

**Département d'Architecture**



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de :  
**MASTER**

Filière :  
**ARCHITECTURE**

Spécialité :  
**ARCHITECTURE ET TECHNOLOGIE**

Présenté par :  
**Ammar LEHCHILI  
Yasser LEMZERI**

**THEME :**

**Conception solaire des bâtiments tertiaire :  
“ cas de la façade adaptative ”**

20/06/2018

Composition du Jury :

F. NEDJAR	MAA, Université Mohamed Seddik BENYAHIA - Jijel, Président du jury
N. BOUHIDEL	MAA, Université Mohamed Seddik BENYAHIA - Jijel, Directeur de mémoire
S. DJHAYCHIA	MAA, Université Mohamed Seddik BENYAHIA - Jijel, Membre du Jury



## Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier le bon Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Un remerciement spécial du fond de nos cœurs à nos très chers parents, leurs aides, leur soutien moral et matériel et leurs sacrifices étaient la motivation qu'allumé nos chemins.*

*A Mme BOUHIDEL Nour El Houda, on exprime toute notre reconnaissance et respect, notre encadreur et dirigeante qu'a aidé, orienté et n'a cessé de nous prodiguer aux cours de l'élaboration de cette étude. Ainsi que pour le soutien, les remarques pertinentes et les encouragements de sa part on la remercie mille fois encore.*

*A toutes personnes contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Les généreux amis et collègues pour leur soutien qu'on n'oubliera jamais.*

*A nos professeurs, enseignants et toutes les personnes qui nous ont soutenus jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de nous donner des conseils très importants en signe de reconnaissance. Et qui nous ont fait comprendre et sentir ce que c'est l'Architecture.*

*Aux membres du jury qui ont acceptés de participer à l'évaluation de notre travail.*

*A tous nos enseignants de département d'architecture de Jijel qu'ont initié aux valeurs authentiques, nous vous exprimons un profond respect et un profond amour !*

Merci infiniment à vous tous

*Ammar, Yasser*

## RÉSUMÉ

Dans cette recherche on propose une analyse des performances énergétiques des façades adaptatives en utilisant les panneaux isolants mobiles externes pour un espace de vie. Où le but est de contrôler les niveaux d'éclairage requis dans ces espaces, cela se reflète dans la recherche d'une transparence maximale en évitant les pertes de chaleur importantes dans le climat méditerranéen. Les simulations numériques permettent d'évaluer la performance énergétique de l'isolation mobile et de l'occultation, tandis que les simulations effectuées avec 'ECOTEC ANALYSIS 2011' permettent d'analyser les niveaux et la répartition de chaleur générés par la présence et le mouvement automatique de la façade. Les scénarios de présence et d'absence de ce type de façade permettent d'évaluer leur impact sur un espace d'habitation et de travail. Cette recherche conclue sur le potentiel énergétique des façades adaptatives en tant qu'opportunité d'adaptation au sein d'une architecture adaptative.

## ABSTRACT

In this research, we propose to analyze the energy performance of adaptive façades by using external mobile insulation panels on an adaptive facade for a living space. Where the goal is to control the levels of illumination required in these spaces are reflected in the quest for maximum transparency, and to avoid significant heat losses in the Mediterranean climate. Numerical simulations make it possible to evaluate the energy performance this type of facades and occultation, while the simulations carried out using ECOTEC ANALYSIS 2011 make it possible to analyze the levels and distribution of heat generated by the presence and the movement of IMP. Scenarios of presence and absence the adaptive facade make it possible to evaluate their impact on a living and a workspace. This research concludes on the energetic potential of the adaptive facades as an opportunity for adaptation within an adaptive architecture.

## ملخص:

في هذا البحث، سنقترح تحليل أداء الطاقة للواجهات المتكيفة باستخدام ألواح العزل المتحركة الخارجية لمساحة معيشة يومية. حيث الهدف رفع نسبة التحكم في مستويات الإضاءة المطلوبة في هذه الأماكن سعياً إلى تحقيق أقصى قدر من الشفافية، وكذا تفادي خسائر كبيرة في الحرارة في مناخ البحر الأبيض المتوسط. تجعل عمليات المحاكاة الرقمية من الممكن تقييم أداء الطاقة للعزل المتنقل والاستئارة، في حين أن عمليات المحاكاة التي أجريت باستخدام ECOTEC ANALYSIS 2011 تجعل من الممكن تحليل مستويات وتوزيع الحرارة المتولدة عن وجود وحركة ألواح العزل الخارجية للواجهة ذاتية التأقلم. تتيح سيناريوهات المحاكاة لوجود أو غياب ألواح العزل تقييم تأثير الواجهة المتكيفة على مساحات المعيشة أو العمل. يخلص هذا البحث إلى إمكانات هذه الواجهات الطاقوية كفرصة للتكيف ضمن بنية هندسية تكيفية.

## Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	i
<b>Résumé</b> .....	ii
<b>Abstract</b> .....	ii
<b>Table des matières</b> .....	iv
<b>Liste des tableaux</b> .....	ix
<b>Liste des figures</b> .....	x
<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Problématique</b> .....	2
<b>Hypothèse</b> .....	2
<b>PARTIE I : La conception solaire</b> .....	3
<b>Chapitre I : L'architecture et l'énergie solaire</b> .....	4
<b>Introduction</b> .....	4
<b>I.1 L'architecture et l'énergie solaire</b> .....	4
<b>I.2. L'architecture solaire</b> .....	6
I.2 Le solaire passif .....	7
I.2.2 La lumière naturelle .....	10
I.2.3 Le solaire actif .....	13
<b>I.3 Intégration architecturale</b> .....	16
<b>Conclusion</b> .....	17
<b>Chapitre II : La conception solaire</b> .....	18
<b>Introduction</b> .....	19
<b>II.1. Les premières étapes de conception</b> .....	19
<b>II.2. Les connaissances du concepteur</b> .....	20
<b>II.3 Les outils et méthodes de conception</b> .....	23
<b>Conclusion</b> .....	24
<b>PARTI II : Les façades en architecture</b> .....	25
<b>Chapitre I : La façade et la transparence en architecture</b> .....	26

<b>Introduction</b> .....	26
<b>I.1. La façade en architecture</b> .....	27
I.1.1. La façade lourde .....	28
I.1.2. La façade légère .....	28
<b>I.2 Les types de la façade légère</b> .....	28
<b>I.2.1 Les façades panneaux</b> .....	28
I.2.1.a Les panneaux simples .....	29
I.2.1.b Les panneaux composites .....	30
<b>I.2.2 Les façades rideaux (double peau)</b> .....	30
I.2.2.a. Caractéristiques d'un mur rideau .....	31
I.2.2.b. Typologie des façades rideaux .....	31
<b>I.3 historique de la façade double peau</b> .....	32
<b>I.4 Les principaux types de la façade double peau</b> .....	33
<b>I.4.1 Les façades ventilées</b> .....	33
La ventilation naturelle .....	34
La ventilation forcée (mécanique) .....	34
La ventilation hybride .....	34
<b>I.4.2 Les façades actives</b> .....	35
<b>I.5 les composants de la façade double peau</b> .....	35
I.5.1 La peau extérieure .....	35
I.5.2 La peau intérieure .....	35
I.5.3 Un espace tampon .....	35
I.5.4. Une protection solaire .....	36
<b>I.6 Principe de fonctionnement de la façade double peau</b> .....	37
<b>I.7 L'intérêt énergétique et les enjeux de la façade double peau</b> .....	38
<b>Conclusion</b> .....	39
<b>Chapitre II : La façade adaptative</b> .....	41
<b>Introduction</b> .....	42
<b>II.1 L'architecture adaptative</b> .....	42
<b>II.2 La façade adaptative</b> .....	44
<b>II.3 Mouvement en façade</b> .....	45

<b>II.3.1 Typologies de mouvement</b> .....	47
II.3.1.1 Coulissant .....	47
II.3.1.2 Pivotant .....	47
II.3.1.3 Pliant .....	47
II.3.1.4 Comparaison entre les trois typologies de mouvement .....	48
<b>II.4 Le panneau isolant mobile</b> .....	49
<b>Conclusion</b> .....	53
<b>PARTI III : La simulation numérique de cas d'étude</b> .....	54
<b>Chapitre I : La simulation des chambres d'hôtel d'affaire</b> .....	55
<b>Introduction</b> .....	55
<b>I.1 L'outil de travail (simulation numérique)</b> .....	55
<b>I.2 Objectif de l'étude</b> .....	55
<b>I.3 Argumentation du choix des logiciels de Simulation</b> .....	55
<b>I.3.1. Présentation de logiciel de simulation Ecotect 2011</b> .....	56
<b>I.4. La méthode de simulation</b> .....	57
<b>I.4.1. Préparation des plans</b> .....	57
<b>I.4.2. Paramétrage de l'Ecotect Analysis</b> .....	57
I.4.2.1. La description du projet .....	58
I.4.2.2. Les données climatiques .....	58
I.4.2.3 L'orientation .....	59
<b>I.4.3. Importation des plans</b> .....	60
<b>I.4.4. Modelage en 3D</b> .....	60
<b>I.4.5. Insertion des ouvertures et des portes</b> .....	61
<b>I.4.6. Le choix des matériaux</b> .....	61
a. Les murs (Walls) .....	61
b. Sol (Floor) .....	62
c. Plafond (Ceiling) .....	62
d. Ouverture (Windows) .....	62
e. Portes (Doors) .....	63
<b>I.5. Protocole de simulation</b> .....	63

<b>I.5.1. Le projet objet de simulation dans son environnement immédiat</b> .....	63
<b>I.5.2. Les grilles d'analyses des chambres</b> .....	64
<b>I.5.3. Les périodes et le mode d'occupation</b> .....	64
<b>I.5.4. Le lancement de la simulation</b> .....	65
<b>I.6. Les résultats de simulation</b> .....	65
<b>I.6.1 Chambre 01 (NORD)</b> .....	65
<b>I.6.1.1 Scénario a (sans façade adaptative)</b> .....	65
a) Les sources de chaleurs .....	65
B) Le taux de l'insatisfaction .....	66
<b>I.6.1.2 Scénario b (avec façade adaptative)</b> .....	67
a) Les sources de chaleurs .....	67
B) Le taux de l'insatisfaction .....	68
<b>Conclusion</b> .....	69
<b>Chapitre II : Analyse et interprétation des résultats</b> .....	70
<b>Introduction</b> .....	71
<b>II.1. Analyse et interprétation des résultats</b> .....	71
II.1.1 Chambre 01 (NORD) .....	72
II.1.2 Chambre 02 (SUD) .....	73
II.1.3 Chambre 03 (EST) .....	73
II.1.4 Chambre 04 (OUEST) .....	74
<b>Conclusion</b> .....	74
<b>Conclusion générale</b> .....	76
<b>Annexes</b> .....	80
<b>Bibliographie</b> .....	91

## Liste des tableaux

<b>Tableau 01</b> - Résultat de simulation de chaleur latente dans les 2 scénarios choisi .....	71
<b>Tableau 02</b> : Résultat de simulation d'Insatisfaction dans les 2 scénarios choisi.....	72
<b>Tableau 03</b> : Tableau comparatif des différents types de vitrages et leur performances énergétiques.....	77

## Liste des figures

<b>Figure 01</b> : Moyenne annuelle de l'énergie solaire à la surface de la Terre (kWh/m <sup>2</sup> /jour) .	05
<b>Figure 02</b> : Adaptation volumétrique d'un module simple pour une utilisation optimale de l'énergie solaire en fonction des besoins.....	08
<b>Figure 03</b> : Représentation schématique des quatre principes du chauffage solaire passif...	08
<b>Figure 04</b> : Schémas représentant différentes compositions d'ouvertures vues en coupe.....	12
<b>Figure 05</b> : Représentation schématique d'un collecteur plat.....	14
<b>Figure 06</b> : Représentation schématique de la composition et du fonctionnement d'un collecteur à tubes sous vide.....	15
<b>Figure 07</b> : Représentation schématique de la composition d'une cellule photovoltaïque ainsi que des différents flux énergétiques .....	16
<b>Figure 08</b> : Représentations schématiques d'une surface absorbantes perpendiculaire au rayonnement solaire, en été et en hiver.....	20
<b>Figure 9a</b> : Coupe longitudinale nord-sud en situation d'équinoxe du projet Light'n books : l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine.....	21
<b>Figure 9b</b> : Coupe longitudinale nord-sud en été du projet Light'n books : l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine.....	22
<b>Figure 9c</b> : Coupe longitudinale nord-sud en hiver du projet Light'n books : l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine.....	22
<b>Figure 10 : a.</b> Gratte-ciel de verre imaginés par Mies van der Rohe, Berlin, 1919.....	27
<b>Figure 10 : b.</b> Seagram Building de New York.....	27
<b>Figure 11</b> : Façade en panneaux préfabriqués, installés directement sans profils porteurs et raidisseurs.....	29
<b>Figure 12</b> : Façade en panneaux simples (cassettes).....	29
<b>Figure 13 : a.</b> Panneaux sandwich en façade, fixés sur une ossature secondaire en bois. Maison à Paris Ige, Georges Maurios architecte. <b>b.</b> Panneau-sandwich à fixations cachées.	30
<b>Figure 14</b> : Montage des éléments de mur rideau sur grille .....	31
<b>Figure 15</b> : Montage des éléments de mur rideau par cadre .....	32

<b>Figure 16</b> : Principe de fonctionnement d'une façade double peau <b>(a)</b> ventilée naturellement sur un niveau <b>(b)</b> ventilée mécaniquement.....	35
<b>Figure 17</b> : les composants d'une façade double peau .....	36
<b>Figure18</b> : Façade double peau et ces différents composants.....	37
<b>Figure19</b> : L'emplacement d'un store vénitien dans une façade double peau .....	37
<b>Figure 20</b> : <b>a.</b> principe de fonctionnement en hiver, <b>b.</b> principe de fonctionnement en été	38
<b>Figure 21</b> : Typologie de mouvement de plans.....	46
<b>Figure 22</b> : <b>a.</b> Stilt Cabin Seattle, EU par Olson Sundberg, <b>b.</b> Sliding House Suffolk, Royaume-Uni par dRMM .....	47
<b>Figure 23</b> : <b>a.</b> Tucker House, Victoria, Australie par Sean Godsell, <b>(b.</b> Arup Campus, Solihull, Royaume-Uni par Arup Associates <b>c.</b> False Bay Cabin, San Juan, Island par Tom Kundig.....	47
<b>Figure 24</b> : <b>a.</b> Kiefer Technic Showroom, Steiermark, Autriche par Brecht+PartnerZT GmbH,) <b>b.</b> B2 House, Çanakkale, Turquie par Han Tümertekin.....	47
<b>Figure 25</b> : Transferts thermiques à travers des vitrages orientés sud, est/ouest et nord pour la ville de Madison.....	50
<b>Figure 26</b> : Déperditions en fonction de la résistance de l'isolant .....	52
<b>Figure 27</b> : Ecotect Analysis 2011.....	56
<b>Figure 28</b> : Le plans dessinés.....	57
<b>Figure 29</b> : modification de la dimension du modèle.....	57
<b>Figure 30</b> : Discription du projet et importation du fichier " *.WEA " de Jijel.....	58
<b>Figure 31</b> : quelque résultat de météonorm7 concernant le rayonnement et le rayonnement global journalier.....	58
<b>Figure 32</b> : Aperçu ces données de la commande WEATHER TOOL.....	59
<b>Figure 33</b> : le paramétrage du logiciel.....	59
<b>Figure 34</b> : Importation du fichier DXF.....	60
<b>Figure 35</b> : Modélisation de la 3D en Ecotect.....	60
<b>Figure 36</b> : Insertion des ouvertures et des portes.....	61
<b>Figure 37</b> : Insertion des matériaux des Murs.....	61
<b>Figure 38</b> : Insertion des matériaux du sol.....	62

