en plusieurs parties qui s'étendront sur 2 à 3 étages.
- ✚ la dernière catégorie comprend les canaux fractionnés horizontalement et verticalement. Ce type ressemble plus à des fenêtres double-peau. Leur gestion est plutôt individualisée et permet de prendre en compte le confort individuel et la sensation personnelle des occupants.

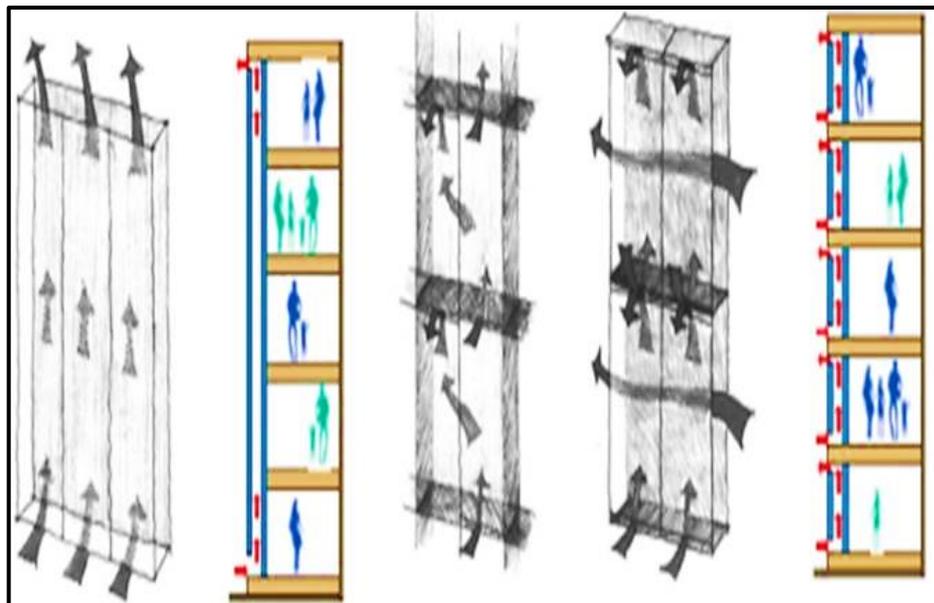


Figure III.14 : types des FDP selon le fractionnement du canal

Source: Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 1, January 2016

III.3.3. Vitrage

Le type du vitrage intérieur et du vitrage extérieur sont généralement différents. Cette différence est due essentiellement au type de ventilation.

La position du double vitrage dépend essentiellement du type de ventilation. Etant donné que le double vitrage est meilleur isolant thermique que le simple vitrage, sa position influe d'une

manière considérable sur le bilan thermique de la zone considérée (le coefficient de transmission d'un simple vitrage de 6 mm est de 5,7 W/m².K contre 2,5 W/m².K pour le double vitrage). Le coefficient du double vitrage pourrait être plus faible à l'aide de traitement spécifique (le coefficient d'un double vitrage Traité à l'argon est de 1,3 W/m².K).

En ce qui concerne la ventilation extérieure, le double vitrage au côté intérieur. Cette position contribue à mieux séparer l'espace extérieur de l'espace intérieur. En été, cela permet de diminuer la propagation de la chaleur emmagasinée par la protection solaire et l'effet de serre engendré dans cet espace confiné à l'intérieur des locaux. De la même manière et pour les mêmes raisons, le double vitrage est placé du côté extérieur pour la ventilation intérieure.

En hiver, la chaleur engendrée par l'effet de serre et celle absorbée par les protections solaires contribuent au préchauffage des locaux et le double vitrage isole le local vis à vis de l'ambiance extérieure⁴².

III.4. Mode de fonctionnement d'une FDP

Le mode de fonctionnement de la FDP doit s'adapter aux conditions climatiques :

- ✚ Hiver : La façade double peau étant fermée, le rayonnement solaire est exploité pour réchauffer l'air intérieur et emmagasiner un maximum de chaleur solaire. Une fonction automatique d'ouverture partielle des ouvrants permet de limiter la température excessive dans la double peau, en introduisant ponctuellement de l'air extérieur, si nécessaire.
- ✚ Été : La prévention de la surchauffe de l'air intérieur s'effectue en ventilant naturellement l'air contenu dans la façade double peau, avec une ouverture automatisée des ouvrants de façade. L'air chaud de la double peau est ainsi maintenu hors du bâtiment. Ce mode de fonctionnement n'étant pas linéaire dans le temps, et devant s'adapter automatiquement en fonction des conditions climatiques extérieures.⁴³

⁴² Op.cit., p29.

⁴³ <http://www.batiweb.com/actualites/eco-construction/gestion-automatisee-pour-la-double-peau-dun-centre-de-maintenance-27-09-2013-22976.html> consulté le 29/09/2017.

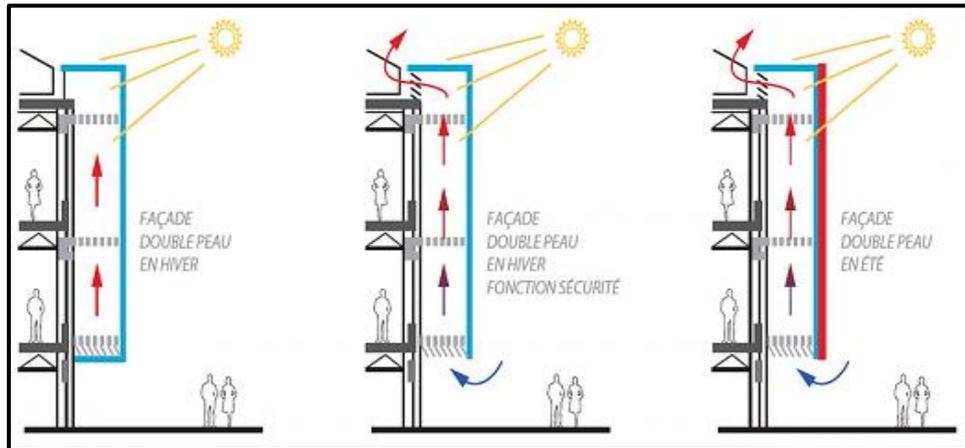


Figure III.15 : Fonctionnement hivernal et estival d'une FDP

Source : <https://www.pinterest.com>

III.5. Les échanges thermiques d'une FDP

Entre les différentes couches de verre et les lames d'air se produisent des échanges thermiques de plusieurs types. La lumière du soleil vient frapper successivement les différentes couches de verre. Au niveau de chaque interface verre-air, une partie du rayon est transmise, une partie est réfléchi et le reste est absorbé par le vitrage⁴⁴.

- ✚ **Les échanges radiatifs** : Lorsque deux verres en vis-à-vis ont des températures de surface différentes, le vitrage le plus chaud cède une partie de sa chaleur au vitrage le plus froid par rayonnement. L'importance de cet échange radiatif dépend uniquement du traitement subi par les faces des vitrages.
- ✚ **Les échanges conducto-convectifs** : Le verre peut également céder de la chaleur à lame d'air qu'il délimite afin d'éviter une surchauffe au niveau du vitrage. Accroître la distance entre les vitrages permet alors de limiter les échanges.
- ✚ **Les échanges par ventilation** : La chaleur absorbée par les verres est transmise aux lames d'air, qui ont tendance à s'échauffer. Pour limiter cet échauffement, il peut être utile de ventiler les lames d'air avec un air plus frais en été et notamment en ventilation naturelle nocturne.

⁴⁴ Karima Haddouche, « l'apport de l'élément préfabriqué dans la façade intelligente », mémoire de magistère, centre universitaire de Souk Ahras, 2012.

III.6. Protections solaires

La protection solaire remplit deux objectifs bien distincts : limiter les apports solaires d'une part et de réguler le flux lumineux d'autre part. Il existe plusieurs types de protections solaires dans l'industrie. Leur utilisation est judicieuse puisqu'une bonne position combinée à une bonne ventilation du canal peut considérablement baisser les consommations énergétiques⁴⁵.

III.6.1. Type des protections solaires

Il existe plusieurs types de protection solaire dont les plus utilisées sont :

- ✚ Stores à lamelles,
- ✚ Rideaux à bandes verticales,
- ✚ Stores à rouleau.



Figure III.16 : stores à lamelles

Source : <https://www.pinterest.com>



Figure III.17 : Rideaux à bandes verticales d'une FDP

Source : <https://www.pinterest.com>



Figure III.18 : Stores à rouleau d'une FDP

Source : <https://www.pinterest.com>

⁴⁵ Nassim SAFER « *Typologie des façades de type double-peau* » Thèse en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2006, p.31.

III.6.2. Position des protections solaires

Les protections solaires peuvent stopper 80% à 85% de l'énergie solaire incidente. De ce fait, leur choix et leur position sont importants. S'agissant de leur position, les protections solaires peuvent être placées à l'intérieur du canal, à l'extérieur des locaux (placées sur la façade) ou du côté intérieur.

III.7. Différentes techniques des FDP

III.7.1. Les façades vitrées

Ce sont les plus répandues. Le vitrage situé avant la façade du bâtiment permet de filtrer le rayonnement solaire. Elles permettent également une ventilation naturelle, une isolation thermique et phonique⁴⁶.



Figure III.19 : exemples FDP vitrées

Source : <https://www.pinterest.com>

III.7.2. Les façades métalliques

Elles se présentent généralement sous forme de lame brise-soleil ou de maille, en aluminium ou acier. La vocation première de cette façade est de diminuer l'apport solaire direct, de manière à éviter les surchauffes estivales. C'est donc une enveloppe métallique qui vient entourer, totalement ou partiellement, le bâtiment déjà existant. Cette technique est souvent appliquée dans les bâtiments tertiaires, afin de réconcilier esthétique et confort thermique. Là encore, la lame d'air présente entre l'écran et le bâtiment joue le rôle d'espace tampon, et permet une ventilation naturelle.

⁴⁶ Jean-Baptiste Aubert, « *Projet de fin d'Etude : Restructuration de la Tour ESCA, Intervention sur le lot façade en phase de Conception – Préparation – Construction* » INSA de Strasbourg, p.15

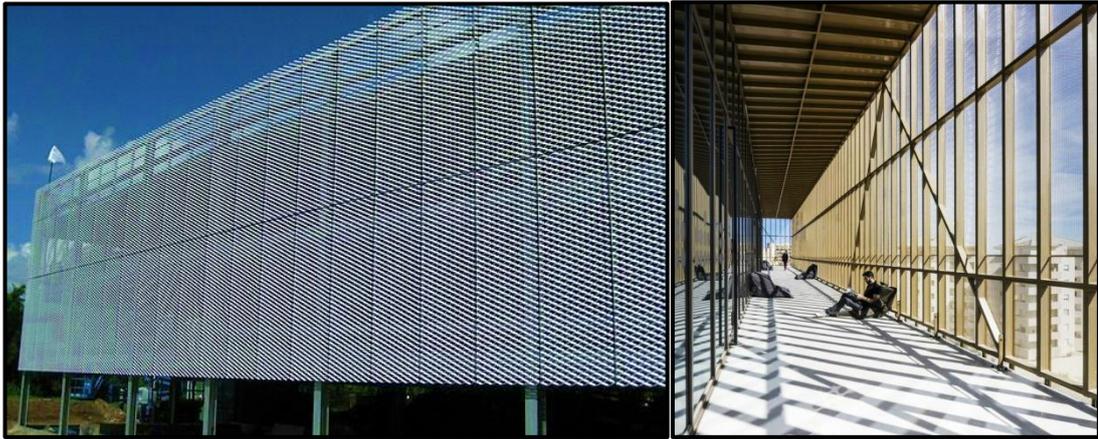


Figure III.20 : Exemples FDP métalliques

Source : <https://www.pinterest.com>

III.7.3. Les façades végétalisées

La surface de cette double peau est composée de murs végétalisés, dont les parois sont couvertes de plantes sur les deux faces. Ce système de murs végétalisés apporte un rafraîchissement de l'air en été. Grâce au principe de l'évapotranspiration, un environnement végétal augmente le taux d'humidité dans l'air, ce qui crée une atmosphère plus fraîche. Grâce à une circulation aéroulique appropriée il est ainsi possible de rafraîchir l'air ambiant du bâtiment sans avoir recours à un système de climatisation.

- ✚ En été, les plantes sont verdoyantes et favorisent deux phénomènes : d'une part, le rayonnement solaire est filtré par le rideau végétal, ce qui permet de garantir un confort thermique à l'intérieur. D'autre part, la circulation d'air frais, d'abord dans l'espace intermédiaire, puis au sein du bâtiment, permet de palier à l'utilisation d'une climatisation.
- ✚ En hiver, les feuilles caduques permettent au rayonnement solaire de pénétrer dans le bâtiment et ainsi d'apporter de la chaleur.



Figure III.21 : Exemples FDP végétalisées

Source : <https://www.pinterest.com>

III.8. Système de Ventilation des FDP

Les différents systèmes de ventilation des FDP. Ils sont en nombre de trois : 1) ventilation forcée (mécanique), 2) ventilation naturelle et 3) ventilation mixte (ce type de ventilation réunit deux types de ventilation).

III.8.1. Ventilation forcée

Dans le cas de la ventilation mécanique, le débit global traversant le canal de la FDP est commandé directement par un ventilateur. Les écoulements d'air dans le canal dépendent également des entrées et des sorties d'air (leurs dimensions et positions). La structure de ces écoulements influence le champ thermique et les échanges convectifs dans la façade. Aussi, les propriétés thermodynamiques de l'air et le profil des écoulements à l'intérieur du canal doivent être prises en compte pour éviter les problèmes de condensation au niveau des vitrages. De la même manière, les protections solaires et leur position constituent un facteur important puisqu'ils influencent d'une manière sensible les mouvements d'air à l'intérieur du canal.⁴⁷

III.8.2. Ventilation naturelle

Quel que soit le type de la FDP, son fonctionnement en ventilation naturelle repose sur le même principe : l'effet de cheminée (tirage thermique). L'air frais à l'entrée de forte densité est en contact avec l'air chaud de faible densité, cette différence de densité crée un mouvement d'air à l'intérieur du canal de la FDP.

⁴⁷ Nassim SAFER « *Typologie des façades de type double-peau* » Thèse en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2006, p.34.

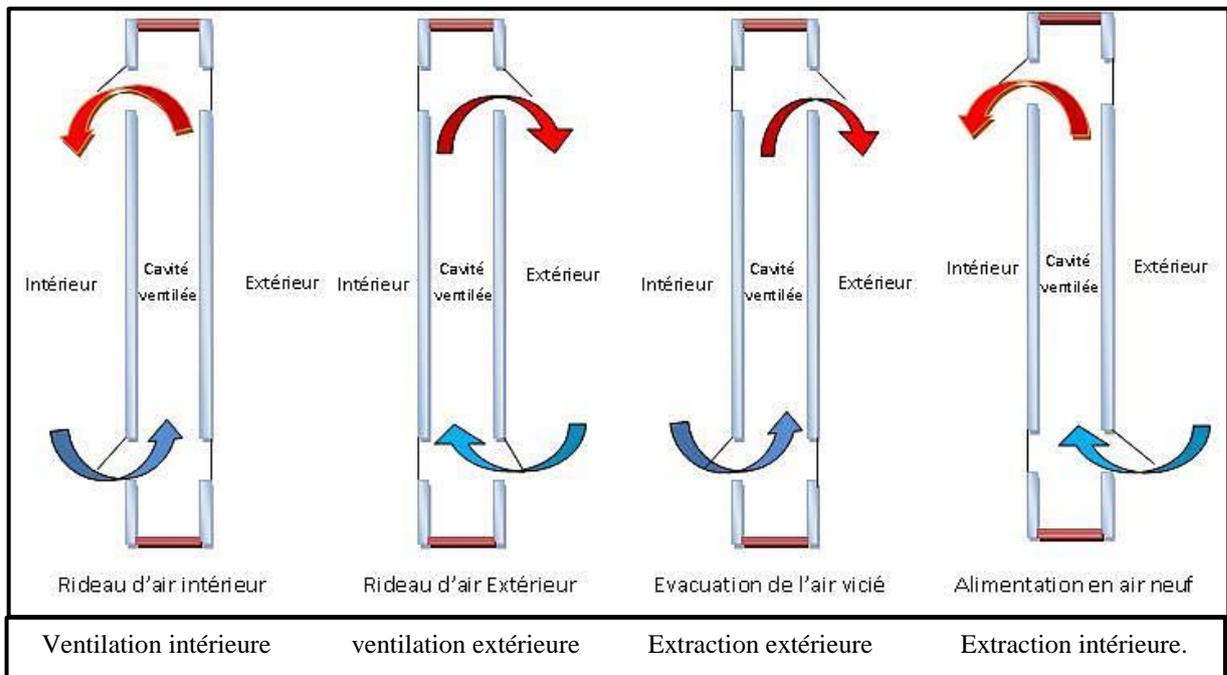


Figure III.22 : les différents modes de ventilation d'une FDP

Source : <https://www.pinterest.com>

S'agissant de la ventilation naturelle, il existe deux possibilités :

- ✚ une première possibilité où l'air du canal ne contribue pas à la ventilation des locaux (façade étanche : ventilation extérieure).
- ✚ une deuxième possibilité où l'air du canal contribue à la ventilation des locaux (façade non étanche : ventilation intérieure, extraction intérieure).

III.8.2.1. .Façade étanche

Une façade est dite étanche lorsque l'air provient d'un milieu et retourne dans celui-ci après un séjour dans le canal. C'est une configuration assez simple. La peau la plus isolante est alors celle qui n'est pas franchie par l'air. L'air rentre dans le canal par le bas, à travers une aération, puis remonte le long du canal en subissant un réchauffement dû aux rayons solaires et à l'effet de serre causé par la peau extérieure. Il va donc voir sa pression augmenter tout au long de la remontée puis sortir par le haut du canal. L'air du haut du canal est donc en surpression par rapport à celui de l'air entrant qui est en sous-pression. L'évolution est continue, donc il existe un endroit où la pression de l'air dans le canal, et celle de l'extérieur est égale. Ce niveau s'appelle le niveau « neutre ». Il

évolue en fonction des dimensions des entrées aux extrémités du canal. Par exemple, si les entrées et sorties d'air sont égales, le niveau neutre est à mi-hauteur du canal⁴⁸.

III.8.2.2. Façade assurant la ventilation des locaux

Lorsque la FDP assure la ventilation des locaux, l'utilisation de l'effet de cheminée nécessite certaines précautions :

- ✚ L'ensemble des étages doit se trouver dans la zone de dépression du canal. Le "niveau neutre" doit se situer au-dessus de l'ouverture supérieure.
- ✚ L'ouverture supérieure du canal de la "façade de type double-peau" doit être capable d'évacuer tout l'air extrait des différents étages.
- ✚ Le circuit aéraulique doit être équilibré et les interactions entre les étages en mouvements d'air doivent être minimisées afin d'assurer un renouvellement d'air égal entre les étages⁴⁹.

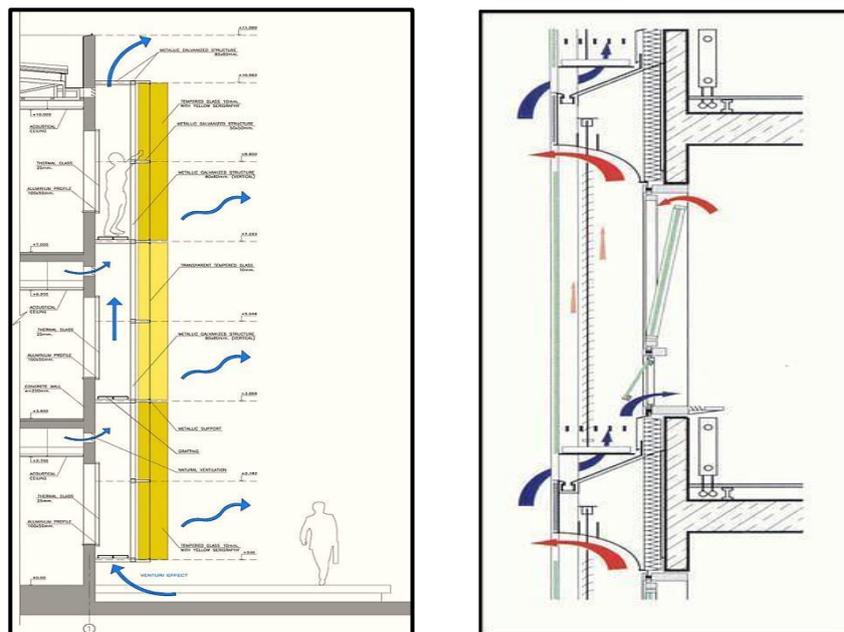


Figure III.23 : Ventilation des locaux

Source : <https://www.pinterest.com>

⁴⁸ Jean-Charles CROIX & Charles BASSIL, « Gestion et performances des façades active de type double peau » 2009, p.15

⁴⁹ Nassim SAFER, Ibid. p35

III.8.3. Ventilation hybride

Pour assurer la ventilation du canal des "façades de type double-peau", une ventilation hybride est possible. En effet, cette ventilation combine une ventilation mécanique et une ventilation naturelle (nous pouvons la définir comme étant une ventilation naturelle assistée). Dans ce type de ventilation, la ventilation mécanique prend le relais quand la ventilation naturelle fait défaut. Cette ventilation mécanique fonctionne en complément d'une manière souvent automatique, une station métrologique est généralement placée dans le bâtiment en question et les ventilateurs se mettent en route automatiquement quand les conditions climatiques sont défavorables (dans ce cas, la ventilation naturelle ne peut pas assurer la ventilation des canaux).⁵⁰

III.9. Stratégies de ventilation des FDP

- ✚ *Une ventilation extérieure* : cette première stratégie est la plus utilisée. L'air circulant dans le canal de la façade vient de l'extérieur et repart vers l'extérieur. Ce type de stratégie est très utilisé dans les bâtiments ventilés naturellement. Effet, il permet, dans la plus part des cas, l'évacuation des quantités de chaleur emmagasinées par le canal en traversant le canal.
- ✚ *Une ventilation intérieure* : contrairement à la configuration précédente, l'air circulant dans le canal de la façade vient de l'intérieur et sera extrait vers l'intérieur du local. Dans ce cas, l'air traversant le canal de la façade va emmagasiner une quantité de chaleur due à l'effet de serre créé par les deux vitrages et aux flux absorbés par la protection solaire. Cette configuration est intéressante en hiver puisqu'elle permet de diminuer les besoins en chauffage dans les locaux car l'énergie contenue dans l'air à sa sortie est injectée directement dans les locaux.
- ✚ *Une extraction extérieure* : l'air du canal de la "façade de type double-peau" est extrait vers l'extérieur. L'air à l'entrée du canal de la façade arrive directement de l'intérieur des locaux.
- ✚ *Une extraction intérieure* : contrairement à la configuration précédente, l'air est extrait vers l'intérieur et arrive directement de l'extérieur.⁵¹

III.10. Emplacement des ouvertures d'air

L'entrée et la sortie d'air sur le même axe est la configuration la plus courante. Cet emplacement est utilisé généralement pour les canaux fractionnés horizontalement et verticalement.