<b>Figure 39</b> : Insertion des matériaux des plafond.....	62
<b>Figure 40</b> : Insertion des matériaux des ouverture. (Scénario 01 et 02).....	62
<b>Figure 41</b> : Insertion des matériaux des portes.....	63
<b>Figure 42</b> : L'enseillement annuel des tours.....	63
<b>Figure 43</b> : Grille d'analyse.....	64
<b>Figure 44</b> : Insertion des périodes d'occupation et les autres facteurs.....	64
<b>Figure 45</b> : La boite de dialogue a 5 étapes pour le lancement de la simulation.....	65
<b>Figure 46</b> : Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario A).....	66
<b>Figure 47</b> : Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario A).....	67
<b>Figure 48</b> : Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario B).....	68
<b>Figure 49</b> : Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario B).....	69
<b>Figure 50</b> : Comparaison entre les résultats obtenues des 2 scénario pour la chambre 01	72
<b>Figure 51</b> : Comparaison entre les résultats obtenues des 2 scénario pour la chambre 02	73
<b>Figure 52</b> : Comparaison entre les résultats obtenues des 2 scénario pour la chambre 03	73
<b>Figure 53</b> : Comparaison entre les résultats obtenues des 2 scénario pour la chambre 04	74
<b>Figure 54</b> : Performance des fenêtres selon le type de vitrage.....	77
<b>Figure 55</b> : Panneaux isolant PUR .....	78
<b>Figure 56</b> : Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario A).....	81
<b>Figure 57</b> : Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario A).....	82
<b>Figure 58</b> : Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario B).....	82
<b>Figure 59</b> : Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario B).....	83
<b>Figure 60</b> : Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario A).....	84
<b>Figure 61</b> : Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario A).....	85
<b>Figure 62</b> : Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario B).....	86
<b>Figure 62</b> : Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario B).....	86
<b>Figure 63</b> : Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario A).....	87

<b>Figure 64</b> : Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario A)....	88
<b>Figure 65</b> : Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario B).....	88
<b>Figure 66</b> : Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario B)....	88

## Nomenclature

BTU = Le British Thermal Unit (abrégé en Btu ou BTU) est une unité anglo-saxonne d'énergie définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une livre anglaise d'eau d'un degré °F à la pression constante d'une atmosphère.

$$1 \text{ Btu (IT)/foot}^2 [\text{Btu/ft}^2] = 11356.526682227 \text{ joule/meter}^2 [\text{J/m}^2]$$

C° : Le degré Celsius est l'unité de l'échelle de température Celsius, qui est une unité dérivée du Système international d'unités.

I $\theta$  : intensité des rayons solaires

$\theta$  : angle d'incidence des rayons solaires

KWh/m<sup>2</sup> : Unité de mesure de la consommation énergétique par unité de surface. Elle sert notamment à mesurer la performance énergétique d'un bâtiment.

nZEB : Nearly zero-energy buildings, un thème d'efficacité énergétique des bâtiments mis par la commission européenne d'énergie.

PLEA : Passive and Low Energy Architecture

PUR : abréviation du polyuréthane

## **Introduction Générale :**

**« 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 ».<sup>1</sup>**

Depuis des années, la consommation mondiale énergétique a connu une augmentation considérable, et ce au détriment des ressources fossiles existants. En effet, cette demande massive et parfois excessive des énergies, notamment dans le domaine du bâtiment, contribuera d'une part à l'épuisement de ces ressources énergétiques à long terme. D'autre part, elle contribuera à la pollution de l'environnement et plus particulièrement au réchauffement climatique planétaire.

Aujourd'hui, la thématique de l'efficacité énergétique, semble être un levier essentiel à la fois économique et écologique, auquel le secteur du bâtiment devrait recourir afin de réduire sa consommation et par conséquent d'atténuer ses émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique.

Ainsi, le recours à des énergies propres, renouvelables, non polluante et gratuite dans les conceptions futures des bâtiments pour en assurer la sécurité énergétique et le développement socio-économique, devient incontournable et plus que jamais une alternative.

Le solaire est l'une des alternatives énergétiques importantes du futur. En effet, cette énergie est relativement abondante et inépuisable : *la quantité d'énergie solaire reçue chaque jour par la planète est 5 fois supérieure à la totalité des consommations quotidiennes humaines<sup>2</sup>.*

Ainsi, l'énergie solaire dans le secteur du bâtiment constitue une réponse adéquate au contexte de développement durable, en raison des possibilités qu'elle offre en termes d'éclairage naturel, et de production de l'électricité non polluante.

D'ailleurs, l'Algérie dispose d'un *potentiel solaire le plus fort sur la rive méditerranéenne avec ses 3500 heures d'ensoleillement par an<sup>3</sup>*. Ceci dit, que la conception des bâtiments répondant à l'efficacité énergétique en Algérie est à la fois faisable et possible, mais aussi un terrain vierge dont il faut en explorer tous les aspects.

---

<sup>1</sup> Pierre LAVINGE, 2009, « Concevoir des bâtiments bioclimatiques », le moniteur.

<sup>2</sup> Asmaa DEHKAL, 2016, « Etats des lieux des énergies renouvelables dans l'Algérie », magazine Nour des études économiques, n03, page : 192, '<https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/245/2/3/14225> '.

<sup>3</sup> Portail des Energies Renouvelables en Algérie, Vendredi 17 septembre 2010, « L'Algérie dispose d'un potentiel solaire suffisant pour alimenter l'économie mondiale », '<http://portail.cder.dz/> '.

## **Problématique :**

L'Algérie est un pays qui jouit d'une position relativement enviable en matière énergétique. Les réserves en hydrocarbures dont il dispose et les niveaux actuels de consommation nécessaires à la couverture de ses besoins propres lui permettent de rester serein pour quelques temps encore. Dans l'immédiat, le problème énergétique de l'Algérie est un problème qui se pose en termes de stratégie de valorisation de ses ressources pour les besoins du développement du pays, de choix d'une véritable politique énergétique à long terme et de définition immédiate d'un modèle cohérent de consommation énergétique couvrant le court et le moyen terme, avant la date fatidique de l'épuisement de ces ressources fossiles stratégiques. Dans ce contexte, la loi algérienne sur la maîtrise de l'énergie<sup>4</sup> et les nouveaux textes réglementaires mis en place récemment<sup>5+6</sup> sont venus fixer La consommation d'énergie peut être considérablement réduite par l'adoption des stratégies d'efficacité énergétique dans le bâtiment. Que jouent un rôle très important dans la dépense énergétique.

Pour cela nous devons réfléchir aux procédés qui permettront la réduction de cette dépense énergétique. Plusieurs paramètres agissent sur le comportement thermique du bâtiment

- Comment maîtriser une conception solaire et quelles sont les outils qui permettent cette maîtrise ?
- Comment investir les potentialités énergétiques de la façade adaptative ?

## **Hypothèse :**

La conception solaire en introduisant une manipulation sur la façade en tant que dispositif essentiel dans un bâtiment vient modifier son coefficient d'ombrage et l'angle de la surface de réflexion.

Il existe une relation entre l'utilisation d'une façade adaptative et la consommation énergétique.

---

<sup>4</sup> Journal Officiel de République Algérienne, 'Loi N°99-09 du 28 Juillet 1999 Relative à la Maîtrise de l'Energie', J.O.R.A., N°51, 2 Août 1999, Alger, Algérie.

<sup>5</sup> Journal Officiel de République Algérienne, 'Décret exécutif N°2000-90 du 24 Avril 2000 Portant Réglementation Thermique dans les Bâtiments Neufs', J.O.R.A., N°25, 30 Avril 2000, Alger, Algérie.

<sup>6</sup> Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme, Commission Technique Permanente, 'Réglementation Thermique des Bâtiments d'Habitation et Règles de Calcul des Déperditions Calorifiques', Document Technique.

# **PARTIE I :**

## **La conception solaire**

### **Chapitre I :**

#### **L'architecture et l'énergie solaire**

## **PARTIE I : La conception solaire**

### **Chapitre I : L'architecture et l'énergie solaire**

#### **Introduction :**

Le premier chapitre de notre recherche vise à définir le rôle de l'architecte en relation à l'architecture solaire et à en démontrer l'importance. Il sera question d'établir les principes fondamentaux déterminant une architecture solaire de qualité. Dans un premier temps, les caractéristiques physiques de l'énergie solaire et de son potentiel énergétique seront décrites. En second lieu on va définir la manière dont on peut tirer profit de cette énergie gratuite lors de la conception architecturale. Finalement, il s'agira d'établir les besoins spécifiques pour soutenir et favoriser la conception architecturale solaire.

#### **I.1 L'architecture et l'énergie solaire :**

L'énergie solaire est une énergie émise par le soleil sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce terme utilisé dans le contexte de l'architecture réfère aussi aux autres formes d'énergie obtenues en captant ou en transformant le rayonnement solaire, par exemple en électricité.<sup>7</sup> Il est aujourd'hui prouvé et reconnu que le rayonnement solaire parvient sur Terre en quantité suffisante pour combler, ou du moins réduire considérablement la consommation énergétique humaine provenant de ressources non renouvelables.<sup>8</sup>

Il est important de préciser que le potentiel solaire, c'est-à-dire la quantité d'énergie solaire exploitable à la surface terrestre, varie considérablement selon la position géographique et le moment de l'année et de la journée. Ce phénomène est causé par la géométrie de la Terre, mais surtout par son inclinaison par rapport à son axe de rotation autour du soleil et son mouvement de rotation sur elle-même et sa révolution autour du soleil.<sup>9</sup> Ces facteurs impliquent que les rayons solaires, émis de manière unidirectionnelle, atteignent la surface terrestre avec des angles d'incidence variables.

L'intensité ( $I_{\theta}$ ) des rayons solaires dépend de leur angle d'incidence ( $\theta$ ) par rapport à la normale (ou la perpendiculaire), à la surface exposée au rayonnement. Donc, puisque le

---

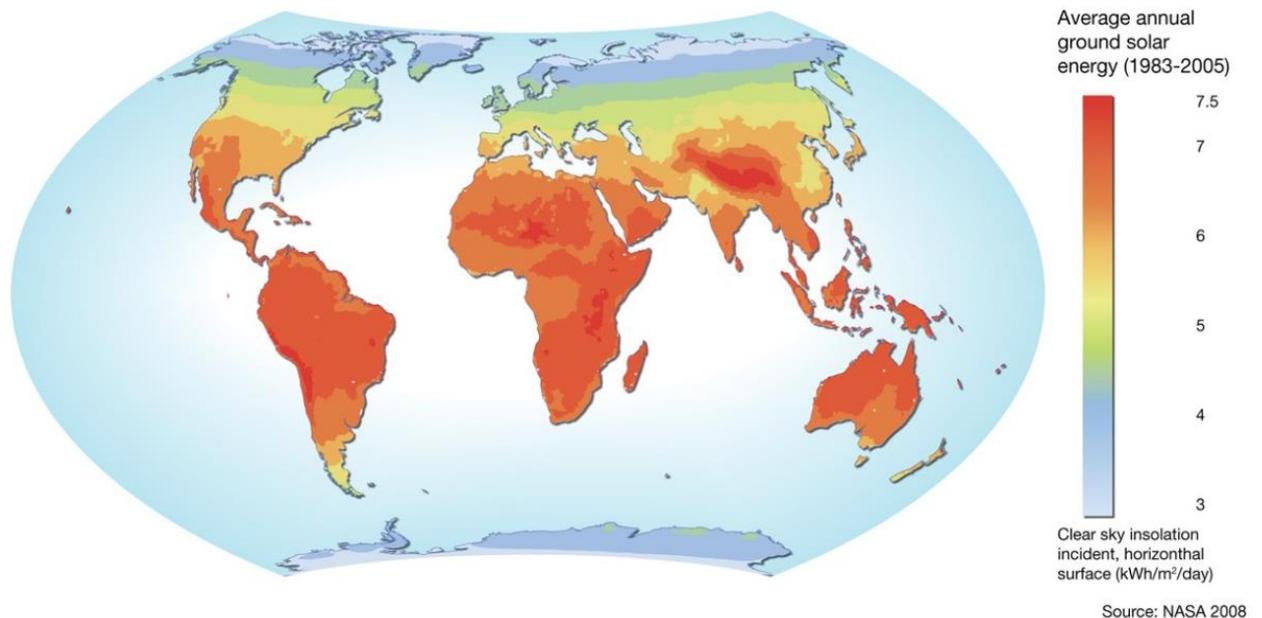
<sup>7</sup> Roditi, David. (2011). Outils solaires. En ligne : <http://www.outilssolaires.com> . Page consultée le 4-5 mars 2018.

<sup>8</sup> Philibert, Cédric (2005). The Present and Futur Use of Solar Thermal Energy as a Primary Source of Energy. Paris: International Energy Agency, 16 p.

<sup>9</sup> Dubois, Marie-Claude et Horvat, Miljana (Eds.). (2010). State-of-the-art of existing software used by architects. Québec: Task 41 Solar Energy and Architecture, P. 121.

rayonnement solaire arrive sur la terre sous forme de faisceaux parallèles, une surface perpendiculaire à ces rayons interceptera une densité maximale d'énergie.<sup>10</sup>

Le rayonnement solaire global horizontal, soit l'intensité des rayons solaires sur une surface horizontale donnée (kWh/m<sup>2</sup>) permet donc de comparer le potentiel solaire entre différents lieux sur la Terre. Toutefois, la forme, l'inclinaison et les mouvements de notre planète ne suffisent pas à expliquer les différences de potentiel solaire entre différents pays. En effet, l'atmosphère modifie considérablement la quantité d'énergie solaire atteignant la surface de la Terre. La couverture nuageuse, les gaz, la poussière et autres molécules absorbent et diffusent une partie du rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne le sol. Par exemple, la composition de l'atmosphère et la couverture nuageuse peuvent varier en fonction de l'activité des villes, de la pollution, du climat, etc.<sup>11</sup>



**Figure 01 :** Moyenne annuelle de l'énergie solaire à la surface de la Terre (kWh/m<sup>2</sup>/jour),  
**Source :** NASA, 2008 (UNEP/GRIP-Arendal, 2008)

La figure 01 montre le rayonnement solaire global horizontal moyen pour tous points sur notre planète sous un ciel clair. Cette carte n'illustre pas les fluctuations de l'énergie solaire disponible en fonction des saisons. On peut toutefois y constater que les pays les plus près de l'équateur possèdent le plus grand potentiel solaire. Les pays situés un peu plus au

<sup>10</sup> Lam, Klee Poh et al. (2004). Energy Modeling Tools Assessment For Early Design Phase. Pittsburgh: Center for Building Performance and Diagnostics Carnegie Mellon University, p. 17 .

<sup>11</sup> Lynn, Paul A. (2010). Electricity from sunlight : an introduction to photovoltaics. Chichester: Wiley, p 121.

nord, tel que le Canada, la France ou l'Allemagne, reçoivent toutefois un important rayonnement solaire annuel, soit entre 1000 et 1500 kWh/m<sup>2</sup>/an selon la latitude.<sup>12</sup>

Trois formes de rayonnement solaire peuvent être utilisées à la surface de la Terre :

- Le rayonnement direct : provient des rayons solaires directs, par exemple sous ciel clair. L'intensité des rayons solaires, leur inclinaison et direction varient en fonction de la position géographique et du moment du jour et de l'année.<sup>13</sup>
- Le rayonnement diffus : désigne les rayons qui ont été dispersés en traversant l'atmosphère et les nuages. Cette composante est toujours présente, car le rayonnement traverse toujours l'atmosphère quel que soit les conditions atmosphériques, mais son intensité varie en fonction de la couverture nuageuse. Par temps nuageux, les rayons du Soleil sont dispersés par les nuages et tout le ciel devient une source lumineuse. Le rayonnement diffus est surtout utile pour l'éclairage naturel des bâtiments. Sous ciel clair, le ciel bleu a la plus haute efficacité lumineuse et le soleil direct est à éviter.<sup>14</sup>
- Le rayonnement réfléchi : définie par les rayons réfléchis par l'environnement. Cette composante se distingue du rayonnement diffus par sa dépendance à l'environnement naturel ou bâti. Plusieurs éléments peuvent réfléchir les rayons solaires, comme le sol, les surfaces enneigées ou les bâtiments.<sup>15</sup>

## I.2. L'architecture solaire :

L'architecture solaire consiste à utiliser la conception architecturale pour tirer profit de l'énergie solaire dans le but de réduire la consommation d'énergie produite hors site, tout ceci sans compromettre la qualité architecturale. D'après les ingénieurs Michael Kuehn et Dirk Mattner (2003), le but principal de l'architecture solaire est de concevoir des bâtiments offrant un confort optimal, à la fois en été et en hiver, en consommant le moins d'énergie possible. De plus, selon les mêmes auteurs, l'énergie consommée doit préférablement provenir de ressources naturelles et renouvelables.<sup>16</sup>

L'architecture solaire comporte trois approches distinctes : le solaire passif, l'utilisation de la lumière naturelle et le solaire actif. Idéalement, ces différentes approches

---

<sup>12</sup> Porteous, Colin. (2005). *Solar Architecture in Cool Climates*. London: Earthscan, p 186.

<sup>13</sup> Lam, Klee Poh et al. (2004). *Energy Modeling Tools Assessment For Early Design Phase*. Pittsburgh: Center for Building Performance and Diagnostics Carnegie Mellon University, p. 23 .

<sup>14</sup> Ibid, p. 24.

<sup>15</sup> Ibid.

<sup>16</sup> Schittich Christian, *Architecture solaire : Stratégies, Visions, Concepts*, BIRKHÄUSER, December 2012, p10.

d'exploitation de l'énergie solaire devraient être indissociables les unes des autres. Tel qu'avancé par l'architecte et journaliste Christian Schittich (2003), l'architecture solaire ne peut se résumer à l'installation de modules photovoltaïques sur le toit. Afin de réaliser une architecture combinant confort, efficacité énergétique et esthétisme, le bâtiment doit être perçu comme un système complet et optimal tirant profit de l'énergie solaire sous toutes ses formes.<sup>17</sup>

## **I.2 Le solaire passif :**

L'utilisation directe du rayonnement solaire en architecture comme source de chaleur, communément appelée « solaire passif », est probablement la forme d'architecture solaire la plus simple et la plus efficace<sup>18</sup>. On parle de simplicité et d'efficacité puisque ce type d'exploitation de l'énergie solaire ne nécessite pas de système mécanique ni de conversion d'énergie supplémentaire. Le solaire passif consiste à profiter directement du rayonnement solaire en optimisant la volumétrie du bâtiment, son orientation et les matériaux utilisés. Les gains solaires obtenus contribuent ainsi au chauffage des espaces<sup>19</sup>. Bien que les gains thermiques soient recherchés en saison froide, il faut aussi que le bâtiment soit en mesure de les minimiser en saison chaude sans avoir recours aux systèmes mécaniques du bâtiment.

Pour pouvoir utiliser le plein potentiel solaire d'un lieu à construire, il est primordial de connaître parfaitement les caractéristiques climatiques du site. Une analyse approfondie du site permet au concepteur de déterminer quelles sont les ressources disponibles localement et de quelle façon elles pourront interagir avec le bâtiment au cours d'une journée et de l'année<sup>20</sup>. Par ressources, on entend le potentiel solaire énergétique et lumineux, la végétation, le facteur éolien, etc. L'analyse climatique du site permet, entre autres, de distinguer les portions du site qui reçoivent le plus de rayonnement solaire, de celles les plus ombragées au cours de l'année. Donc, une bonne compréhension du site permet d'adapter le bâtiment au potentiel énergétique du lieu, ce qui est nécessaire pour utiliser efficacement le solaire passif.<sup>21</sup>

---

<sup>17</sup> Ibid., p 15

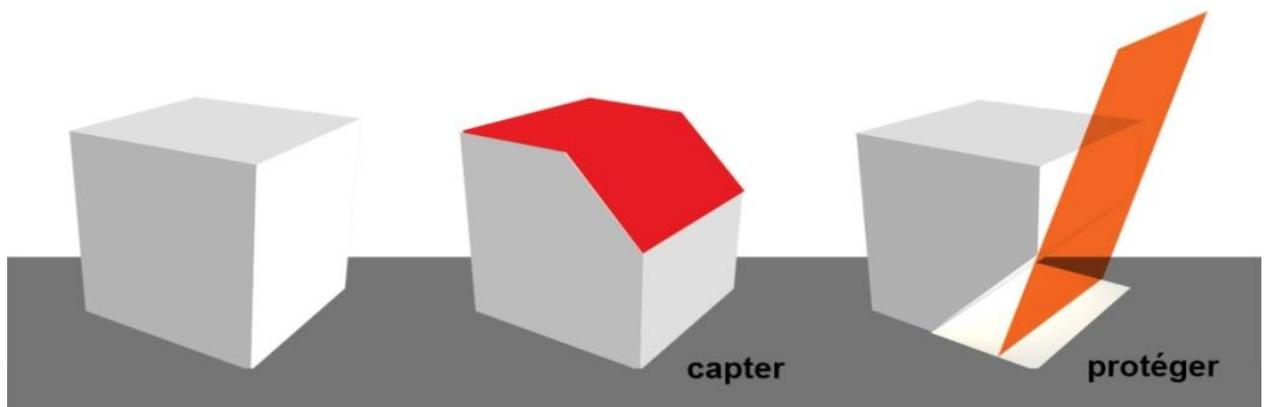
<sup>18</sup> Hegger, Manfred. «From Passive Utilization to Smart Solar Architecture». In detail Solar Architecture. Sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser, (2003), p 46.

<sup>19</sup> International Energy Agency. (2009). Task 41: Solar Energy and Architecture. Coll. «Solar Heating & Cooling Programme». Task 41: Solar Energy and Architecture, 15 p.

<sup>20</sup> Brown, G. Z. (2001). Sun, wind & light: architectural design strategies. New York: Wiley, 382 p.

<sup>21</sup> Hegger, Manfred. «From Passive Utilization to Smart Solar Architecture». In detail Solar Architecture. Sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser, (2003), p 50.

Toujours selon Hegger, les facteurs les plus importants de la conception solaire passive, en plus du choix du site et de l'implantation du bâtiment, sont son orientation, sa volumétrie, la position des ouvertures, le choix des matériaux ainsi que la composition des murs. En effet, le bâtiment lui-même influence ses besoins énergétiques. Son orientation, sa relation au site, sa forme et sa construction influencent grandement la manière dont le climat dans lequel il se situe peut induire un besoin énergétique en chauffage ou en climatisation. Par exemple, **la figure 02** montre comment la volumétrie peut être adaptée pour capter plus d'énergie solaire ou l'éviter.<sup>22</sup>



**Figure 02 :** Adaptation volumétrique d'un module simple pour une utilisation optimale de l'énergie solaire en fonction des besoins,

**Source :** Light'n books, l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine, projet de fin d'études (M. Arch.) (Gagnon, 2011)

Le chauffage solaire passif repose sur quatre principes fondamentaux : capter l'énergie solaire, l'accumuler, la distribuer et la conserver. Ces principes touchent donc autant la conception formelle que technique du bâtiment.



**Figure 03 :** Représentation schématique des quatre principes du chauffage solaire passif

**Source :** Cofaigh, Eoin O. et al. (1996). The climatic dwelling: an introduction to climate-responsive residential architecture.

<sup>22</sup> Ibid.

Des gains solaires passifs surviennent lorsque les rayons entrants excèdent les pertes de chaleur du bâtiment. L'énergie pénètre dans un bâtiment par le biais des ouvertures. Bien qu'indispensables pour le solaire passif, elles représentent aussi des risques de pertes thermiques en hiver, surtout la nuit ou pour les orientations non exposées au rayonnement, et de surchauffe en été. Selon Hegger, le concepteur doit donc contrôler parfaitement leurs dimensions, leur organisation, leur orientation et leur exécution. En été, lorsque les gains solaires sont à éviter, un mécanisme de protection doit être envisagé. Tel que mentionné précédemment, le bâtiment peut éviter les gains solaires par sa volumétrie. Par ailleurs, des systèmes de brise-soleil intégrés à l'enveloppe doivent aussi être envisagés. L'important est que les gains passifs soient maximaux en hiver et minimaux en été, sans devoir apporter de modifications majeures au bâtiment.<sup>23</sup>

L'accumulation de l'énergie à l'intérieur du bâtiment fait plutôt référence aux choix des matériaux et des finis intérieurs. L'utilisation de matériaux avec une masse thermique élevée est à privilégier, car ils ont une bonne capacité à capter et à emmagasiner la chaleur. Un matériau capable d'emmagasiner une bonne quantité d'énergie la diffusera plus tard. Puisque les gains directs ne sont possibles que le jour, il est intéressant de pouvoir accumuler la chaleur le jour qui sera ensuite utilisée la nuit, lorsque la température extérieure est plus basse.

La distribution de la chaleur dans le bâtiment nécessite des mouvements d'air. La ventilation, qu'elle soit naturelle ou mécanique, assure la répartition de la chaleur dans et entre les espaces. La composition de l'enveloppe, quant à elle, assure la conservation de l'énergie<sup>24</sup>. La continuité de l'isolation de l'enveloppe permet de diminuer les déperditions thermiques de l'intérieur vers l'extérieur et vice versa. Cette stratégie de conservation minimise aussi les gains thermiques estivaux.

Les principes généraux présentés précédemment définissent la nature même du bâtiment et les raisons de le construire<sup>25</sup>. Il est donc clair que le solaire passif est intimement lié au design du bâtiment, à sa qualité et par le fait même, au travail des architectes. Pour pouvoir utiliser efficacement l'énergie produite par le soleil, il faut adapter le bâtiment pour

---

<sup>23</sup> Ibid, p. 52

<sup>24</sup> Hasting, Robert et Wall, Maria (Eds.). (2007). Vol. 1 Strategies and Solution de Sustainable Solar Housing. London: Earthscan, p. 85.

<sup>25</sup> Schittich, Christian. (2003). «Toward Solar Architecture». In Detail Solar Architecture. sous la dir. de Schittich. Basel: Birkhäuser, p. 23.

gérer cette énergie<sup>26</sup>. En effet, les stratégies passives sont essentielles à une utilisation optimale du solaire<sup>27</sup>. Il est donc important que le concepteur comprenne bien les caractéristiques du rayonnement solaire et qu'il maîtrise les différents principes architecturaux lui permettant d'en tirer profit au maximum tout au long de l'année.

### **I.2.2 La lumière naturelle :**

Contrairement à l'éclairage électrique, la lumière provenant naturellement du soleil ne consomme pas d'électricité et est gratuite. Elle est indissociable des gains thermiques passifs puisque l'éclairage naturel est évidemment possible que lorsque le rayonnement solaire et lumineux traverse l'enveloppe par les ouvertures. Son utilisation est donc une autre forme d'exploitation directe du rayonnement solaire. Alors que les gains solaires passifs contribuent au chauffage des espaces, l'éclairage naturel permet de réduire considérablement la consommation d'électricité destinée à l'éclairage.<sup>28</sup>

En architecture, l'utilisation de la lumière naturelle repose généralement sur des ouvertures fixes, alors que le soleil se déplace dans le ciel en permanence. Plusieurs facteurs peuvent être pris en considération afin d'utiliser de manière optimale la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments. Ils peuvent être regroupés selon quatre catégories : la quantité des ouvertures, leur type et leur emplacement, le traitement des surfaces intérieures ainsi que le détail de l'ouverture.<sup>29</sup>

La quantité d'ouvertures est le premier facteur influençant la quantité de lumière naturelle qui entre dans une pièce. Logiquement, plus la surface des fenêtres est grande, plus il y aura de lumière<sup>30</sup>. Toutefois, il faut garder à l'esprit que les ouvertures sont aussi le véhicule de transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. La proportion d'ouvertures sur la façade est donc un facteur sensible qui doit être étudié avec soin pour réaliser un juste équilibre entre l'apport de lumière et l'apport thermique. De plus, des simulations numériques indiquent qu'au-delà d'une superficie d'ouverture supérieure à 40 % de celle du mur, l'agrandissement des ouvertures n'augmente plus nécessairement la quantité de lumière

---

<sup>26</sup> Ibid., p. 54

<sup>27</sup> Krippner, Rolland. «Solar Technology - From Innovation Skin to Energy-Efficient Renovation». In *Detail Solar Architecture* sous la dir. de Schittich. (2003). Basel : Birkhäuser, 76 p.

<sup>28</sup> Goetzberger, A. et Schmid, J. « Review of Components for Passive Solar Energy Use ». *International Journal of Solar Energy*. 1985. p. 186

<sup>29</sup> Hasting, Robert et Wall, Maria (Eds.). Vol. 1 *Strategies and Solution de Sustainable Solar Housing*. London: Earthscan, (2007). p. 58.

<sup>30</sup> Ibid. p 60.

naturelle dans une pièce située en périphérie du bâtiment, et ce pour toutes les orientations et climats.<sup>31</sup>

La dimension des surfaces vitrées a aussi un impact sur l'effet d'éblouissement. L'œil s'adapte continuellement à la quantité de lumière qui lui parvient par la dilatation de la pupille. Plus il y a de lumière, plus la pupille est petite, et vice versa. Par conséquent, des contrastes extrêmes à l'intérieur du champ de vision sont très inconfortables parce que l'œil tente de s'adapter simultanément aux surfaces claires et sombres<sup>32</sup>. Il s'agit d'une forme d'éblouissement inconfortable, c'est-à-dire qui crée un inconfort visuel sans toutefois générer de perte d'information dans l'image regardée. Pour prévenir ces situations visuelles inconfortables, il est préférable que la lumière soit répartie plutôt uniformément dans les espaces intérieurs. Un éclairage trop uniforme, tel que produit par l'éclairage général des fluorescents, n'est pas non plus désirable. L'éclairage naturel, bien dosé, permet d'atteindre un degré de variabilité optimal.