⁵⁰ Idem., p.36

⁵¹ Op.cit, p.37

Dans ce cas, chaque canal est indépendant des canaux adjacents. De plus, cette configuration permet d'éviter la propagation latérale des ondes acoustiques.

La configuration précédente peut s'avérer intéressante dans beaucoup de cas mais elle peut parfois présenter des problèmes non négligeables. En effet, la disposition des ouvertures risque d'engendrer des problèmes de surchauffes puisque l'air chaud à la sortie du canal a la possibilité de re-circuler dans le canal de l'étage suivant. Egalement, la surpression dans les canaux des étages élevés sera un handicap pour l'ouverture des fenêtres intérieures et peut causer des zones d'inconforts. Afin d'éviter ces problèmes, les entrées et les sorties peuvent être décalées.⁵²

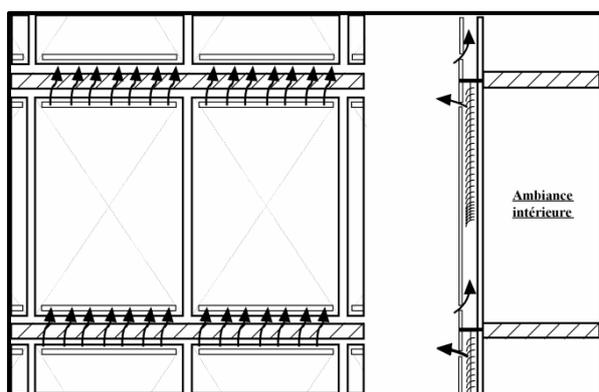


Figure III.24 : Ouvertures d'air fractionnées

Source : Nassim SAFER

« Typologie des façades de type double-peau »

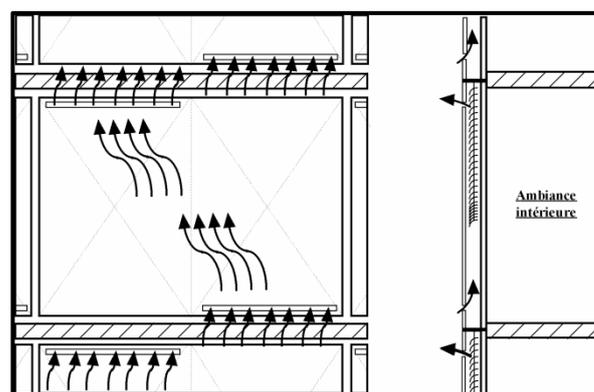


Figure III.25 : Ouvertures décalées

Source : Nassim SAFER

« Typologie des façades de type double-peau »

Pour les "façades de type double-peau" avec des canaux non fractionnés, la ventilation est généralement assurée via de grandes ouvertures au niveau du premier plancher inférieur (pour l'entrée d'air) et au niveau du dernier plafond (pour la sortie d'air). Au cours de la saison de chauffage, les ouvertures peuvent être fermées afin d'augmenter l'effet de serre créée à l'intérieur des canaux. S'agissant de la saison estivale, la température dans les canaux peut être très importante et plus particulièrement dans les niveaux supérieurs. Dans ce cas, le système HVAC⁵³ doit être correctement dimensionné afin d'assurer une température de confort à l'intérieur des locaux.

⁵² Idem , p.38-p.40

⁵³ HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning.

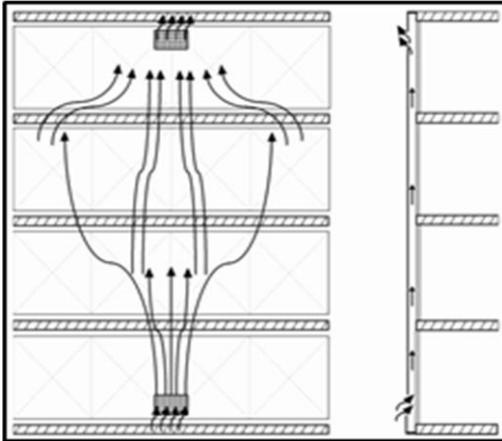


Figure III.26 : Ouvertures non fractionnées

Source : Nassim SAFER
« Typologie des façades de type double-peau »

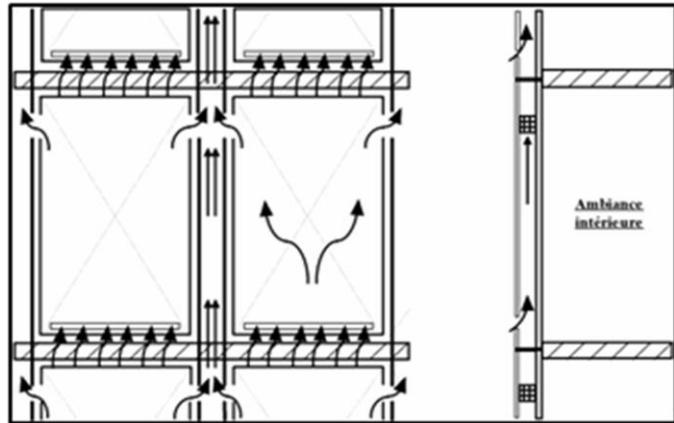


Figure III.27 : Emplacement du conduit pour l'évacuation de l'air chaud

Source : Nassim SAFER
« Typologie des façades de type double-peau »

III.11. Avantages et inconvénients

III.11.1 Avantages

- ☺ Arguments esthétiques : Transparence, image high-tech, abstraction de la façade avec l'absence des repères conventionnels : allèges, fenêtre, linteau.
- ☺ Arguments acoustiques : Possibilité de réaliser une ventilation naturelle (ouvrants de confort), tout en se protégeant du bruit extérieur grâce à la première peau vitrée.
- ☺ Stratégie du chaud :
 - Espace tampon,
 - Récupération de l'air chaud de la double peau (possible),
 - Diminution de l'effet de paroi froide
 - Diminution des pertes par infiltration
- ☺ Stratégie du froid :
 - Protection solaire extérieure
 - Amélioration de la ventilation naturelle grâce à l'effet de tirage
 - Possibilité plus fréquente d'utiliser la ventilation nocturne
- ☺ Stratégie de l'éclairage naturel :
 - Diminution des apports internes et des consommations électriques
 - Augmentation du confort visuel (attention aux surchauffes et éblouissement)

III.11.2. Inconvénients

- ⊖ Surcoûts dus à la réalisation d'une peau supplémentaire,
- ⊖ Gestion des ambiances thermiques et hygrométriques à l'intérieur de la double peau qui influent sur la durabilité des éléments constituant la façade.⁵⁴

III.12. Exemple d'utilisation des façades à double peau

« Double peau bioclimatique du Campus Scientifique de l'Université de Bordeaux »



Figure III.28 : Vue aérienne « Zone A » du campus

Source : AUA Paul Chemetov.

Le Campus de l'Université de Bordeaux présente un patrimoine homogène aussi bien dans sa couleur locale que dans sa trame porteuse. La première intention a été de maintenir voir de renforcer le lien urbain, architectural et identitaire entre des bâtiments étalés sur près de 2km. Cette approche identitaire et cohérente est essentielle pour initier une dynamique et donner une nouvelle cohérence à la vie de Campus.

Rénovation du Campus Sciences et Technologies Universitaire de Bordeaux, France.

⁵⁴ Harris Poirazis, « *Double Skin Façades for Office Buildings* », Lund University, Scandinavia 2004, P61.

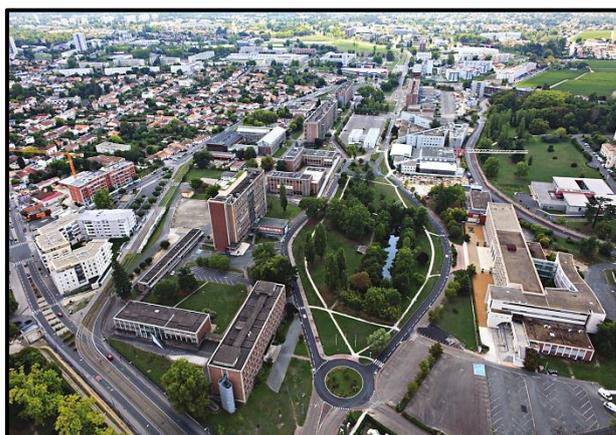


Figure III.29 : Vue aérienne du site de l'Université de Bordeaux
Source : MRW Zeppeline Bretagne

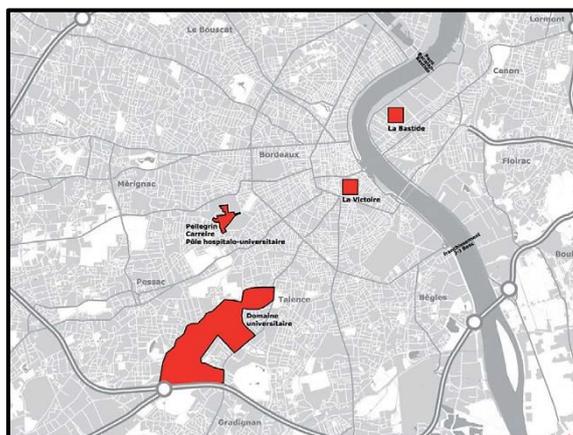


Figure III.30 : Sites universitaires bordelais concernés
Source : AUA Paul Chemetov

Opération : Requalification de 11 bâtiments universitaires existants, dont 6 bâtiments de type « lame » selon un principe de double-peau vitrée bioclimatique, construction de 5 bâtiments neufs⁵⁵.



Figure III.31 : campus de l'université de bordeaux avant rénovation.

Source : AUA Paul Chemetov.

L'agence « Franck Boutté Consultant » conduit les études spécifiques portant sur les volets énergétiques et de confort liés à ces façades bioclimatiques. Elle est accompagnée, entre autres, par le mandataire du groupement l'entreprise « DV Construction », « Quille construction » et le mandataire de la maîtrise d'œuvre l'agence d'architecture « AUA Paul Chemetov ».

⁵⁵Agence Franck Boutté Consultants, Conception & Ingénierie Environnementale.