La position des ouvertures est cruciale pour l'optimisation de la lumière naturelle et le confort des occupants dans une pièce. La position des fenêtres détermine la distribution de la lumière naturelle dans l'espace. Par exemple, une fenêtre située près du plafond a une efficacité d'éclairage supérieure à une ouverture située près du sol. Une ouverture en hauteur permet donc à la lumière de pénétrer plus en profondeur dans la pièce, et une fenêtre basse offre un éclairage localisé plus près de l'ouverture. Cependant, l'avantage que possède une fenêtre basse et située à la hauteur des yeux des occupants, contrairement à une fenêtre en hauteur, est la vue sur l'extérieur. En effet, il est maintenant reconnu que le contact visuel avec l'extérieur est très important pour les occupants<sup>33</sup>. Souvent, on constate que le confort de l'occupant est plus faible lorsqu'il n'a pas de vue sur l'extérieur, bien que la luminosité de la pièce soit plus grande. La vue sur l'extérieur doit donc devenir un facteur important pour le concepteur, sans toutefois négliger l'apport en lumière ou la composition architecturale du

---

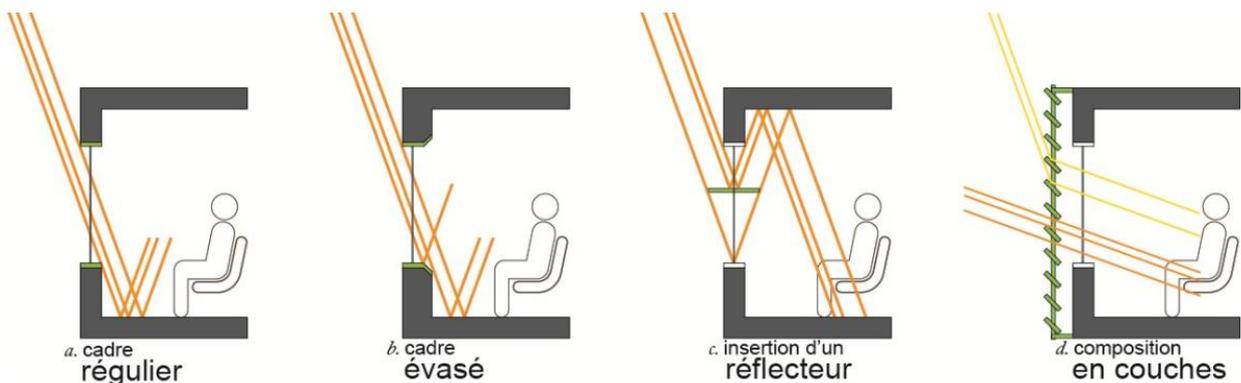
<sup>31</sup> Dubois, Marie-Claude et Flodberg, Kajsa. «Daylight utilisation in perimeter office rooms at high latitudes: Investigations by computer simulation». *Lighting Research and Technology*. (2012). p. 12

<sup>32</sup> Müller, Helmut F. O. et Schuster, Heide G. «Utilizing Daylight». In *detail Solar Architecture*. Sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser, 2003. p. 131

<sup>33</sup> Müller, Helmut F. O. et Schuster, Heide G. «Utilizing Daylight». In *detail Solar Architecture*. Sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser, 2003. p. 134

projet. En effet, il ne faut pas omettre que la fenêtre, en plus de procurer lumière et vues au projet, détermine aussi son articulation entre l'intérieur et l'extérieur<sup>34</sup>.

Tout comme l'architecture ne peut être perçue sans lumière, la forme architecturale influence la qualité de la lumière<sup>35</sup>. Les caractéristiques architecturales de la pièce deviennent alors un facteur important pour favoriser la distribution de la lumière. La création de cours intérieures, en augmentant le périmètre sur l'extérieur, peut par exemple permettre d'apporter la lumière plus en profondeur dans le bâtiment. Les surfaces d'une pièce peuvent être formées pour capter, réfléchir ou même filtrer la lumière naturelle<sup>36</sup>. Par exemple, un plafond de forme courbe et convexe adjacent à une ouverture permet de capter la lumière et la redistribuer dans l'espace en dessous. Le traitement des surfaces est aussi un facteur primordial. Des couleurs neutres et claires réfléchissent mieux la lumière. Selon les besoins, les planchers, murs ou plafonds peuvent être utilisés pour réfléchir et distribuer la lumière.



**Figure 04 :** Schémas représentant différentes compositions d'ouvertures vues en coupe.

Source : [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com)

Par exemple, une ouverture évasée vers l'intérieur et de couleur claire, tel qu'illustré à la figure 4.b, permet d'augmenter jusqu'à 10 % la luminosité dans le coin opposé de la pièce<sup>37</sup>. Selon les simulations réalisées par les mêmes auteurs, l'éblouissement dû au contraste entre le mur et la fenêtre est ainsi considérablement réduit ce qui accroît le confort visuel de l'occupant. L'intégration d'un réflecteur horizontal dans le profil de la fenêtre permet aussi

<sup>34</sup> Von Meiss, Pierre. De la forme au lieu : Une introduction à l'étude de l'architecture. 2e éd. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003. p. 124

<sup>35</sup> Guzowski, Mary. Daylighting for sustainable design. New York: McGraw-Hill, 2000, p. 203

<sup>36</sup> Ibid. p. 206

<sup>37</sup> Hasting, Robert et Wall, Maria (Eds.). Vol. 1 Strategies and Solution de Sustainable Solar Housing. London: Earthscan, (2007). p. 60.

d'apporter plus de lumière en profondeur dans l'espace<sup>38</sup>. Ce type de système réfléchit la lumière sur le plafond qui réoriente ensuite les rayons lumineux vers le fond de la pièce. Tel qu'illustré à la figure 4.c, un réflecteur judicieusement conçu peut aussi servir de brise-soleil en saison chaude. Une composition en couches, montrée à la figure 4.d, peut aussi être envisagée<sup>39</sup>. Un dispositif d'ombrage peut, par exemple, être inclus dans la composition de la fenêtre afin d'éliminer la surchauffe en été. Finalement, un matériau translucide peut être utilisé de manière à filtrer le rayonnement solaire et ainsi obtenir une lumière diffuse et douce.

Chose certaine, l'utilisation de la lumière naturelle comporte des avantages certains, mais aussi des risques non négligeables. D'un côté, elle apporte une qualité lumineuse essentielle au confort des occupants et de l'autre côté, une utilisation non contrôlée provoque de l'inconfort dû à l'éblouissement ou à la surchauffe.<sup>40</sup> Il s'agit d'un point particulièrement sensible pour les utilisateurs d'ordinateurs contraints à une position de travail fixe. La conception des ouvertures et des espaces doit donc permettre l'apport de lumière en tout temps, tout en évitant les gains thermiques excessifs en saison estivale. Les systèmes d'ombrage, qu'ils soient construits ou d'origine végétale, sont donc indispensables.

### **I.2.3 Le solaire actif :**

Les systèmes solaires actifs captent le rayonnement solaire et le transforment pour l'utiliser sous une autre forme ou dans un autre endroit. On compte deux types d'utilisation indirecte de l'énergie solaire : le solaire thermique et photovoltaïque. Dans le premier cas, des collecteurs transforment le rayonnement en chaleur et dans le second cas, ils l'utilisent pour générer de l'électricité. Tout comme pour l'utilisation directe, l'efficacité des systèmes actifs varie considérablement en fonction de la localisation du site ainsi que de leur orientation et inclinaison propres<sup>41</sup>. L'utilisation de systèmes solaires actifs permet d'améliorer le bilan énergétique de l'édifice et ainsi réduire la dépendance aux sources d'énergie non renouvelable.

Les systèmes thermiques actifs utilisent la chaleur du rayonnement solaire pour préchauffer l'air ou chauffer l'eau. L'air est utilisé pour le chauffage des espaces intérieurs et

---

<sup>38</sup> American Institute of Architects. (1982). Daylighting. Coll. «Architect's handbook of energy practice». New York: The Institute, p 30.

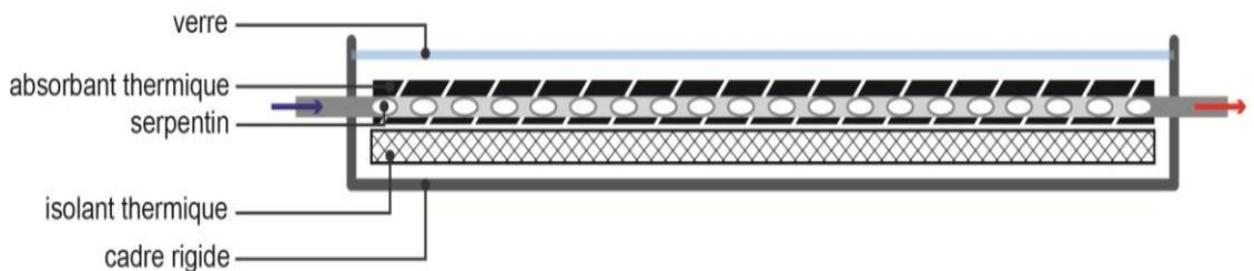
<sup>39</sup> Guzowski, Mary. Daylighting for sustainable design. New York: McGraw-Hill, 2000, p. 214.

<sup>40</sup> De Carli, Michele et De Giuli, Valeria. «Optimisation of Daylight in Buildings to Save Energy and to Improve Visual Comfort: Analysis in Different Latitudes». In Eleventh International IBPSA Conference. (Glasgow, 27-30 juillet 2009). Glasgow: IBPSA, (2009).

<sup>41</sup> Krippner, Rolland. «Solar Technology - From Innovation Skin to Energy-Efficient Renovation». In detail Solar Architecture sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser, 2003. p. 117

permet ainsi de réduire la consommation énergétique des systèmes de ventilation de l'édifice. L'eau est quant à elle utilisée pour le chauffage de l'eau chaude domestique, via un échangeur de chaleur, ou comme liquide caloporteur mélangé à du glycol et circulant dans un serpentin relié au système de chauffage des locaux. Dans les deux cas, la matière circule dans un collecteur situé du côté extérieur du bâtiment et exposé de manière optimale au rayonnement solaire. On retrouve deux principaux types de collecteurs solaires thermiques : les collecteurs plats et les collecteurs à tubes sous vide.<sup>42</sup>

Les collecteurs plats, généralement de forme rectangulaire, sont composés d'un cadre rigide dont le fond est recouvert d'un isolant thermique. La surface supérieure du cadre est en verre. Sur l'isolant, on retrouve un long tube continu, composé d'un matériau absorbant la chaleur, dans lequel circule l'air, l'eau ou tout autre médium de transfert de chaleur<sup>43</sup>. En climat froid, puisque l'eau risque de geler dans le collecteur, on utilise plutôt une solution au glycol qui transférera ensuite la chaleur absorbée à l'eau dans le réservoir. Le glycol empêche l'eau de geler. Le fluide caloporteur réchauffé par le rayonnement solaire est donc acheminé vers un échangeur de chaleur à l'intérieur et la chaleur ainsi récupérée est ensuite utilisée par les différents systèmes mécaniques du bâtiment. Ce type de collecteur requiert une bonne superficie et est généralement installé sur les toits bien qu'il puisse être installé en façade dans les latitudes nordiques.<sup>44</sup>



**Figure 05 :** Représentation schématique d'un collecteur plat,  
**Source :** google.image.com

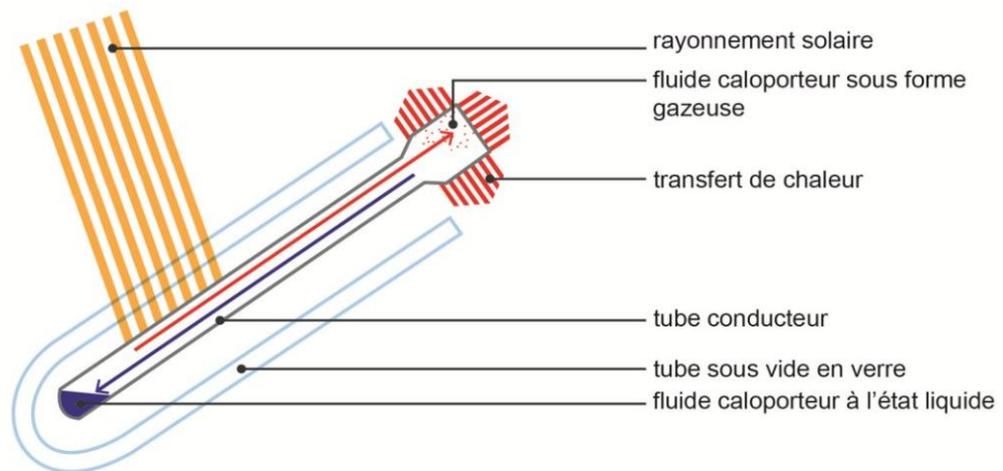
Les collecteurs à tubes sous vide sont formés d'un tube composé d'un matériau conducteur de chaleur, dans lequel circule un liquide utilisé seulement pour le transfert de chaleur. Ce tube conducteur est situé à l'intérieur d'un autre tube, celui-ci en verre. Le système est sous vide, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'air entre les deux tubes, ce qui favorise

<sup>42</sup> Pronovost, Francis. (2010). « Développement d'un concentrateur solaire dans une perspective d'exploitation durable de l'énergie solaire ». Mémoire de maîtrise. Québec : Université Laval, p. 70.

<sup>43</sup> Krippner, Rolland. «Solar Technology - From Innovation Skin to Energy-Efficient Renovation». In detail Solar Architecture sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser, 2003. p. 119

<sup>44</sup> Ibid, P. 120.

l'absorption de la chaleur du rayonnement solaire et réduit les déperditions thermiques par conduction et convection. L'énergie solaire, concentrée par le tube de verre, est absorbée par le liquide situé dans le deuxième tube. Le liquide s'évapore et le gaz remonte jusqu'au bout du tube où il se condense en transférant sa chaleur à l'eau domestique. Ce type de système, plus approprié pour chauffer l'eau, est plus coûteux, car il est conçu de plusieurs éléments individuels, mais ces modules plus petits peuvent être intégrés plus facilement à l'enveloppe d'un bâtiment.<sup>45</sup>



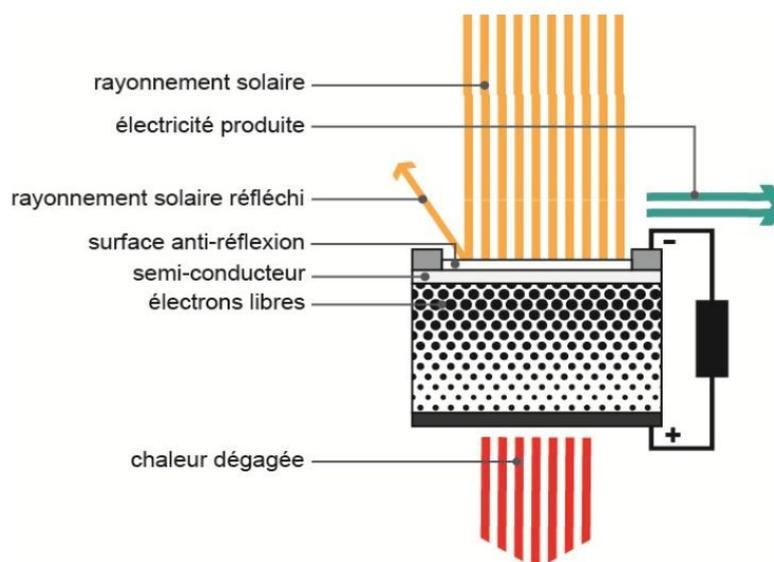
**Figure 06 :** Représentation schématique de la composition et du fonctionnement d'un collecteur à tubes sous vide.  
**Source :** Google.image.com

Un système photovoltaïque transforme directement le rayonnement solaire en électricité.

Ce processus s'effectue à l'intérieur d'une cellule photoélectrique composée d'un matériau semi-conducteur. Ce dernier absorbe les photons du rayonnement solaire, ce qui libère des électrons qui circulent maintenant dans la matière. En raison de la composition particulière des cellules photovoltaïques, les électrons ne peuvent se déplacer que dans une seule direction, ce qui génère un courant électrique. À ce jour, l'efficacité des cellules photovoltaïques est d'environ 20 %. Cela signifie que 20 % de l'énergie du soleil absorbée par les cellules est transformée en électricité et 80 % en chaleur qui est dégagée par le système.<sup>46</sup>

<sup>45</sup> Ibid., p. 122

<sup>46</sup> Roberts, Simon et Guariento, Nicolò Building integrated photovoltaics: a handbook. Basel: Birkhäuser, (2009). p. 126.



**Figure 07 :** Représentation schématique de la composition d'une cellule photovoltaïque ainsi que des différents flux énergétiques **Source :** Roberts, Simon et Guariento, Nicolò (2009). Building integrated photovoltaics : à handbook

Selon la technologie utilisée, les cellules photovoltaïques peuvent prendre différentes formes. Elles peuvent être rigides ou souples ou présenter différentes couleurs ou textures. Elles peuvent aussi être semi-transparentes ou translucides et être ainsi posée sur du verre pour pouvoir bénéficier de la lumière naturelle à l'intérieur des espaces tout en produisant de l'électricité. Les modules peuvent, bien sûr, être installés de manière indépendante au bâtiment, mais il est clair que toutes ces options permettent d'adapter cette technologie aux besoins spécifiques du bâtiment.<sup>47</sup>

### I.3 Intégration architecturale :

L'installation des systèmes solaires actifs est un enjeu important. Dans un premier temps, il est possible d'utiliser une structure secondaire, et indépendante du bâtiment, pour soutenir les modules, peu importe qu'il s'agisse de panneaux photovoltaïques ou de chauffe-eau solaire. Ces structures additionnelles peuvent être installées sur le toit, ou en façade telle une deuxième peau<sup>48</sup>. Leur seul et unique rôle est alors de transformer le rayonnement solaire en énergie. D'un autre côté, les systèmes solaires actifs peuvent être intégrés à l'enveloppe du bâtiment<sup>49</sup>. Dans ce cas, les modules deviennent une partie intégrante de l'enveloppe du bâtiment. En plus de produire de l'énergie, ils peuvent aussi devenir parement, garde-corps, toiture, dispositif d'ombrage et plus encore.

<sup>47</sup> Ibid, p. 133.

<sup>48</sup> Ibid., p. 134

<sup>49</sup> Krippner, Rolland. «Solar Technology - From Innovation Skin to Energy-Efficient Renovation». In detail Solar Architecture sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser, 2003. p. 122

Selon Krippner l'intégration architecturale des systèmes solaires actifs, consiste à atteindre une certaine harmonie entre les besoins et caractéristiques de la structure physique du bâtiment et les critères esthétiques et fonctionnels des systèmes actifs. Les modules solaires participent ainsi à la composition visuelle d'ensemble du bâtiment, améliorant l'esthétisme de l'architecture solaire. De plus, l'intégration architecturale évite le dédoublement des matériaux. Au lieu de se retrouver en présence d'une enveloppe complète, isolée et étanche, ainsi que d'une installation solaire active supplémentaire par-dessus, on compte simplement une enveloppe, isolée, étanche, et produisant de l'énergie.<sup>50</sup>

### **Conclusion :**

Dans ce premier chapitre, il a été établi que le concepteur doit bien comprendre les caractéristiques du rayonnement solaire, en ce qui a trait, par exemple, au parcours solaire et à la distribution du rayonnement selon toutes les approches (passive, active et lumière naturelle) pour être en mesure d'en tirer profit judicieusement.

Ainsi que dans un bâtiment, il est possible d'exploiter le rayonnement solaire de manière passive et active. Une utilisation passive consiste à accumuler des gains solaires directs et diffus lorsque nécessaire, donc en hiver, il est préférable d'utiliser la lumière naturelle pour éclairer les espaces intérieurs, plutôt qu'un éclairage artificiel. L'utilisation active repose, quant à elle, sur la transformation du rayonnement solaire en chaleur ou en électricité. Ces deux approches stratégiques sont profondément liées à la conception des bâtiments, et donc au travail de l'architecte. En effet, l'exploitation passive du rayonnement solaire est définie par la volumétrie de l'immeuble, son orientation et ses ouvertures. Tous ces facteurs relèvent clairement du travail de l'architecte. Par ailleurs, l'intégration architecturale des systèmes actifs, tels que les modules photovoltaïques ou les panneaux solaires thermiques, est aussi sous la responsabilité de l'architecte. Il est le principal responsable de leur intégration à la composition visuelle d'ensemble, mais aussi de leur utilisation en tant que composante intégrante de l'enveloppe.

---

<sup>50</sup> Ibid, p, 122.

## **Chapitre II :**

### **La conception solaire**

## **Chapitre II : La conception solaire**

### **Introduction :**

Dans ce chapitre on va aborder le potentiel énergétique du soleil et son usage en architecture de manière directe et indirecte. La méthode directe inclut les gains solaires passifs et l'emploi de la lumière naturelle alors que la méthode indirecte comprend l'utilisation de la chaleur ainsi que la production d'électricité. Dans tous les cas, il est indispensable que le bâtiment soit conçu spécifiquement pour pouvoir utiliser efficacement cette énergie.<sup>51</sup> Considérant que l'architecte est au centre du processus de conception du bâtiment et que son rôle consiste à définir le projet et à en gérer le développement, il semble indispensable qu'il soit en mesure d'intégrer correctement les principes solaires et architecturaux à son travail de conception. Trois éléments jouent un rôle décisif dans le succès de la conception solaire. Il s'agit de l'attention portée au solaire lors des premières étapes de conception, des connaissances du concepteur ainsi que des outils et méthodes de travail.

### **II.1. Les premières étapes de conception :**

Communément, l'architecte détermine lors des premières étapes de conception l'orientation du bâtiment, sa volumétrie et les principales ouvertures. Ces décisions générales sont celles qui ont le plus grand impact sur la performance énergétique de l'édifice<sup>52</sup>. L'utilisation passive de l'énergie solaire repose fondamentalement sur ces premières décisions conceptuelles. Le concepteur, lors des premières esquisses, doit donc être en mesure d'évaluer et de comprendre comment ces choix influenceront le comportement énergétique du futur bâtiment.

L'analyse du site est impérative. Le contexte environnemental du projet influence grandement l'énergie qu'un bâtiment utilise<sup>53</sup>. L'étude climatique du site permet de déterminer quelles zones du terrain sont les plus exposées au rayonnement solaire et à quelles périodes. La compréhension du contexte paysager, bâti et climatique permet au concepteur de bien orienter le futur édifice et d'adapter sa volumétrie aux besoins fonctionnels et énergétiques du projet. De plus, l'analyse du site permet aussi de déterminer sommairement quelles surfaces du projet seront les plus adaptées à recevoir des systèmes solaires actifs. En les prévoyant dès le début de la conception, l'intégration architecturale de ces systèmes est

---

<sup>51</sup> Yeang Ken et Spector Arthur. *Green design: from theory to practice*. London: Black Dog Pub, 2011. p. 134

<sup>52</sup> Shaviv Edna. «Design Tools for Bio-Climatic and Passive Solar Buildings». *Solar Energy*. 67(4-6). p. 189.

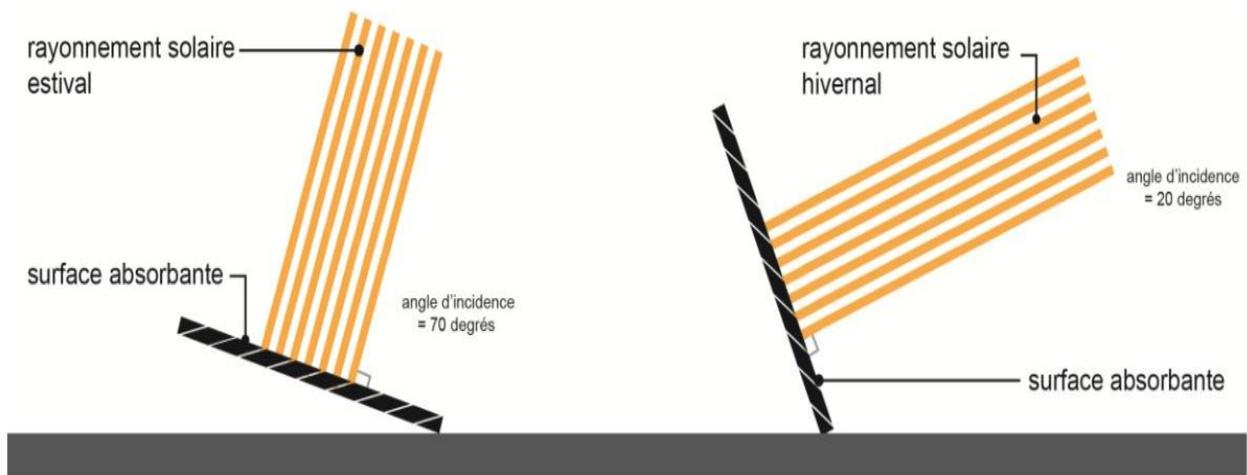
<sup>53</sup> Brown, Marilyn A. «Market failures and barriers as a basis for clean energy policies». *Energy Policy*. (2001). p. 1197-1207

favorisée. Il est alors plus facile pour les architectes de les concevoir comme une partie intégrante de l'enveloppe et de la composition visuelle du bâtiment.

## II.2. Les connaissances du concepteur :

Les connaissances du comportement du rayonnement solaire est essentielle pour réaliser une architecture solaire efficace, intégrée et de qualité. Un concepteur comprenant bien les caractéristiques du rayonnement solaire est en mesure de créer un bâtiment qui tire judicieusement profit de cette énergie. Considérant qu'il s'agit d'une énergie dont le potentiel est variable, il est possible de l'exploiter sous plusieurs formes. De plus, les besoins énergétiques d'un édifice variant en fonction des saisons, le concepteur doit avoir une perception à la fois globale et spécifique des systèmes et de la ressource solaire. Il doit prévoir les gains solaires en hiver, adapter le bâtiment pour les éviter en été, utiliser la lumière naturelle, et savoir transformer le rayonnement pour produire de l'électricité et/ou de l'eau chaude tout au long de l'année.<sup>54</sup>

Par exemple, sachant que le rayonnement solaire est plus concentré lorsqu'il a un angle d'incidence perpendiculaire à un plan, les surfaces absorbantes doivent être plutôt verticales pour l'hiver et horizontales l'été. En effet, comme le montre la figure 8, le rayonnement solaire estival tend à être zénithal, comparativement à l'hiver.

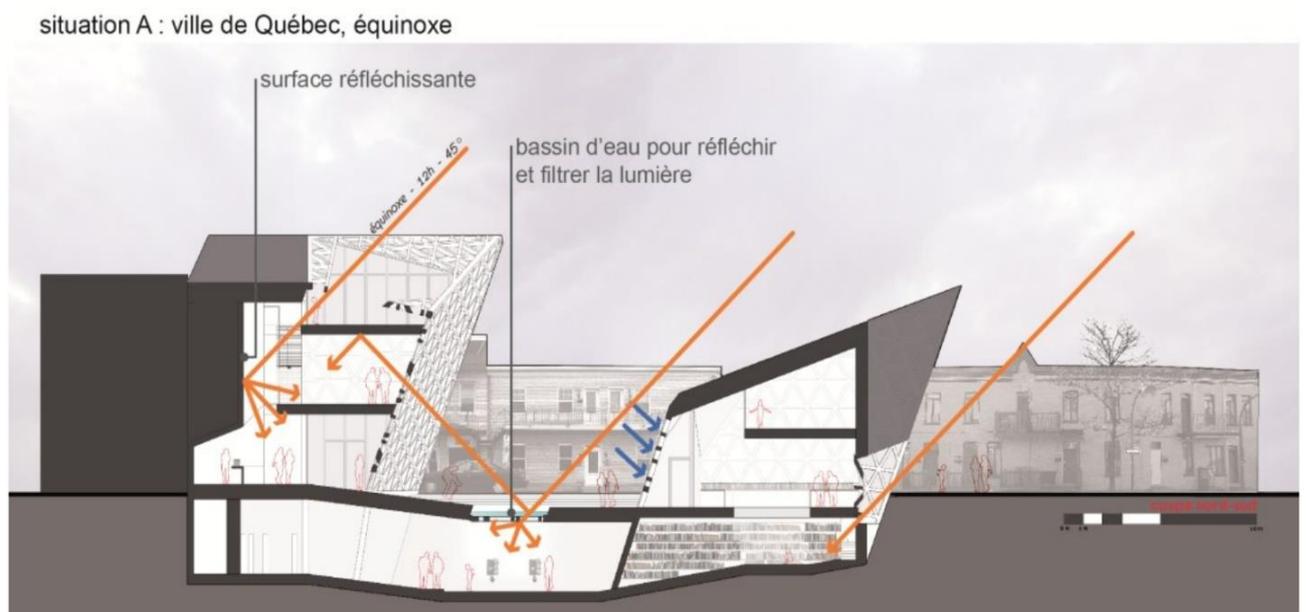


**Figure 08 :** Représentations schématiques d'une surface absorbante perpendiculaire au rayonnement solaire, en été et en hiver.

**Source :** google.image.com

<sup>54</sup> Shirley GAGNON, ÉNERGIE SOLAIRE ET ARCHITECTURE, Les outils numériques et leur utilisation par les architectes pour la conception solaire. Mémoire présenté à l'Université Laval pour l'obtention du grade de Maître ès sciences, p 44.

De plus, la volumétrie du bâtiment peut être adaptée au parcours du soleil et aux besoins de l'édifice en permettant les gains en hiver et en s'en protégeant en été. La figure 9 présente un projet de fin d'étude en architecture qui vise à démontrer qu'un volume architectural peut être sculpté de manière à exploiter de manière optimale le rayonnement solaire tout au long de l'année<sup>55</sup>. Le projet est une librairie en contexte urbain, dans le quartier Limoilou de la ville de Québec (Québec, Canada). La figure 9 présente, en coupe, comment le projet architectural interagit avec le rayonnement solaire en présentant la même coupe longitudinale nord-sud sous trois situations différentes : l'équinoxe, le solstice d'été et le solstice d'hiver. Dans ce projet, la volumétrie a été adaptée au rayonnement solaire afin d'optimiser l'utilisation de gains solaires directs en hiver et de les éviter en période estivale. De plus, l'utilisation de la composante réfléchie du rayonnement solaire permet d'exploiter la lumière naturelle dans les espaces, en évitant les gains thermiques.