Genèse : l'opération s'appuie sur la continuité symbolique et identitaire du Campus pour permettre l'adaptation des dispositions architecturales d'il y a cinquante ans avec la volonté d'un regain de considération et d'estime. Plutôt qu'une réponse plus normative qui aurait conduit à isoler par l'extérieur l'ensemble des bâtiments, ou d'une demi-mesure qui aurait consisté à les isoler par l'intérieur – en faisant dans les deux cas de leur matérialité et de leurs qualités originelles – les intervenants ont développé le parti-pris d'un principe de façade bioclimatique. Cette réponse est née de la spécificité architecturale des bâtiments lames existants (de grands volumes imposants, d'une épaisseur assez fine, exposant leurs façades principales au nord et au sud) et de la faculté de conserver l'identité et l'image du bâti tout en transfigurant les lieux à l'intérieur.

Concept : Entourer les bâtiments existants d'une double-peau en verre pour les isoler et les magnifier tout en pérennisant un « déjà-là » architectural de qualité. En hiver, la double-peau crée un coussin d'air chaud tout autour du bâtiment et isole les espaces intérieurs ; en été, la double-peau ouverte par des grilles mobiles crée un mouvement de thermosiphon et de ventilation naturelle tout autour du bâtiment qui rafraîchit les espaces intérieurs. La double-peau peut aussi être utilisée comme support de design signalétique ou de projections événementielles à l'échelle du campus⁵⁶.

Performances énergétiques visées :

- BBC⁵⁷ rénovation pour 12 bâtiments : A1,A2,A4,A12,A21,A22,B2,B4,B5,B7,B8,B16
- RT (Règlementation Thermique) 2012 pour 3 bâtiments : A9, A10, B6.
- RT2012 BEPOS (Bâtiment à Energie Positive) : B18,
- Certifications HQE (Haute Qualité Environnementale) : 16 bâtiments,
- 1 bâtiment certifié BREEAM.

Calendrier : Études 2011 – 2013.....Livraison printemps 2016.

⁵⁶ Agence Franck Boutté Consultants, Conception & Ingénierie Environnementale.

⁵⁷ Bâtiment à basse consommation.



Figure III.32 : Campus de l'université de bordeaux après rénovation.

La solution technique développée sur le campus de l'Université de Bordeaux s'attache à n'intervenir que très peu sur les bâtiments. Pour obtenir les performances suivantes (réduction des besoins de chauffage d'un facteur de 5 à 10, consommation en énergie primaire $Cep \leq Cep \text{ réf} -40\%$ au sens de la réglementation thermique) on ne change pas le bâtiment mais le climat qui l'environne, et ce au fil des saisons⁵⁸.

Au lieu de changer le bâtiment pour le convertir à des conditions d'ambiance réglementaires, la peau bioclimatique transforme son climat proche en l'environnant de froid quand il fait chaud, et de chaud quand il fait froid. L'espace tampon ainsi créé entre la peau vitrée et la façade existante permet la performance énergétique et le confort des occupants.

Le principe de façade bioclimatique est évolutif: il est adaptatif, il évolue au cours de l'année avec le climat. Close en hiver, la façade bioclimatique, constituée d'un vitrage rapporté en avant de la façade existante, accumule les apports solaires et se chauffe gratuitement. Ouverte en été, elle engendre un effet de tirage thermique qui rafraîchit les façades par effet de convection : l'air est évacué en toiture et récupère au passage les calories accumulées par les parois.

En plus de conserver les larges ouvertures des bâtiments sans diminuer leurs surfaces, la lumière naturelle est généreusement pénétrée dans l'ensemble des salles d'enseignement tout en renouvelant le confort intérieur sans en changer le support.

⁵⁸ <http://www.construction21.org/france/> consulté le 28/09/2017.

En hiver, la nouvelle façade vitrée absorbe le rayonnement solaire et permet de réchauffer passivement l'intérieur du bâtiment. Elle constitue ainsi un espace tampon qui entoure le bâtiment.

En été, cette avant-façade s'ouvre en haut et en bas et crée un appel d'air. L'air mis ainsi en mouvement tout autour du bâtiment rafraîchit et ventile naturellement les espaces intérieurs.

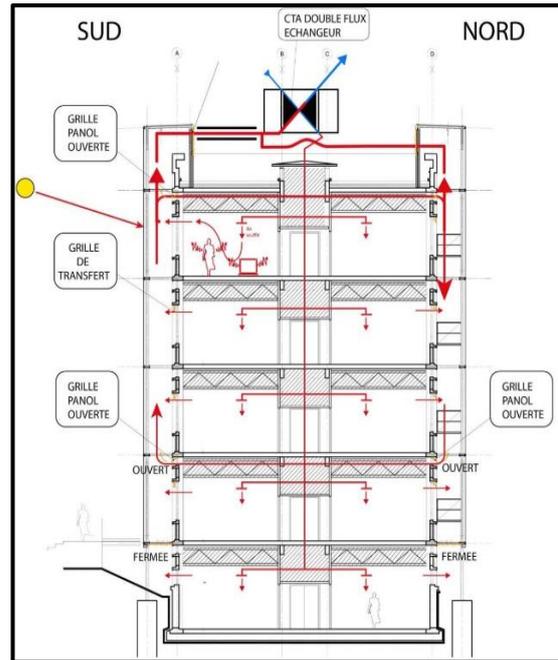


Figure III.33 : Comportement nouvelle enveloppe HIVER.

Source : Jérôme LOPEZ & Bruno CARRERE « nobatek ».

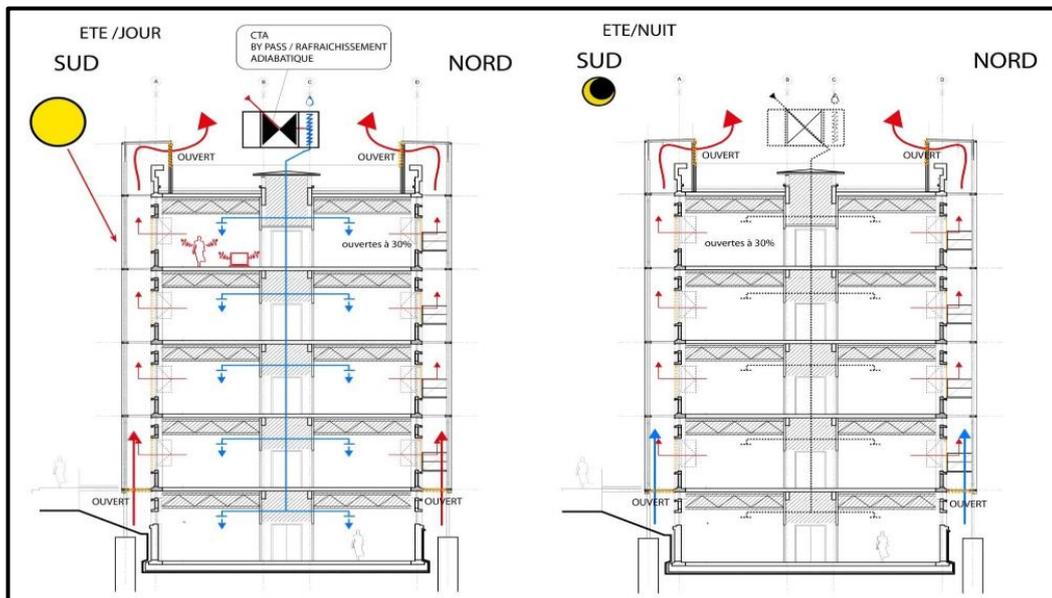


Figure III.34 : Comportement nouvelle enveloppe ETE.

Source : Jérôme LOPEZ & Bruno CARRERE « nobatek ».

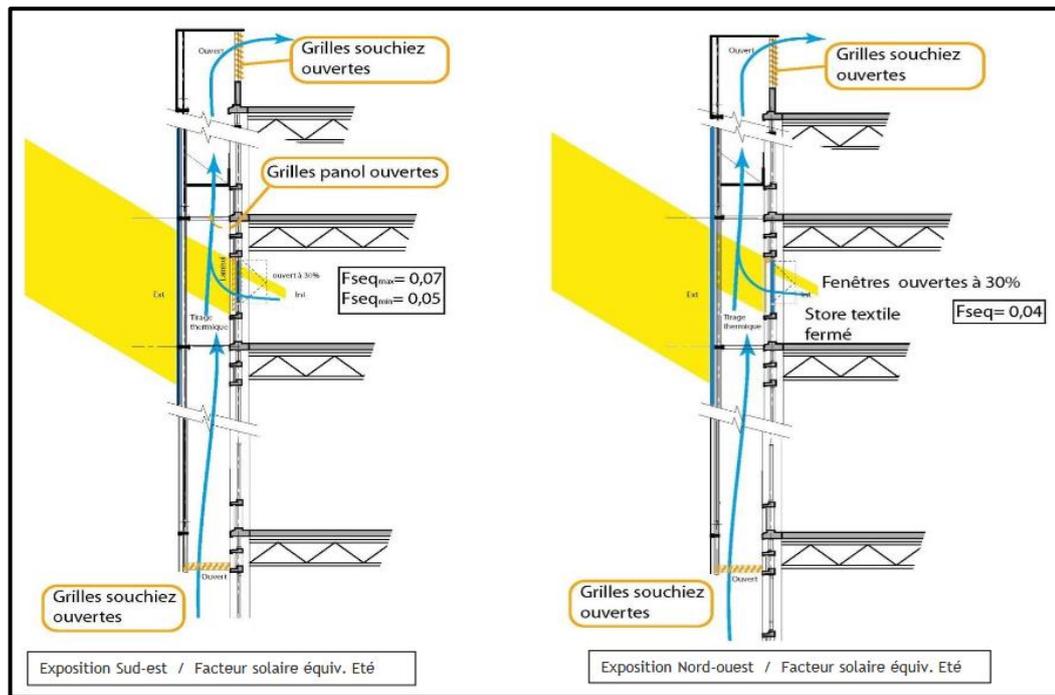


Figure III.35 : protections solaires par rapport aux orientations.

Source : Jérôme LOPEZ & Bruno CARRERE « nobatek ».

Ventilation / Rafraichissement de l'air :

Fonctionnement en air rafraîchi :

- L'air neuf soufflé dans les locaux est rafraîchi adiabatiquement par échange indirect (seulement si pic de chaleur) ;
- L'air vicié des locaux est rejeté et évacué dans les tampons ;
- L'échangeur est by-passé.

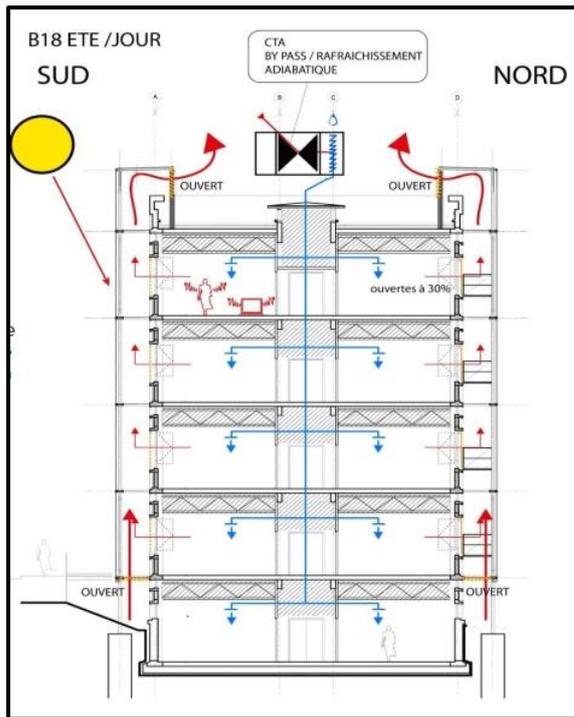


Figure III.36 : Rafrachissement de l'air

Source : Jérôme LOPEZ & Bruno CARRERE « nobatek ».

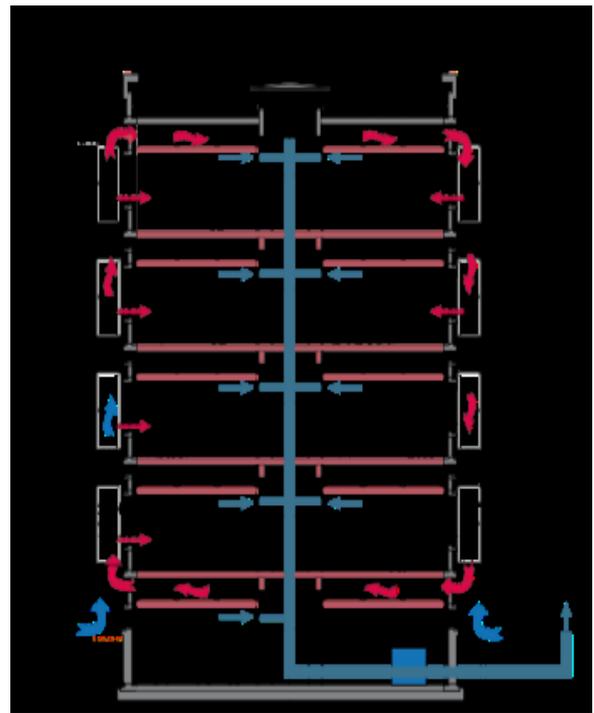


Figure III.37 : schéma de ventilation.

Source : AUA Paul Chemetov.

Le graphique ci-après a été calculé sur la base du fichier météo de l'épisode caniculaire de l'été 2003 sur les jours les plus chauds avec un rendement de 65% du rafraichisseur adiabatique. Le gain opéré est de 8 à 12°C en fonction de l'humidité de l'air.

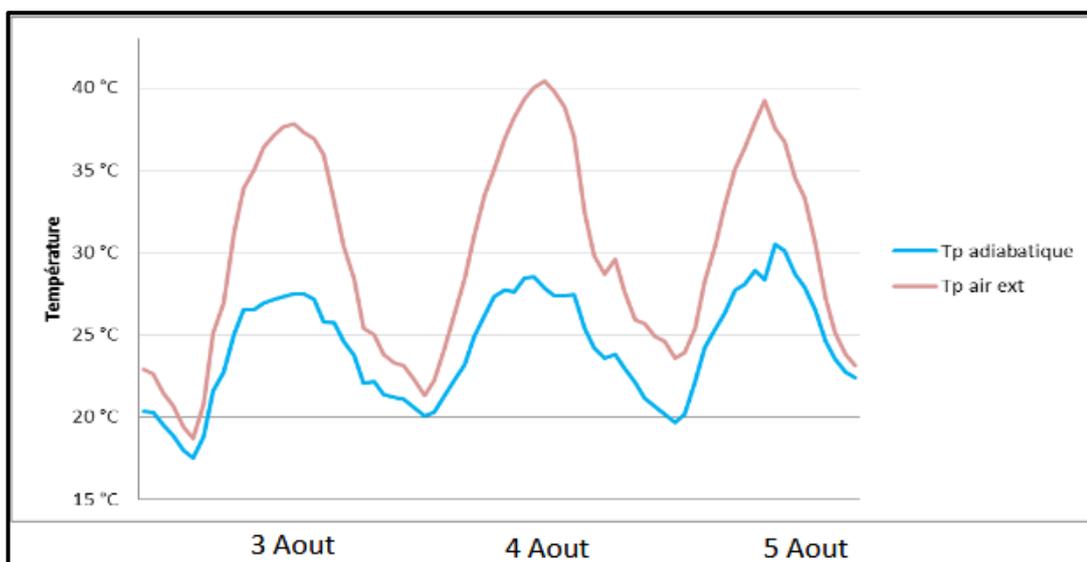


Figure III.38 : Température de soufflage Adiabatique en fonction de l'humidité et de la température extérieure

Source : Jérôme LOPEZ & Bruno CARRERE « nobatek ».

e
pro

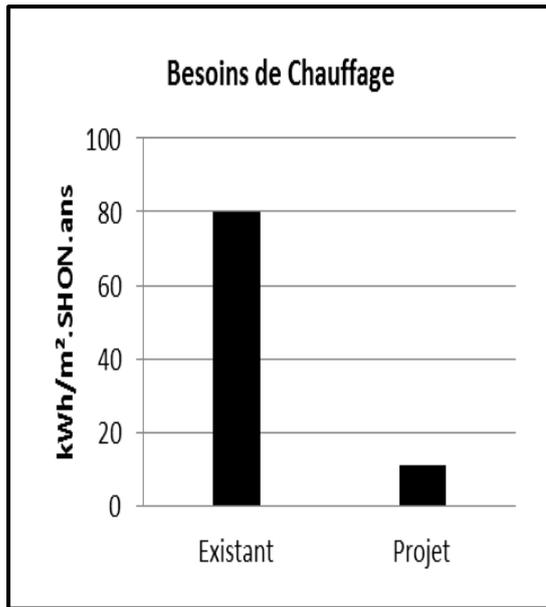


Figure III.39 : consommation énergétique

Source : AUA Paul Chemetov.

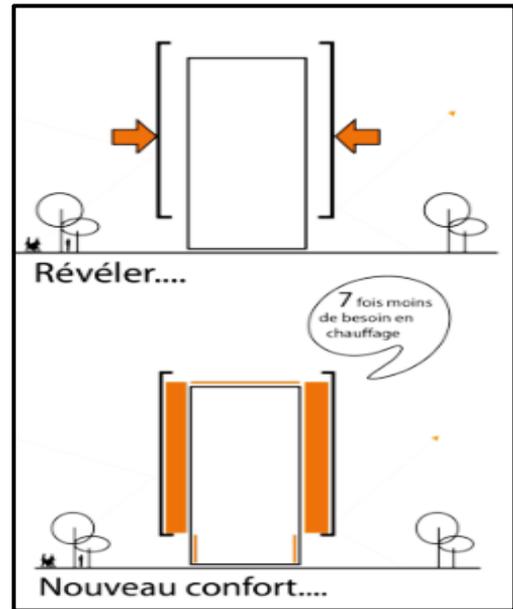


Figure III.40 : performances visées.

Source : AUA Paul Chemetov.

cessus bioclimatique est rendu possible par une utilisation accrue, à toutes les phases du projet, des outils de modélisation et d'ingénierie climatique. Ceux-ci permettent de qualifier les éléments architecturaux tout en s'assurant des qualités d'ambiances offertes aux usagers. Ils prennent ainsi pleinement part au processus de conception dans une logique de conception intégrée où les exigences de performance deviennent une ressource pour la conception.



Figure III.41 : Vue depuis l'intérieur de la façade Bioclimatique

Source : AUA Paul Chemetov.



Figure III.42 : Nouvelle façade

Source : AUA Paul Chemetov.

Consommation énergétique	
Besoin en énergie primaire	39.00 kWh EP/m ² /an
Besoin en énergie primaire bâtiment standard	66.00 kWh EP/m ² /an
Méthode de calcul	RT 2005
CEEB	0kWh PE /€
Consommation d'énergie finale	21.80 kWh EF/m ² /an
Répartition de la consommation énergétique	Chauffage : 10.8 kWh/m ² .an ; ventilateurs : 10.5 ; Eclairage : 17 ; auxiliaires : 0.1
Plus d'information sur la consommation réelle et les performances	La consommation d'énergie finale n'intègre pas l'énergie septique (ordinateurs..).
Consommation initiale	159.00 kWh EP/m ² /an
Performance énergétique de l'enveloppe	
UBat de l'enveloppe	0.75 W.m ⁻² .K ⁻¹
Plus d'information sur l'enveloppe	Les bâtiments existants bénéficient d'une façade bioclimatique en verre. celle-ci crée un espace tampon en hiver afin de limiter les déperditions et réduire les consommations de chauffage.
Indicateur	14(14) m ³ /H.m ² n50 (Vol) Q4
Etanchéité à l'air	1.70

Tableau III.1 : Consommation énergétique du campus

Source : <http://www.construction21.org/france/>

Conclusion

Pour conclure, les façades actives développent des propriétés variées (isolation acoustique, isolation thermique-énergétique, facteur lumineux-solaire, résistance au feu, résistance aux chocs) qui font de la façade à double peau le meilleur choix comme dispositif de contrôle climatique. Ce chapitre nous a donné les arguments nécessaires pour ce choix.

Ces façades étant composées d'éléments rapportés et assemblés, elles s'adaptent aux besoins fonctionnels et esthétiques. Il est possible d'accumuler les épaisseurs, de laisser une lame d'air, de varier les revêtements. La façade à double peau apparaît comme un champ très ouvert de la construction, propice à l'innovation. Ce qui fait également l'avantage de cette technique est la préfabrication. Elle permet de réduire les délais de construction avec un principe d'assemblage d'éléments finis.

Conclusion générale

Récapitulons, notre mémoire de fin d'études a pour objet d'étudier l'introduction des dispositifs de contrôle climatique dans la construction dans les zones méditerranéennes.

Dans le premier chapitre, nous avons cerné les concepts clés de climat, et l'influence de ses éléments sur la conception des bâtiments. De même, nous avons présenté la relation entre architecture et climat, qui donne naissance à un nouveau concept : l'architecture bioclimatique.

Le deuxième chapitre s'intéresse aux différents dispositifs (de conception climatique, thermiques et hygroscopiques) à utiliser pour améliorer le confort climatique et la conception énergétique du bâtiment.

Le troisième chapitre, a visé donc la façade à double peau, un dispositif actif hygrothermique que nous avons détaillé et cité un exemple d'utilisation. D'après le campus universitaire de bordeaux, La façade à double peau est une tendance architecturale motivée principalement par : le désir esthétique de façade entièrement vitrée qui accroît la transparence, le besoin pratique d'améliorer l'environnement intérieur, la nécessité d'améliorer la protection acoustique des bâtiments situés dans des zones polluées par le bruit, la réduction de l'énergie utilisée pendant l'occupation.

En général, les façades à double peau sont des éléments de plus en plus prisés dans les bâtiments modernes et les rénovations. Elles présentent des caractéristiques intéressantes notamment en termes d'isolement acoustique, de confort thermique ou de gain énergétique. Dans l'optique d'atteindre des objectifs de diminution des consommations énergétiques de plus en plus exigeants, il est indispensable d'optimiser le fonctionnement de ces façades. Les enjeux des façades à double peau se situent d'une part sur le plan de la thermique d'hiver afin d'utiliser au maximum l'énergie solaire et d'autre part sur le plan de la thermique d'été en limitant les surchauffes.