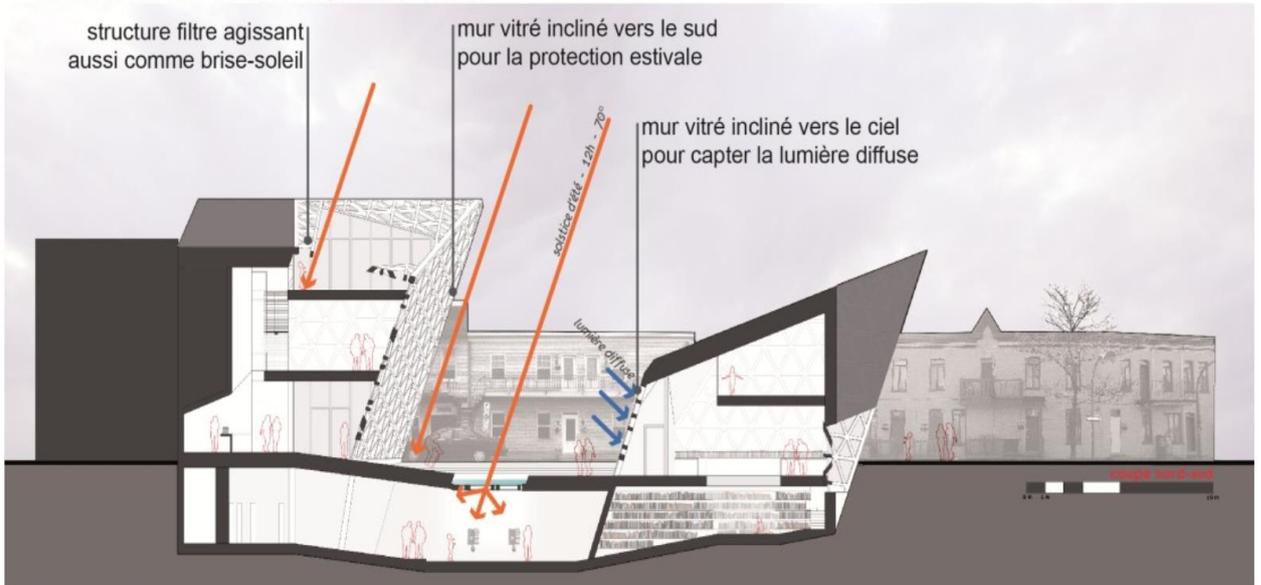


**Figure 9a :** Coupe longitudinale nord-sud en situation d'équinoxe du projet Light'n books : l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine

**Source:** Gagnon, 2011.

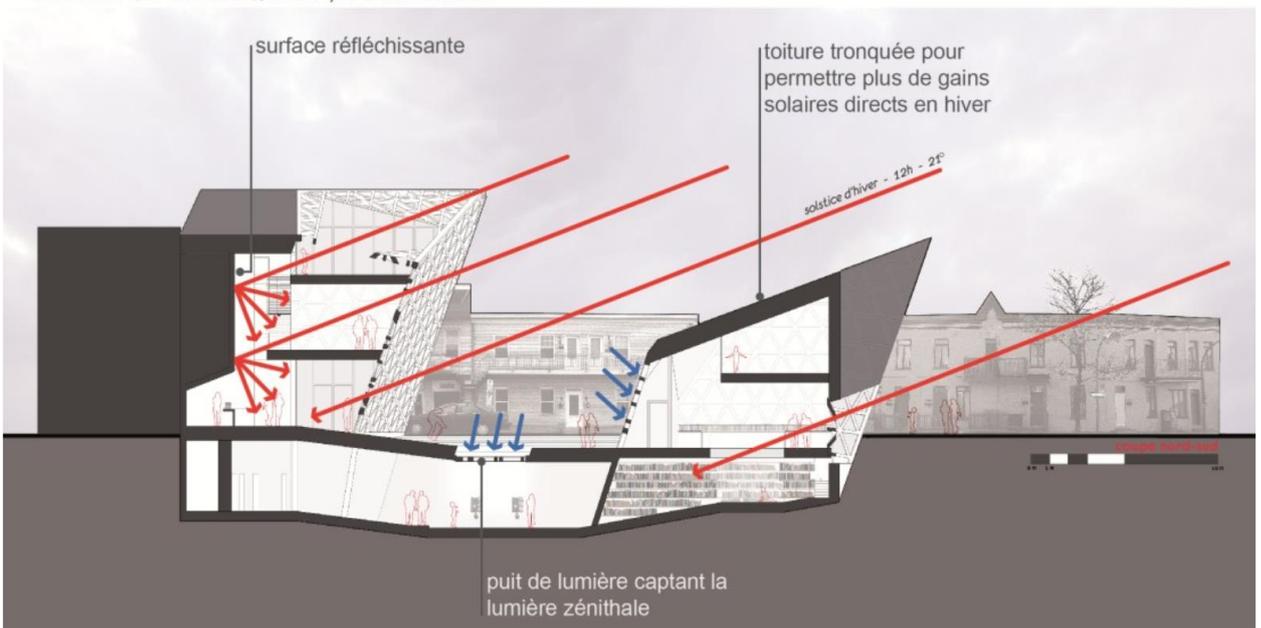
<sup>55</sup> Gagnon, Shirley. (2011). Light'n books : l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine. Projet de fin d'études en architecture (M. Arch.). Québec : École d'architecture de l'Université Laval.

situation B : ville de Québec, solstice d'été



**Figure 9b** : Coupe longitudinale nord-sud en été du projet Light'n books : l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine  
**Source** : Gagnon, 2011.

situation C : ville de Québec, solstice d'hiver



**Figure 9c** : Coupe longitudinale nord-sud en hiver du projet Light'n books : l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine  
**Source** : Gagnon, 2011.

Considérant les besoins en énergie variables des bâtiments au cours de l'année, il est probable qu'il soit difficile d'utiliser une ouverture à la fois pour l'éclairage, la ventilation, la vue et les gains thermiques. Pour optimiser l'exploitation de chacune de ces ressources, il est parfois préférable de les séparer<sup>56</sup>. Il s'agit alors, pour le concepteur, de prévoir différents types d'ouvertures pour différents besoins, ou alors de diviser une ouverture en plusieurs sections. Il semble évident que plus l'architecte connaît les effets et les caractéristiques du rayonnement solaire, les moyens de l'exploiter et les technologies disponibles, plus il est en mesure d'œuvrer avec originalité, efficacité et justesse lors du développement des solutions architecturales.

### **II.3 Les outils et méthodes de conception :**

Afin de réaliser une architecture solaire de qualité, il est indispensable que les outils et méthodes de travail des architectes soient adaptés aux nouvelles données à considérer. En plus d'appuyer la prise de décision, un outil adapté à la conception solaire peut permettre d'en démontrer la pertinence aux clients, d'accélérer le processus et de soutenir la collaboration entre les différents intervenants.

Au niveau des méthodes de travail, il est clair que les considérations énergétiques doivent être prises en compte dès les premières esquisses. Au niveau du solaire passif, il revient aux architectes de bien évaluer le potentiel solaire du site et d'user de créativité pour en tirer profit. Ce travail peut toutefois être soutenu par l'utilisation d'outils adéquats. Bien qu'à première vue, les règles du pouce, outil général et peu précis, semblent idéales pour les toutes premières ébauches du projet, il convient de pouvoir évaluer très rapidement le comportement énergétique du futur bâtiment. Donc un outil de simulation pour les premières phases de conception doit être simple, convivial et présenter les données de manière structurée<sup>57</sup>. L'interactivité avec les logiciels CAO est aussi très importante puisqu'à ce stade, le concepteur doit pouvoir visualiser les résultats rapidement.

L'utilisation de la technologie solaire active exige que la communication entre architectes et ingénieurs s'amorce dès les premières phases de conception. Les systèmes actifs, qu'ils produisent de l'électricité ou de la chaleur, sont en grande partie reliés aux systèmes mécaniques et électriques du bâtiment. Leur utilisation est donc le résultat d'un

---

<sup>56</sup> American Institute of Architects. Daylighting. Coll. «Architect's handbook of energy practice». New York: The Institute, (1982). p. 42

<sup>57</sup> Morbitzer, Christoph et al. (2001). «Integration of building simulation into the design process of an architecture practice». In Seventh International IBPSA Conference. (Rio de Janeiro, 13-15 Août 2001). Rio de Janeiro: IBPSA, pp. 697-704.

travail de collaboration entre architectes et ingénieurs. La conception des systèmes mécanique et électrique du bâtiment relève de ces derniers. De son côté, l'architecte a la responsabilité de les intégrer à l'architecture. Il est donc essentiel que les outils de conception lui permettent de visualiser correctement les différents systèmes au même titre qu'un matériau ou qu'un élément architectural. Les outils de travail doivent donc être en mesure de soutenir la communication entre les différents intervenants. De plus, ils peuvent aider à inclure les systèmes passifs à la composition architecturale des projets en facilitant leur représentation. Pour les clients, le travail multidisciplinaire peut aussi être très bénéfique, car les décisions prises en collaboration avec les ingénieurs plus tôt dans le processus de conception permettent d'épargner, au final, du temps et de l'argent<sup>58</sup>.

### **Conclusion :**

Depuis ce chapitre, on a appris que les premières étapes de conception sont cruciales, car elles définissent les différentes caractéristiques du projet qui ont le plus de potentiel pour l'architecture solaire. Il est donc essentiel que le travail de l'architecte soit soutenu par des outils de conception solaire dès les premières esquisses.

D'un autre côté, il est aussi essentiel que les concepteurs soient au moins au courant que ce type d'outils existe et qu'ils soient en mesure de les utiliser correctement. Pour faire une utilisation judicieuse des outils numériques pour l'architecture solaire, il convient de comprendre ce que les praticiens recherchent comme fonctionnalités ou caractéristiques.

---

<sup>58</sup> Novitski, B.J. «Greening your design culture to gain a competitive edge». Architectural Record. 197(2). (2009) p. 43.

## **PARTIE II :**

### **Les façades en architecture**

#### **Chapitre I :**

#### **La façade et la transparence en architecture**

## **PARTIE II : Les façades en architecture**

### **Chapitre I : La façade et la transparence en architecture**

#### **Introduction :**

La transparence fascine les architectes grâce à l'esthétique et de la symbolique du verre, mais également à cause des défis techniques qu'engendre son utilisation. La transparence constitue une quête récurrente à travers plusieurs courants architecturaux, que ce soit d'un point de vue environnemental ou technologique<sup>59</sup>. Au 16e siècle par exemple, en Grande-Bretagne, l'expansion de l'industrie du verre donne lieu à une quête pour un meilleur éclairage<sup>60</sup>. La transparence pour le constructivisme veut plutôt estomper la hiérarchie et les limites entre zones publiques et privées<sup>61</sup> alors que le mouvement moderne (figure 10) perçoit la transparence comme une relation entre l'être humain et la nature, mais pareillement comme un reflet du contrôle du premier sur le second<sup>62</sup>. En ce début de 21e siècle, un maximum de transparence demeure un idéal pour nombreux concepteurs. Bien que l'architecture engendre une protection de l'environnement extérieur, une relation avec celui-ci demeure indispensable. La transparence dans l'enveloppe architecturale devient alors fondamentale et s'identifie aujourd'hui comme primordiale dans l'optique d'une architecture éco-responsable, mais également, dans la conception d'un milieu commode. Les ouvertures expriment toutefois une dualité importante. En effet, les apports énergétiques qu'elles procurent peuvent également se traduire par des inconvénients thermiques.

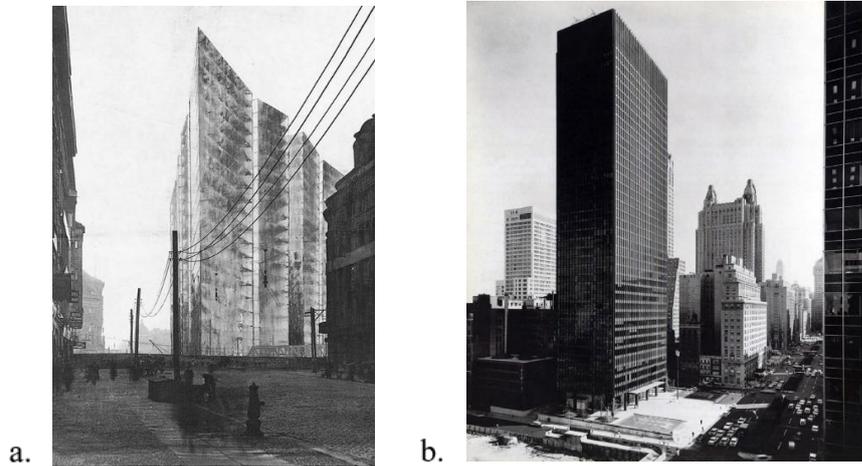
---

<sup>59</sup> Tutton, Michael, Elizabeth Hirst, Jill Pearce & H. J. Louw (2007). *Windows: history, repair, and conservation*. Dorset: Donhead, ix, 470 p

<sup>60</sup> Ibid.

<sup>61</sup> Bulgakowa, Oksana (2005). « Eisenstein, the Glass House and the Spherical Book: From the Comedy of the Eye to a Drama of Enlightenment ». Rouge no. 7 Disponible sur : <http://www.rouge.com.au/7/eisenstein.html>

<sup>62</sup> Bell, Michael & Jeannie Kim (2008). *Engineered transparency: the technical, visual, and spatial effects of glass* (1st ed.). New York: Princeton Architectural Press, 272 p.



**Figure 10 :** a. Gratte-ciel de verre imaginés par Mies van der Rohe, Berlin, 1919. **Source:** dowkimbrell.com  
 b. Seagram Building de New York. **Source:** yssamlayouni.wordpress.com

### I.1. La façade en architecture :

« La façade constitue la couche de séparation et de filtration entre l'extérieur et l'intérieur, entre la nature et les locaux habitables par l'Homme. De cette manière la fonction de protection de la façade est complétée par des fonctions de régulation et de réglage suivant les conditions extérieures imposées par le site et les exigences posées par les usagers »<sup>63</sup>

Cette citation définit les enjeux qui doivent répondre à une façade dans un bâtiment, ainsi que son rôle important et indispensable dans une construction obtenue par l'intersection de plusieurs champs d'expertises tels qu'expression architecturale, nécessité structurelle et besoin de confort. Ensuite, et depuis le début des années 1990, aussi bien en France qu'à l'étranger, les façades constituent à nouveau pour les architectes un lieu privilégié de recherche et d'expérimentation qui va de pair avec un retour massif du décoratif et de l'ornement.

Ce faisant, leurs architectes semblent marquer une rupture avec leurs aînés du Mouvement Moderne qui avaient eux-mêmes instauré une rupture radicale avec la tradition décorative des surfaces, entraînant une révolution de l'esthétique architecturale et de la sensibilité qui diffuse encore aujourd'hui ses effets.

Les principaux instigateurs de cette révolution furent Adolf Loos, avec son célèbre pamphlet *Ornement et crime* (1908) et Le Corbusier, avec *L'art décoratif d'aujourd'hui* (1925). L'architecture, selon eux, devait se consacrer à des tâches plus nobles et plus utiles, à des sujets plus profonds ou plus élevés et œuvrer pour le Bien et le progrès de l'humanité.<sup>64</sup>

<sup>63</sup> Thomas Herzog, Roland Krippner, Werner Lang, 2007 « Construire des façades », Atlas de Construction, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), p.19

<sup>64</sup> Sandrine Amy, 2008, Les nouvelles façades de l'architecture, disponible sur : <https://journals.openedition.org/appareil/287>

Ainsi, deux types essentiels apparaît avec la révolution de la conception architectural :

**I.1.1. La façade lourde :** qui se compose d'éléments maçonnés et porteurs, qui sont enduits, bardés ou laissés apparents, tels que les pierres de taille, les moellons, les briques pleines ou creuses, les parpaings, le béton cellulaire, les voiles de béton, etc. Les murs porteurs comprennent souvent les ouvertures de la maison comme les portes, les fenêtres avec volets, ou encore les balcons. Ce type de façade, aussi appelé façade maçonnée ou classique, est le plus répandu, quelle que soit la construction.<sup>65</sup>

**I.1.2. La façade légère :** qui est une façade constituée d'une ou plusieurs parois dont une extérieure caractérisée par :

- La légèreté, une faible surface au sol et la rapidité de pose
- Une masse faible presque toujours inférieure à environ 100 kg/m<sup>2</sup>
- l'utilisation de produits manufacturés
- portées par la structure d'un bâtiment en béton, en métal, ou en bois. Cette structure s'appelle ossature primaire.<sup>66</sup>

## **I.2 Les types de la façade légère :**

On distingue plusieurs types de façades légère :

### **I.2.1 Les façades panneaux :**

La façade panneau est constituée de panneaux insérés entre deux planchers consécutifs que l'on emploie sans ossature secondaire ni raidisseur. Les panneaux peuvent avoir un module de la hauteur d'un étage et donc filer horizontalement sans être interrompus par la structure verticale. Dans le cas contraire, il faudra prêter attention aux joints pour garantir les performances d'isolation thermique et d'étanchéité à l'eau et à l'air<sup>67</sup>.

Il existe deux types de panneaux de remplissage en acier :

- Les panneaux simples, assemblés sur chantier avec un isolant thermique ;
- Les panneaux composites qui comportent à la fois les parements intérieur et extérieur et l'isolant thermique.