Les façades à double peau sont des nouvelles solutions pour économiser de l'énergie, et réduire ses consommations de chauffage, et optimiser le confort tout en protégeant l'environnement des impacts négatifs des constructions. Ces façades sont l'un parmi plusieurs outils qui participent au contrôle climatique des constructions. Les autres sont des dispositifs passifs introduits par l'architecture bioclimatique, et des dispositifs actifs intégrant la technologie dès le début de projet architectural

Afin de mieux optimiser la conception des bâtiments et de les rendre plus confortables, nous avons pu dégager quelques recommandations pour un climat méditerranéen humide. Ces recommandations visent à sensibiliser les intervenants dans le domaine de l'architecture de prendre en compte le facteur climat et de l'intégrer dans leur conception. On doit donc accorder une grande importance aux points suivants :

Implantation : site et relief :

- ✓ détermination des données climatiques et leurs influences sur le projet architectural.
- ✓ Avoir une étude détaillée de site, particulièrement la course de soleil et directions des vents et végétation existantes.
- ✓ l'implantation des végétations à feuillages persistants pour protéger les bâtiments des vents dominant en hiver (plantation des haies) et à feuillages caduques pour limiter l'exposition aux rayonnements solaires en été.
- ✓ Diminuer au maximum les surfaces bitumées et sombres, en augmentant les aires gazonnées et les plans d'eau, qui en absorbant le rayonnement solaire contribuent à réduire la température de l'air.

Orientation et ouvertures :

- ✓ Orienter judicieusement les ouvertures pour permettre une meilleure gestion de la chaleur et de la lumière. Le Nord aura le minimum de fenêtres parce qu'elles ne captent ni énergie, ni lumière. Les fenêtres étant des points faibles au niveau thermique, toute fenêtre positionnée au nord va faire augmenter les déperditions et rester malgré tout très sombre. L'Est et l'Ouest auront des vitrages, mais il faudra impérativement pouvoir les occulter dans la saison chaude pour éviter les surchauffes. Le Sud aura le maximum de vitrages, pour capter le maximum de chaleur.

Les serres :

- ✓ Plus la surface de contact entre la serre et les locaux adjacents est importante, plus l'effet de tampon thermique est important,
- ✓ Les pièces dont des fenêtres et des portes communiquent avec une serre bénéficient d'avantage de l'effet tampon. Ces ouvertures doivent rester closes tant que la température de la serre est inférieure à la température des pièces chauffées.

- ✓ Utiliser des vitrages doubles, peu émissifs ou des volets isolés durant la nuit,
- ✓ Utiliser des volets contrôlables en partie basse et haute de la serre pour évacuer l'excès de chaleur quand cela est nécessaire.

Façade à double peau :

- ✓ La localisation du bâtiment et les conditions climatiques du site (température extérieure, potentiel d'éclairage naturel, etc.),
- ✓ L'orientation de la façade,
- ✓ La géométrie de la cavité,
- ✓ La taille et le positionnement des ouvertures intérieures et extérieures dans la cavité,
- ✓ Le type de ventilation de la cavité.

En générale, c'est le respect des principes d'architecture bioclimatique et la maîtrise de la dimension climatique et savoir les intégrer soigneusement.

Références bibliographiques

Références bibliographique

- ✚ **Alain, LIEBARD & André, DE HERDE.** « *traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* », le moniteur 2005.
- ✚ **Allan, KONYA.** « *Design primer for hot climates* », Whitney Library of Design, 1980.
- ✚ **Amjad, ALMUSAED.** “*Biophilic and Bioclimatic Architecture*”, Springer-Verlag, London, 2011.
- ✚ **CSD, AZUR, Domene, IN VIVO.** « *construire en climat chaud caractéristiques du climat méditerranéen* », septembre 2010.
- ✚ **Dallel, KAOULA & mohamed, LEHTIHET.** « *construire avec le climat : réflexion sur les outils l'architectures en climat méditerranéen/cas de la ville de Jijel* », 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures.
- ✚ **Eleanor, LEE et Al.** « *High-performance commercial building façades* » 2002.
- ✚ **Harris, POIRAZIS.** “*Double Skin Façades for Office Buildings*” Lund University, Scandinavia 2004.
- ✚ **Karima, BENHALILOU.** « *impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estivale du bâtiment : cas du climat semi-aride* », mémoire de magistère, 2008.
- ✚ **Jean-Baptiste, AUBERT.** « *Projet de fin d'Etude : Restructuration de la Tour ESCA, Intervention sur le lot façade en phase de Conception – Préparation – Construction* » INSA de Strasbourg.
- ✚ **Jean-Charles, CROIX & Charles, BASSIL.** « *Gestion et performances des façades active de type double peau* » 2009.
- ✚ **Jean Jacques, DELETRE.** « *Mémento de prises de jour et de protections solaires* », E.A Grenoble, novembre 2003.
- ✚ **Jean-Louis, IZARD- Alain, GUYOT - Archi Bio – éditions : parenthèses ; Paris, 1979.**
- ✚ **Michel, DUPLAY & Claire, DUPLAY.** « *Méthode illustrée de création architecturale* », le moniteur 1982.
- ✚ **Naima, HASSAS. ép. KHALEF.** « *étude du patrimoine architecturale de la période ottomane : entre valeurs et confort* », mémoire de magistère, université de Tizi-Ouzou, 2012.

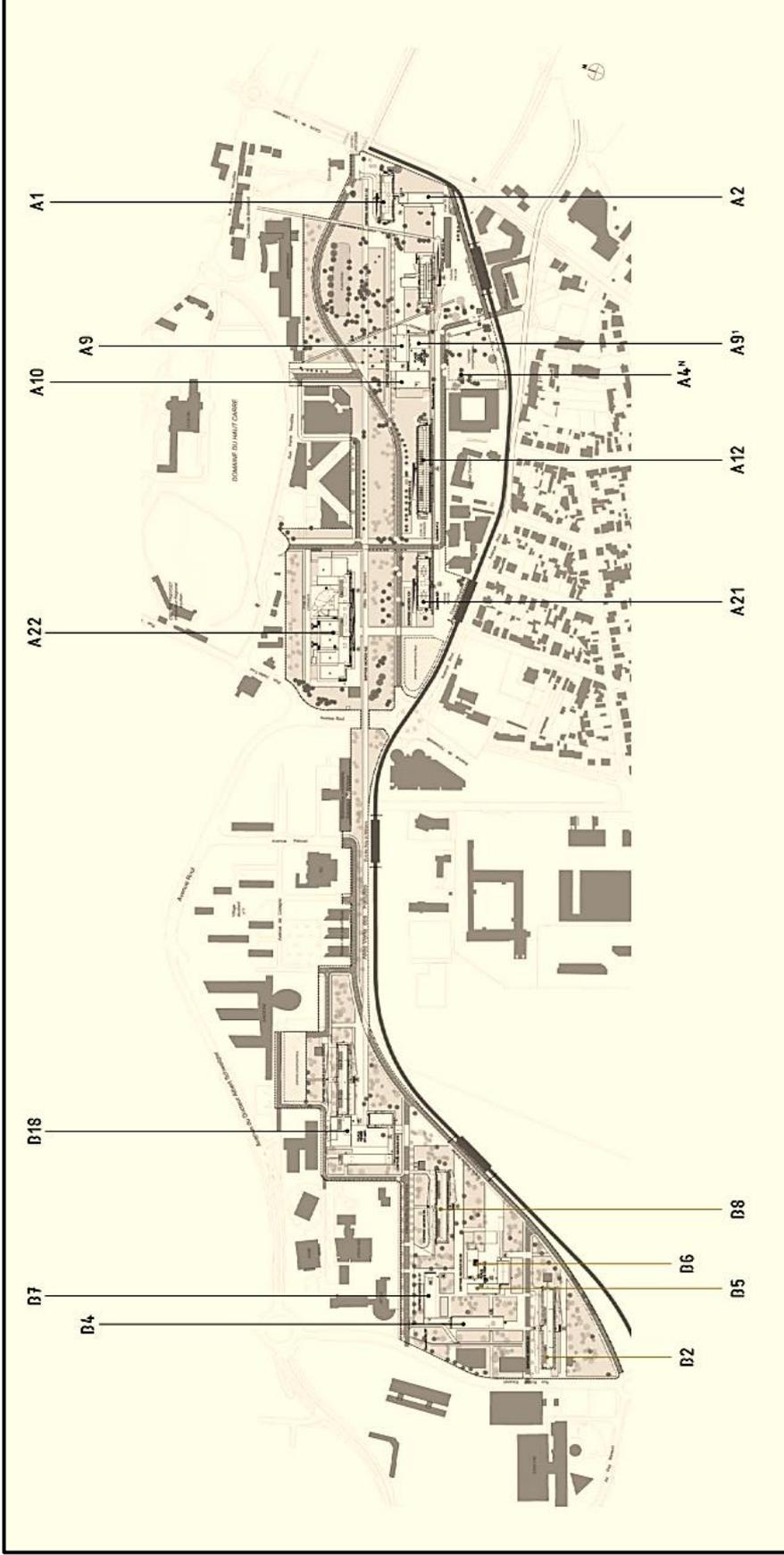
- ✚ **Nassim, SAFER.** « *Typologie des façades de type double-peau* ».Thèse en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2006.
- ✚ **Pierre, FERNANDEZ et Pierre LAVIGNE.** « *Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes* », édition : le moniteur 2009.
- ✚ **Pierre, ESTIENNE & Alain, GODARD.** « climatologie » paris : édition Armand Colin 1970.
- ✚ **Pierre, FERNANDEZ & pierre, LAVIGNE.** « *architecture climatique : une contribution au développement durable* », tome2 : concepts et dispositifs.
- ✚ Publication du Conseil de l'enveloppe du bâtiment du Québec (CEBQ).
- ✚ Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°3 (2009) 471 – 488, Le confort thermique entre perception et évaluation par les techniques d'analyse bioclimatique - Cas des lieux de travail dans les milieux arides à climat chaud et sec.
- ✚ **Sabrina, KHALDI.** « *étude numérique de la ventilation naturelle par la cheminée solaire* », mémoire de magistère, université de Tlemcen, 2013.
- ✚ **Saïd, MAZOUZ.** « *éléments de conception architecturale* », OPU, 4^{ème} édition, 2008.
- ✚ **Toufik, BENLATRECHE.** « Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics », mémoire de magistère, Université Mentouri Constantine, 2006.
- ✚ **Victor, OLGAYAY.** “*Design with climate*”, a bioclimatic approach to architectural regionalism, Princeton university press, 1963.
- ✚ <https://maison-monde.com/les-maisons-troglodytes-de-Matmata>, consulté le 21/09/2017.
- ✚ <https://www.cebq.org/documents/Lignesdirectricesdeconceptiondetoitsverts.pdf>
- ✚ <https://www.charpente-concept.com/fr/ecoconstruction/la-facade-active-lucido>, consulté le 28/09/2017.
- ✚ <http://www.lemoniteur.fr/article/une-facade-intelligente-grace-a-des-brise-soleil-automatisees-1027059> consulté le 28/09/2017.
- ✚ <http://www.batiweb.com/actualites/eco-construction/gestion-automatisee-pour-la-double-peau-dun-centre-de-maintenance-27-09-2013-22976.html> consulté le 29/09/2017.