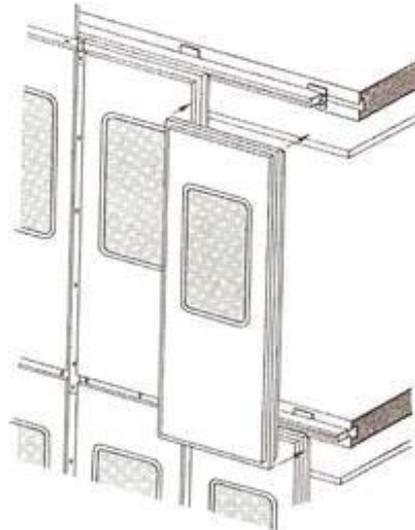
---

<sup>65</sup> LAMY Expertise 1982-2015, Construction maison : les différents types de façades, disponible sur : <https://www.lamy-expertise.fr/expertise-immobiliere/types-facades/facade-lourde.html>

<sup>66</sup> Ibid.

<sup>67</sup> LES FAÇADES RIDEAU ET FAÇADE PANNEAU, disponible sur : <http://www.construiracier.fr/solutions-constructives/facades/facade-rideau-et-facade-panneau/>

On emploie généralement les gammes de panneau qui existent dans les catalogues des fabricants mais il est toujours possible de concevoir un panneau spécifique au projet de construction.<sup>68</sup>



**Figure 11 :** Façade en panneaux préfabriqués, installés directement sans profils porteurs et raidisseurs.

**Source :** [www.construiracier.fr](http://www.construiracier.fr)

**I.2.1.a Les panneaux simples :** Ils sont fabriqués avec une tôle en acier, la plupart du temps plane mais raidie par pliage des bords, formant soit des lames emboîtées soit des cassettes à joints creux. Ils sont fixés sur une ossature secondaire et on complète le dispositif par une isolation thermique et des plaques de plâtre.

Ils peuvent être plans, pliés en angles ou cintrés, voire emboutis. Les dimensions des panneaux ne dépassent pas généralement 4m de longueur et 1,5 m de largeur. Ils peuvent être réalisés en acier prélaqué ou en inox. On peut les poser horizontalement où verticalement.<sup>69</sup>



**Figure 12 :** Façade en panneaux simples (cassettes).

**Source :** [www.construiracier.fr](http://www.construiracier.fr)

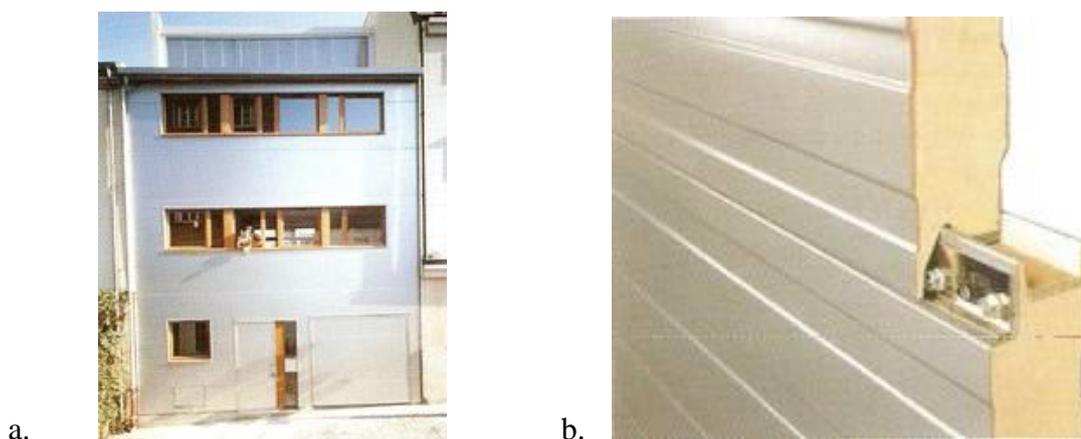
---

<sup>68</sup> Ibid.

<sup>69</sup> Ibid.

**I.2.1.b Les panneaux composites :** Le panneau composite (ou panneau sandwich ou encore panneau moussé) est constitué d'un parement en acier plan ou nervuré associé à une seconde feuille d'acier. Le vide intérieur est injecté d'une mousse de polyuréthane ou de laine minérale (coupe-feu) pour obtenir une âme isolante thermiquement. L'épaisseur de ces panneaux varie de 30 mm à 200 mm (pour chambres froides).<sup>70</sup>

Le parement extérieur est prélaqué ou en inox, le côté intérieur peut être simplement galvanisé s'il n'est pas visible. On distingue les panneaux composites où l'isolant a une fonction structurelle de ceux où il n'en a pas. Ces panneaux sont dans tous les cas très rigides en flexion et peuvent donc porter sur 3 à 5 m entre deux lisses d'une ossature secondaire. Leurs dimensions maximales sont de l'ordre de 1,2 m par 6 m pour les panneaux plans, de 1,2 m par 15 m pour les panneaux à face nervurée. En fonction de la finition de ses chants, le panneau peut être utilisé comme remplissage en s'insérant dans une grille porteuse ou comme panneau de bardage.<sup>71</sup>



**Figure 13 :** a. Panneaux sandwich en façade, fixés sur une ossature secondaire en bois. Maison à Paris Ige, Georges Maurios architecte. b. Panneau-sandwich à fixations cachées.

**Source :** [www.construiracier.fr](http://www.construiracier.fr)

### **I.2.2 Les façades rideaux (double peau):**

La façade rideau (ou "mur rideau") est une façade légère qui assure la fermeture de l'enveloppe d'un bâtiment sans participer à sa stabilité. Ce type de façade se constitue d'une ossature – montants et traverses – le plus souvent en profilés aluminium, et de remplissages vitrés ou opaques montés sur celle-ci.<sup>72</sup>

<sup>70</sup> Ibid.

<sup>71</sup> Ibid.

<sup>72</sup> LA FAÇADE RIDEAU OU MUR RIDEAU EN ALUMINIUM, L'enveloppe intelligente des bâtiments avec un façade en aluminium, disponible sur : <http://www.fenetrealu.com/produits/facade-vitree/facade-rideau-alu>

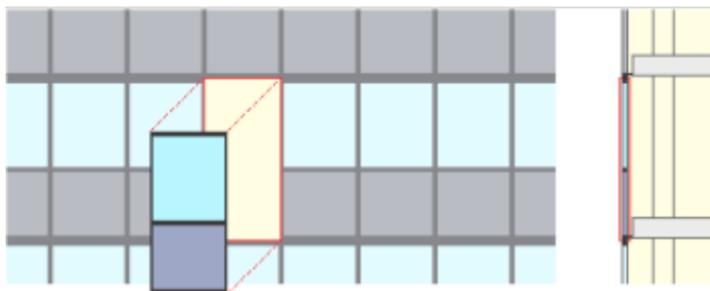
**I.2.2.a. Caractéristiques d'un mur rideau :** Une façade rideau est une façade légère constituée d'une (ou plusieurs) paroi(s), qui se caractérise principalement par :

- Un poids inférieur à 100 kg/m<sup>3</sup>, lui procurant une excellente inertie
- Une ossature composée de montants et traverses, dite secondaire, servant de support à des éléments de remplissage vitrés ou opaques, droits ou courbés. La livraison sur chantier de ces produits manufacturés permet une rapidité de la pose.
- Un système d'attaches permettant à cette ossature secondaire de reprendre la structure primaire d'un bâtiment en métal, béton ou bois, afin d'assurer sa stabilité vis-à-vis de celui-ci.

### **I.2.2.b. Typologie des façades rideaux :**

**2 grands principes de montage :** On distingue différents types de façades rideaux en fonction de la technique de montage de leur ossature et de l'assemblage des remplissages vitrés sur celle-ci (vitrage extérieur parclosé, collé ou attaché). Chaque construction relève du savoir-faire de l'entreprise et de l'ampleur du projet à réaliser.<sup>73</sup>

- **Montage sur grille :** La technique de la façade grille consiste à fixer l'ossature secondaire sur le squelette du bâtiment en réalisant une sorte de quadrillage, puis à poser les éléments de remplissage et de finition. C'est le cas le plus courant. L'ensemble est fixé aux nez des planchers de chaque niveau. L'ossature se présente sous forme d'éléments linéaires, montants et traverses, ou de cadres pré-assemblés en ateliers. (Figure. 14)



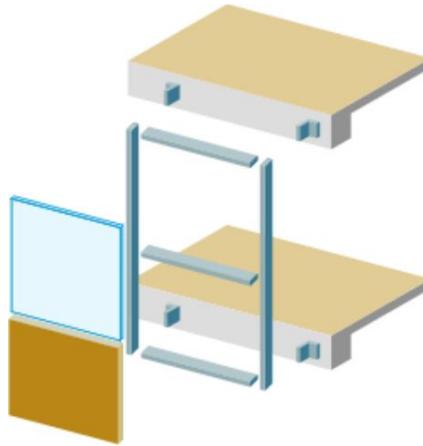
**Figure 14 :** Montage des éléments de mur rideau sur grille

Source : [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com)

- **Montage par éléments :** Une façade rideau à ossature « cadre » est entièrement montée en atelier avant d'arriver sur le chantier, sous forme d'éléments autoporteurs de 2 à 3,50 m correspondant à une trame de façade. Ce type de façade légère se compose

<sup>73</sup> Ibid.

de montants, traverses et d'un remplissage vitré. Le cadre est fixé au plancher à l'aide d'accroches fixées aux angles. (Figure 15)



**Figure 15 :** Montage des éléments de mur rideau par cadre  
**Source :** [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com)

### **I.3 historique de la façade double peau :**

L'histoire des façades en double peau est décrite dans plusieurs documents, livres, rapports et articles. Saelens, (2002) mentionne que Jean baptiste Jobard décrit en 1849, alors directeur du musée industriel de Bruxelles, une première version de façade multiple ventilée mécaniquement. Il souligne la manière dont l'air peut circuler en hiver entre les deux vitrages, ainsi qu'en été pour les phases de chauffage et de rafraîchissement.<sup>74</sup>

Crespo précise que le premier exemple de façade rideau en double peau apparaît en 1903 à l'usine Steiff à Giengen en Allemagne. Selon lui, 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 est une structure de trois niveaux avec un rez-de-chaussée pour un espace de stockage et deux niveaux consacrés aux espaces de travail. Devant le succès rencontré, deux bâtiments furent 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.

En 1903, Otto Wagner gagna le concours pour le bâtiment Post Office Savings Bank situé à Vienne en Autriche. Le bâtiment construit en deux phases de 1904 à 1912, est conçu avec une double peau en partie zénithale pour le hall central. Entre 1920 et 1930 le concept

---

<sup>74</sup> Harris Poirazis: Double Skin Façades for Office Buildings – Literature Review. Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Lund University, 2004. Report EBD-R--04/3

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. Une année plus tard, il démarrait l'étude de la Cité de Refuge (1929) et l'immeuble Clarte (1930) à Paris.<sup>75</sup>

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 furent conçues dans le cadre de l'approche environnementale suivant l'exemple des 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 façades. Les contraintes environnementales associées aux aspects techniques sont à l'origine de l'image de bâtiment vert recherchée par la corporation des architectes.<sup>76</sup>

#### **I.4 Les principaux types de la façade double peau :**

On distingue 3 types majeurs des façades en double peau : « **Les façades ventilées** », « **Les façades actives** » et « **Les façades adaptives** ». Ce dernier dont nous discuterons en détail dans le chapitre suivant.<sup>77</sup>

##### **I.4.1 Les façades ventilées :**

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.

##### **a. Les principales finalités de ces types de façades sont :**

- La création d'une ventilation naturelle en jouant un rôle en ventilation mécanique en utilisant l'effet du tirage thermique
- Le préchauffage de l'air introduit dans le bâtiment : diminue les pertes thermiques liées au renouvellement d'air
- L'isolation acoustique

---

<sup>75</sup> Ibid.

<sup>76</sup> Ibid.

<sup>77</sup> La façade double peau, disponible sur : [https://www.ekopedia.fr/wiki/Fa%C3%A7ade\\_double\\_peau](https://www.ekopedia.fr/wiki/Fa%C3%A7ade_double_peau)

- L'optimisation du facteur de lumière du jour : permet de diminuer les consommations liées à l'éclairage.
- L'esthétique : crée un aspect « high-tech » apprécié dans les bâtiments tertiaires
- L'amélioration du confort d'été en favorisant la protection solaire
- L'isolation thermique : en rénovation l'application d'une façade vitrée en complément de la paroi opaque traditionnelle peut être une solution pour diminuer les ponts thermiques.

**b. Les différents modes de ventilation :**

**La ventilation naturelle :** La circulation de l'air au sein des parois 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. Cette différence de densité crée un mouvement d'air à l'intérieur du canal de la façade double peau. (Figure 16.a)

**La ventilation forcée (mécanique) :** La circulation d'air est créée artificiellement par des extracteurs d'air (ventilateurs). Les écoulements d'air dans le canal dépendent également des entrées et des sorties d'air (leur dimensions et position). Aussi, les propriétés thermodynamiques de l'air et de profil des écoulements à l'intérieure du canal doit être pris en compte pour éviter les problèmes de condensation au niveau de vitrage.

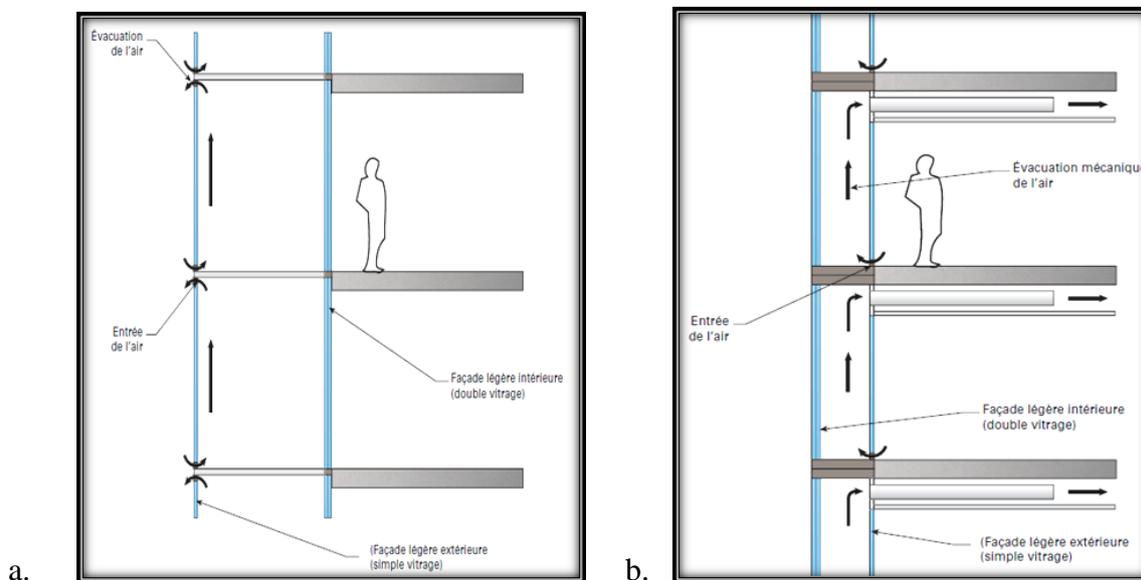
De la même manière, les protections solaires et leur position constituent un facteur important puisqu'ils influencent d'une manière sensible les mouvements d'air à l'intérieur du canal. (Figure 16.b)<sup>78</sup>

**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.<sup>79</sup>

---

<sup>78</sup> Ibid.

<sup>79</sup> Ibid.