Annexes



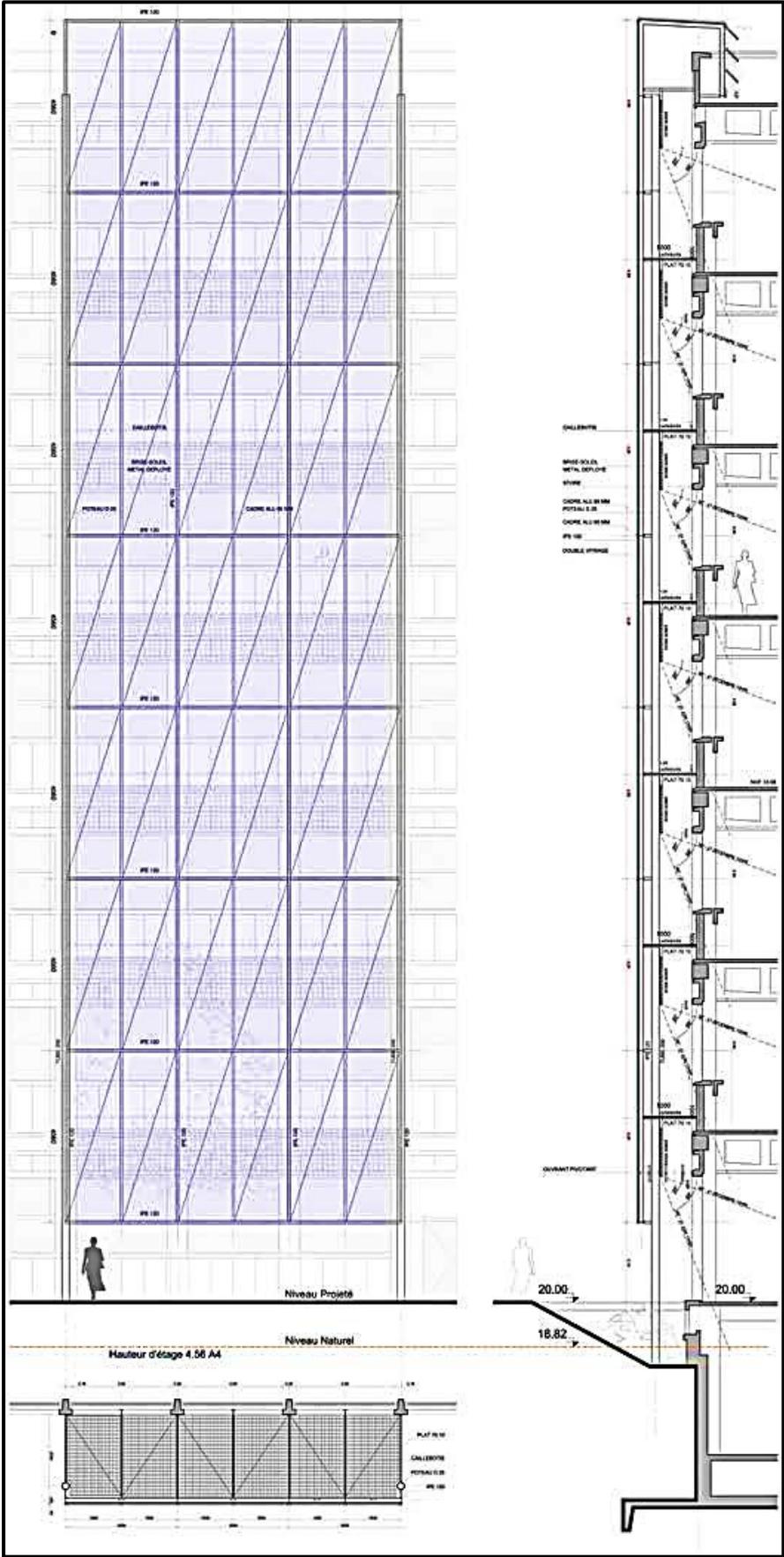
Annexe 01 : performances énergétiques du campus universitaire bordeaux avant rénovation.

Source : Jérôme LOPEZ & Bruno CARRERE « nobatek ».



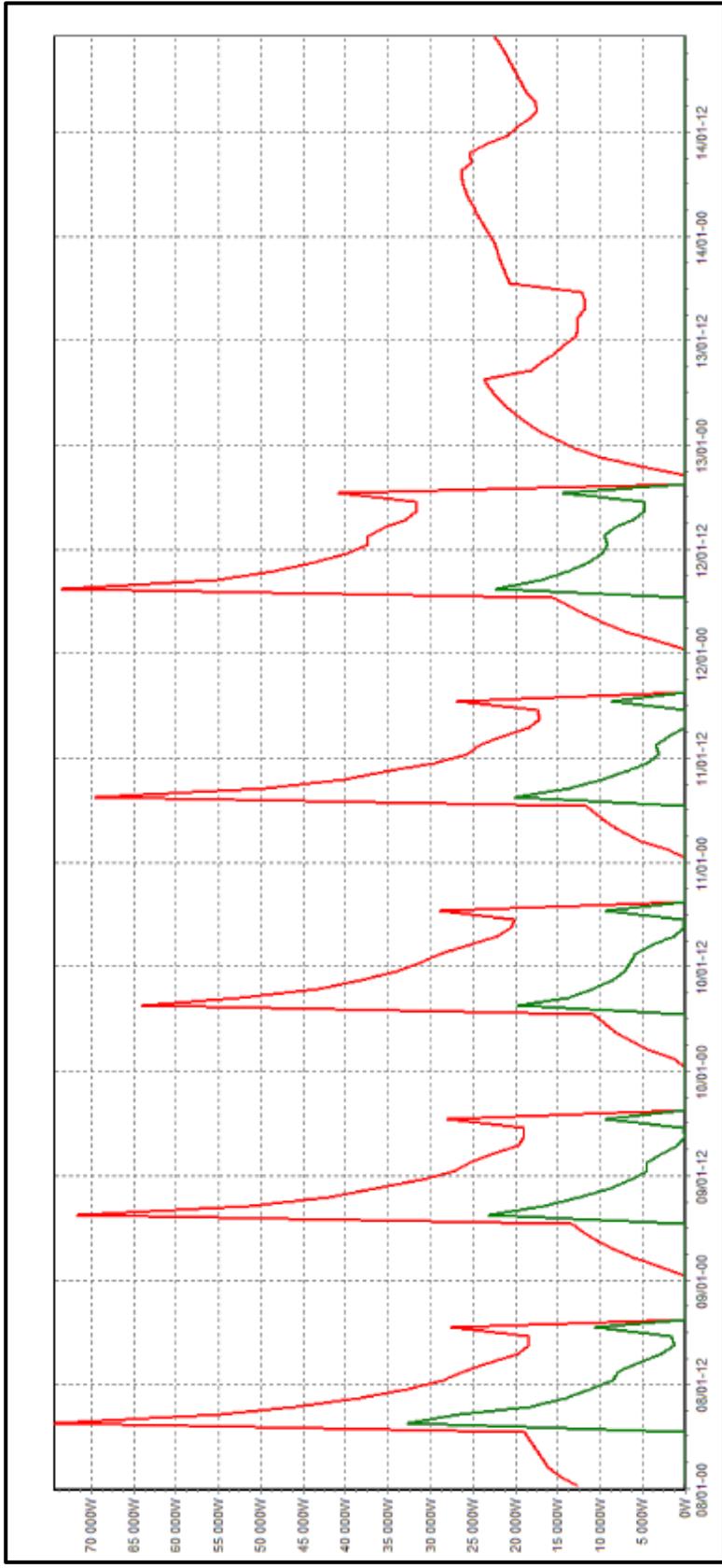
Annexe 02 : Plan de masse des batiments concernés par la rénovation

Source : AUA Paul Chemetov



Annexe 03 : détail de la façade bioclimatique du campus

Source : AUA Paul Chemetov

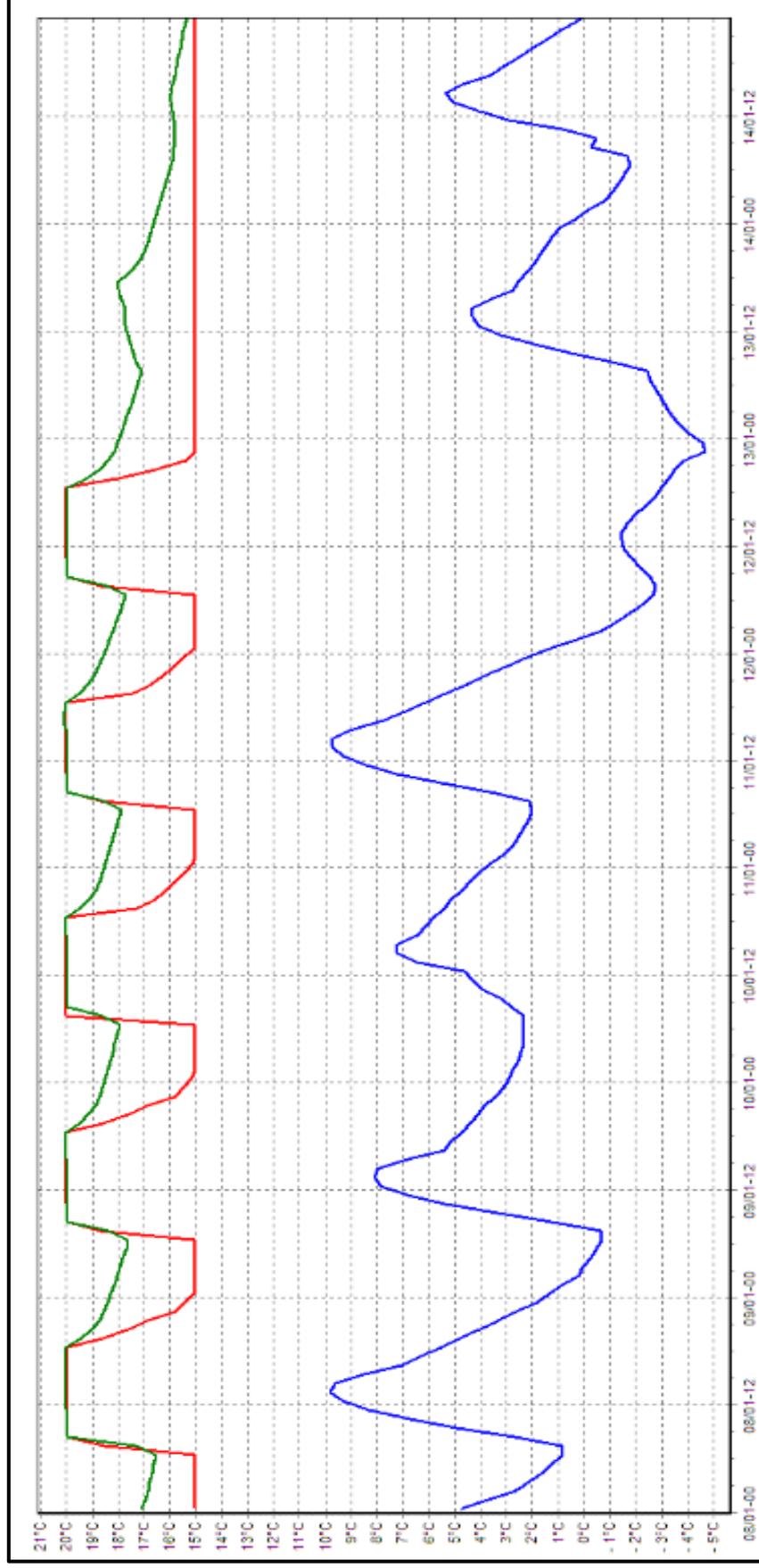


Puissances de chauffage
(semaine la plus froide
(janvier)), bureaux N

- état actuel
- après réhabilitation

Annexe 05: Comportement dynamique du bâtiment_puissances de chauffage.

Source : Jérôme LOPEZ & Bruno CARRERE « nobatek ».



Températures (semaine la plus froide (janvier)), bureaux N

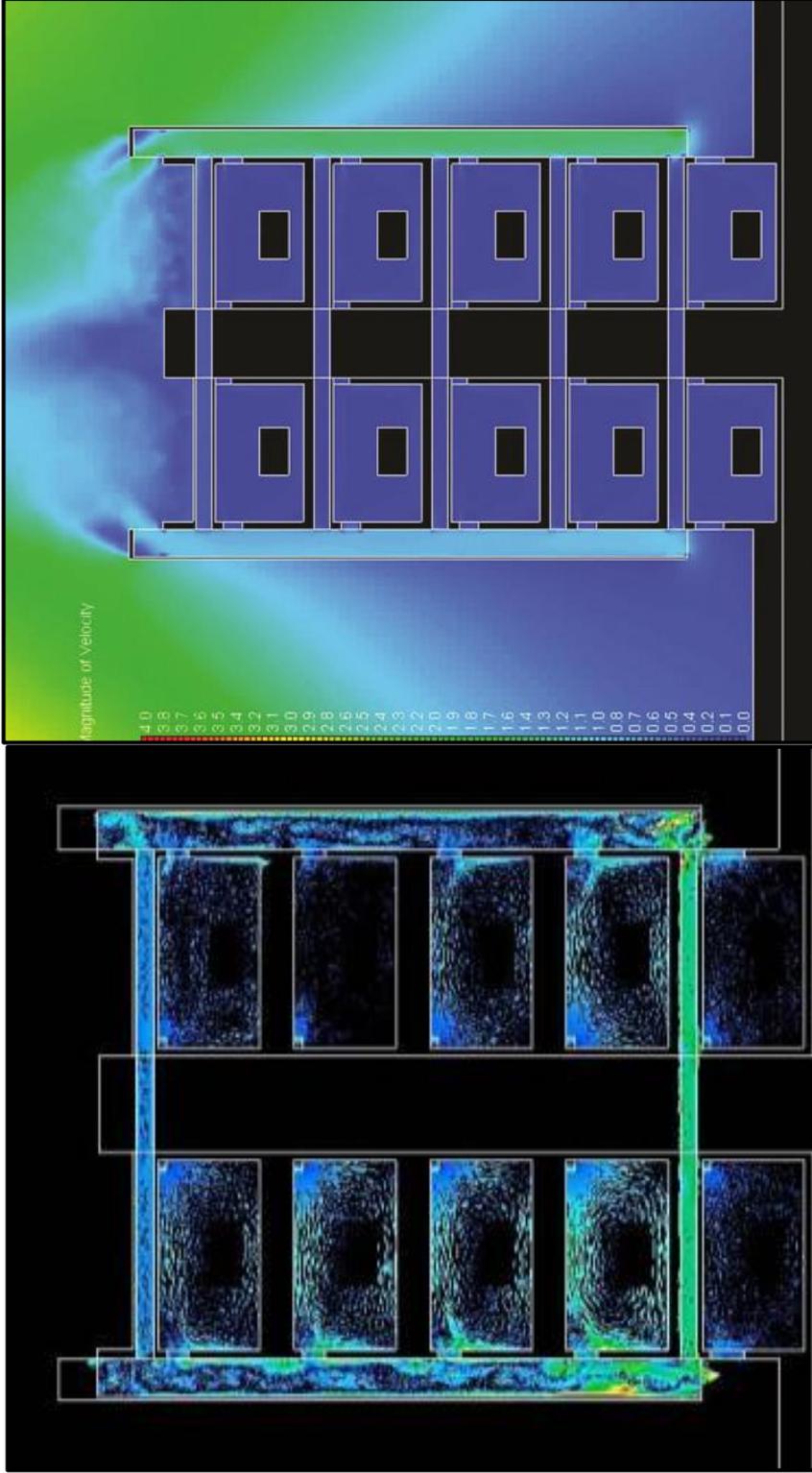
— état actuel

— après réhabilitation

— extérieur

Annexe 06: Comportement dynamique du bâtiment _températures.

Source : Jérôme LOPEZ & Bruno CARRERE « nobatek ».



Annexe 07: comportement de nouvelle enveloppe hiver/été.

Source : AUA Paul Chemetov.

Le climat est exclusif de certains facteurs environnementaux tels que : vent, température de l'air, précipitations et autres. Dans sa volonté d'optimiser son confort, l'homme d'aujourd'hui comme celui d'hier tente sans cesse de mieux comprendre le comportement de ces facteurs.

Maitriser les ambiances nécessite une bonne compréhension de l'interaction entre l'environnement et l'utilisateur. Pour ce faire, l'ambiance d'un espace doit être pensée comme la triade (forme, structure, fonctionnalité). Dans ce sens, les notions très en vogue d'architecture bioclimatique illustrent mieux l'utilité de savoir conjuguer ces paramètres.

L'adaptation de l'architecture à chaque climat apporte des réponses ingénieuses dans n'importe quel lieu à travers l'instauration d'une parfaite symbiose entre l'environnement et le bâtiment. Construire avec le climat, exige l'utilisation des stratégies passives pour la modification du climat intérieur en favorisant les environnements confortables et cela procure un meilleur confort climatique. En climat méditerranéen, le confort estival repose sur la stratégie du froid où l'effet combiné de la température et l'humidité (qui est très élevée) représente la source de l'inconfort durant cette période. Dans ce cas une bonne conception est d'autant plus importante avec des dispositifs passifs et actifs qui sont capables de rétablir la notion du confort dans l'espace habité. La façade à double peau est l'une de ces dispositifs qui opte à optimiser le confort, la consommation énergétique du bâtiment et l'esthétique de l'enveloppe.

La technologie des façades à double peau exprime une modification fondamentale du concept architectural usuel de la façade. Au fil des révolutions techniques, la façade s'est progressivement affranchie de toute fonction porteuse et elle est devenue ainsi un sujet indépendant dans la construction. Cette autonomie fait d'elle un domaine d'ingénierie et d'architecture spécifique, à l'heure où le contrôle des dépenses d'énergie est un critère primordial dans la conception des bâtiments.

Mots clés : climat, architecture bioclimatique, confort climatique, climat méditerranéen, dispositifs passifs et actifs, façades à double peau.

المناخ هو حصري لبعض العوامل البيئية مثل الرياح، درجة حرارة الهواء، وكميات الأمطار وغيرها. الإنسان في الماضي والحاضر رغبة منه لتحقيق أقصى قدر من الراحة، يحاول بلا توقف فهم سلوك هذه العوامل.

التحكم في الأجواء يتطلب الفهم الجيد للتفاعل القائم بين الإنسان وبيئته. ولهذا السبب، بيئة البناء يجب التفكير فيها مثل الثلاثية (شكل، هيكل ووظيفة) للمشروع. على هذا النحو المفاهيم الجد رانجة في الهندسة المعمارية البيولوجية هي أفضل توضيح لمعرفة كيفية الجمع بين هذه المعايير.

إن تكييف العمارة مع كل مناخ يجلب إجابات بارعة في أي مكان من خلال إقامة تكافل مثالي بين البيئة والمبنى. البناء مع المناخ، يتطلب استخدام استراتيجيات سلمية لتغيير المناخ الداخلي من خلال تعزيز نباتات مريحة وهذا يوفر راحة مناخية أفضل. في مناخ البحر الأبيض المتوسط، تستند الراحة الصيفية على استراتيجية البرد حيث التأثير المشترك لدرجة الحرارة والرطوبة (الذي هو مرتفع جدا) مصدر عدم الراحة خلال هذه الفترة. في هذه الحالة التصميم الجيد هو أكثر أهمية مع الأجهزة السلمية والنشطة التي هي قادرة على استعادة مفهوم الراحة في الفضاءات المأهولة. الواجهة المزدوجة هي واحدة من تلك الأجهزة التي تختار لتحسين الراحة، واستهلاك الطاقة للمبنى وجماليات المغلف.

تكنولوجيا الواجهات المزدوجة تعبر عن تغيير جذري في المفهوم المعماري المعتاد للواجهة. في سياق الثورات التقنية، تم تحرير الواجهة تدريجيا من أي وظيفة داعمة، وبالتالي أصبحت موضوعا مستقلا في البناء. هذا الاستقلالية جعلتها مجالا محددًا من الهندسة والهندسة المعمارية، في الوقت الذي السيطرة على نفقات الطاقة هو المعيار الأساسي في تصميم المباني.

الكلمات الرئيسية: المناخ، الهندسة المعمارية البيولوجية، راحة مناخية، مناخ البحر الأبيض المتوسط، الأجهزة السلمية والنشطة،

The climate is exclusive to certain environmental factors such as : wind, air temperature, rainfall and others. In his desire to optimize his comfort, today's man as of that yesterday tries non-stop to better understand these factor's behavior.

Mastering the environment requires a good understanding of the interaction between the environment and the user. In order to so, the atmosphere of a space must be thought of as triad (form, structure, functionality). In this sense, the concepts very in vogue of bioclimatic architecture illustrate the usefulness of knowing how to combine these parameters.

The adaptation of architecture to each climate brings ingenious answers in any place throughout the introduction of a perfect symbiosis between the environment and the building. to build with the climate, requires the use of passive strategies for modifying the indoor climate by promoting comfortable environments and this provides a better climatic comfort. In the Mediterranean climate, summer comfort is based on the cold strategy where the combined effect of temperature and humidity (which is very high) is the source of discomfort during this period. In this case good design is all the more important with passive and active tools that are able to restore the notion of comfort in inhabited space. The double skin facade is one of those devices that opts to optimize the comfort, energy consumption of the building and the aesthetics of the envelope.

The technology of double skin facades expresses a fundamental change in the usual architectural concept of the façade. In the course of technical revolutions, the facade has progressively been freed from any supporting function and has thus become an independent subject in construction. This autonomy makes it a specific area of engineering and architecture, at a time when controlling energy expenditure is a primary criterion in the design of buildings.

Key words: The climate, bioclimatic architecture, climatic comfort, Mediterranean climate, passive and active tools, double skin facades.