**Figure 16 :** Principe de fonctionnement d’une façade double peau (a) ventilée naturellement sur un niveau (b) ventilée mécaniquement. (Source : [www.durable198.ressing.com](http://www.durable198.ressing.com))

### I.4.2 Les façades actives :

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. Permet ces techniques il y’a le Mur Capteur, le mur Trombe-Michel et la Véranda.<sup>80</sup>

### I.5 les composants de la façade double peau :

La façade de type double-peau est constituée d’une peau intérieure et d’une autre extérieure Ces deux peaux créent un canal.

**I.5.1 La peau extérieure :** Un écran en contact avec l’extérieur (mur végétalisé, paroi vitrée, assemblé métallique, lamelle de bois).

**I.5.2 La peau intérieure :** Généralement c’est la façade du bâtiment.

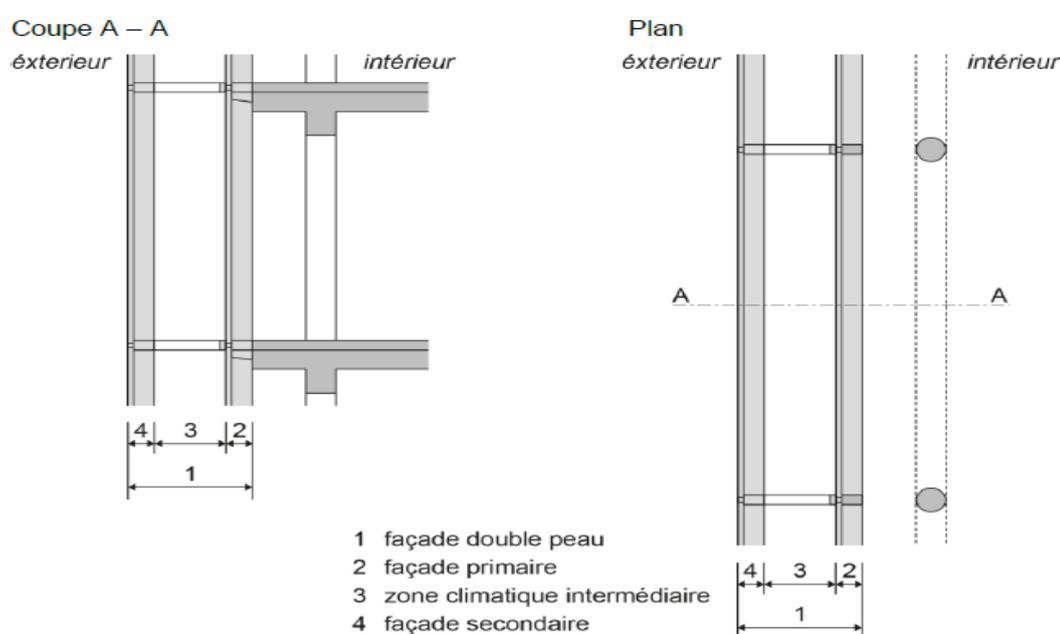
**I.5.3 Un espace tampon :** Formant un canal d’air entre les deux peaux de la façade, l’épaisseur de ce canal est différent d’une façade à une autre. Cette dernière et varie entre 10cm et 2m pour le cas des atriums ; la hauteur minimale des canaux est d’un étage et peut s’étendre sur plusieurs étages. Le canal de la façade de type double peau est généralement

<sup>80</sup> La façade double peau, disponible sur : [https://www.ekopedia.fr/wiki/Fa%C3%A7ade\\_double\\_peau](https://www.ekopedia.fr/wiki/Fa%C3%A7ade_double_peau)

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<sup>81</sup>.

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 l'énergie, soit parce qu'ils protègent du froid et du vent, soit parce qu'ils stockent de la chaleur comme les serres solaires passives.



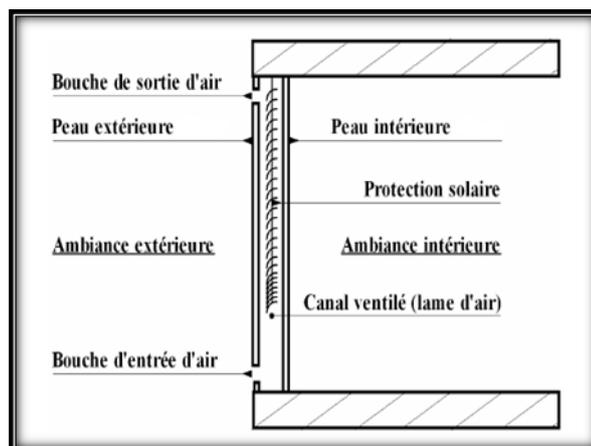
**Figure 17 :** les composants d'une façade double peau

**Source :** [www.marnelavalle.archi.fr](http://www.marnelavalle.archi.fr)

**I.5.4. Une protection solaire :** Ces façades sont dotées d'une protection solaire. La protection solaire remplit deux objectifs bien distincts limiter les apports solaires d'une part et réguler le flux lumineux d'autre part. Plusieurs types de protection solaires sont possibles, les stores vénitiens sont parmi les plus répandus. Ainsi que « les rideaux à bandes verticales » ce type de store est composé d'un rail horizontal placé en partie haute. Les bandes verticales sont généralement en tissu et leur largeur se situent entre 89mm ou 127mm, une variété de tissu est

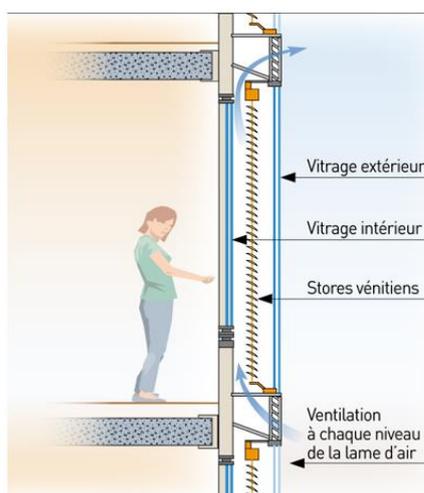
<sup>81</sup> N. SAFER, « Modélisation des façades de types double-peau équipé de protection solaires : Approches multi-échelles », Thèse de doctorat en génie civil, soutenue le 13/06/2006, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, p29.

possible : en polyester, en fibre de verre, en scéen ou tissu aluminisé et En PVC<sup>82</sup>. (Figure 18,19)



**Figure18 :** Façade double peau et ces différents composants

Source : [www.lemoniteur.fr](http://www.lemoniteur.fr)



**Figure19 :** L'emplacement d'un store vénitien dans une façade double peau

Source : [www.enerzine.com](http://www.enerzine.com)

## I.6 Principe de fonctionnement de la façade double peau :

Ce mode de fonctionnement n'étant pas linéaire dans le temps, et devant s'adapter automatiquement en fonction des conditions climatiques extérieures.<sup>83</sup>

### En hiver :

La double peau étant fermée, nous utilisons le rayonnement solaire afin de réchauffer l'air intérieur de la double peau et d'emmagasiner un maximum de chaleur solaire.

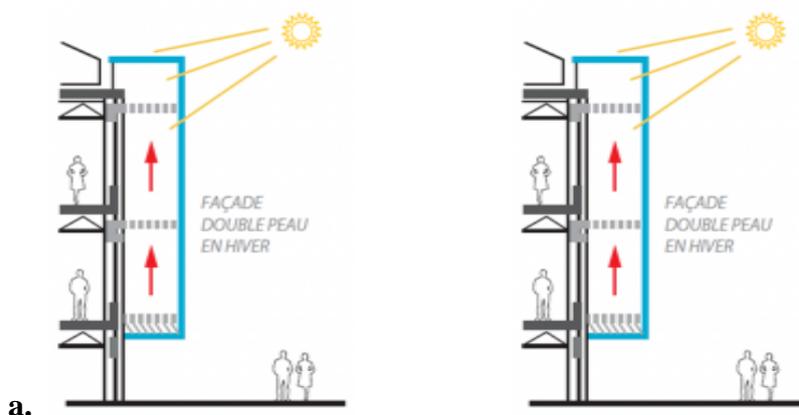
### En été :

<sup>82</sup> Article disponible sur :

[https://www.ekopedia.fr/wiki/Fa%C3%A7ade\\_double\\_peau#Illustrations\\_des\\_diff%C3%A9rentes\\_techniques](https://www.ekopedia.fr/wiki/Fa%C3%A7ade_double_peau#Illustrations_des_diff%C3%A9rentes_techniques)

<sup>83</sup> Ibid.

La prévention de la surchauffe de l'air intérieur en ventilant naturellement l'air contenu dans la double peau permet à l'air chaud de la double peau d'être maintenu hors du bâtiment.



**Figure 20 :** a. principe de fonctionnement en hiver, b. principe de fonctionnement en été  
**Source :** [www.enerzine.com](http://www.enerzine.com)

Ce mode de fonctionnement n'étant pas linéaire dans le temps, et devant s'adapter automatiquement en fonction des conditions climatiques extérieures, il est indispensable d'avoir une gestion automatisée via un automate programmable intégrant l'ensemble des contraintes de fonctionnement de la technologie. Cet automate va permettre de piloter une façade double peau et de gérer l'air qu'elle stocke pour le réutiliser dans le bâtiment. L'hiver, cet air déjà chaud limitera l'utilisation du chauffage ; l'été, l'air contenu dans la double peau sera naturellement ventilé pour un moindre recours à la climatisation.<sup>84</sup>

Nous faisons de la double-peau un instrument architectural au service du confort thermique et acoustique. La Gestion de 5 façades double peau. En hiver comme en été, nous pouvons utiliser les ouvrants de façade du bâtiment afin de laisser pénétrer l'air de la double peau dans le bâtiment et, par le fait, de limiter l'utilisation de la climatisation et du chauffage, en y associant une gestion de Ventilation Naturelle Intelligente.<sup>85</sup>

### **I.7 L'intérêt énergétique et les enjeux de la façade double peau :**

Les constructions à double peau présentent un intérêt énergétique certain, lorsqu'elles sont jumelées à d'autres dispositifs constructifs, telle que la mixité bois-béton. Les enjeux d'une façade double peau sont:

<sup>84</sup> Valentin-Florian GAVAN, « Gestion intelligente et performance énergétique des façades actives de type "double-peau" », 07/10/2009, Thèse ADEME, p75.

<sup>85</sup> HERZOG, T. KRIPPNER, R., LANG, W, « Construire des façades », Presses polytechniques universitaires Romandes, Lausanne, 2007, p250.

- L'aspect esthétique de la façade extérieure, en donnant une image high-tech, avec une abstraction de la façade en cachant des repères conventionnels ;
- La permission de séparer l'aspect fonctionnel de la peau intérieure et l'aspect esthétique de la peau extérieure ;
- 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 ;
- La possibilité de la récupération de l'air chaud de la double-peau ;
- Élimine l'effet de paroi froide en hiver, qui produit un inconfort intérieur ;
- Diminution des pertes par infiltration ;
- La façade double peau aide à la régulation thermique du bâtiment. Elle le protège contre les contraintes météorologiques. Par rapport aux rayonnements directs du soleil, elle joue un rôle en évitant les surchauffes d'été et limite le recours à la climatisation ;
- La possibilité de mise en place de protection solaire mécanique dans la lame d'air ;
- Le rafraîchissement diurne et/ou nocturne simplifié et facilité par l'intermédiaire d'ouvrants de confort sur la peau intérieure ;
- Amélioration de la ventilation naturelle grâce à l'effet de tirage ;
- Stratégie de l'éclairage naturel ;
- Diminution des apports internes et des consommations électriques ;
- L'amélioration de l'isolation thermique pour le confort d'hiver ;
- Concevoir des bâtiments avec ce type de façade garantit des économies d'énergie et contribue à la limitation des émissions des gaz à effet de serre. Soit parce qu'ils protègent du froid et du vent, soit parce qu'ils stockent de la chaleur comme les serres solaires passives.
- La possibilité de production d'énergie annexe sur la peau extérieure du type vitrages photovoltaïques micro-algues.

## **Conclusion**

Une façade double peau 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 : 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.

Ainsi, ce type des façades est considéré comme une solution technique utilisé dans les constructions neuves ou dans la réhabilitation des bâtiments de plus en plus, en répondant avec efficacité énergétique aux exigences de la nouvelle réglementation thermique RT2012.

Donc, dans un projet, la façade doit être conçu dès le début, en l'apportant comme un atout qui augmentera la productivité de ce projet sur tous ses aspects. En protégeant contre le climat, et en tirant profit depuis les ressources naturelles pour le réchauffement et l'éclairage des pièces.

## **Chapitre II :**

### **La façade adaptive**

## **Chapitre II : La façade adaptive**

### **Introduction :**

Selon le cadre sémantique ci-dessus, les façades adaptatives devraient fournir une réponse adéquate aux changements d'environnement interne et externe pour assurer ou améliorer les exigences fonctionnelles des enveloppes en termes de chaleur, flux de vapeur d'air et d'eau, pénétration de la pluie, rayonnement solaire, bruit, feu, force et stabilité et esthétique<sup>86</sup>.

Par conséquent, les façades adaptatives multifonctionnelles devraient être capables de répondre de manière répétée et réversible les changements dans les exigences de performance et les conditions aux limites changeantes. En d'autres termes, les façades adaptatives seraient capables de fournir une isolation et une masse thermique contrôlables, un échange de chaleur radiante, une ventilation, une récupération d'énergie, l'éclairage naturel, l'ombrage solaire ou le contrôle de l'humidité. De plus, dans le contexte du nZEB<sup>87</sup>, où les bâtiments doivent être interactifs dans le contexte de l'énergie zéro et de la ville intelligente pour offrir la flexibilité opérationnelle nécessaire pour éviter ou réduire l'inadéquation, de telles façades peuvent jouer un rôle important.

### **II.1 L'architecture adaptive :**

Selon une recherche récente<sup>88</sup>, le terme « adaptatif » dans le contexte des façades de bâtiments est souvent associé dans la littérature à une longue liste de termes similaires. Bien que la signification de certains de ces termes dans le contexte des façades de bâtiment ne soit pas entièrement claire, la définition de façade adaptative de cette étude utilise comme base commune la description selon laquelle les façades adaptatives sont constituées de systèmes multifonctionnels hautement adaptatifs, où le séparateur physique entre l'environnement intérieur et extérieur (c.-à-d. l'enveloppe du bâtiment) est capable de changer ses fonctions, ses caractéristiques ou son comportement au fil du temps en fonction des exigences transitoires et des conditions aux limites afin d'améliorer les performances globales du bâtiment<sup>89</sup>.

---

<sup>86</sup> Daniel Aeleneia, Laura Aelenei, Catarina Pacheco Vieirab, Energy Procedia, Volume 91, June 2016, disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216303162> .

<sup>87</sup> nZEB: Nearly zero-energy buildings, un thème d'efficacité énergétique des bâtiments mis par la commission européenne d'énergie.

<sup>88</sup> Loonen RCGM. Climate Adaptive Building Shells. Technische Universiteit Eindhoven, 2010.

<sup>89</sup> Loonen RCGM, Rico-Martinez JM, Favoino F, Brzezicki M, Menezo C, La Ferla G, et al. Design for façade adaptability – Towards a unified and systematic characterization. Proc. 10th Energy Forum - Adv. Build. Ski., Bern, Switzerland: 2015, p. 1274–84.

L'architecture adaptative se base sur une nouvelle définition du confort qui intègre la question du dynamisme de l'architecture et la participation des occupants<sup>90</sup>, cette occupation qui constitue un aspect majeur de la performance énergétique d'un bâtiment alors que l'occupant cherche à rétablir un état de confort<sup>91</sup>. Dans cette optique, l'architecture adaptative confère à l'occupant un rôle actif dans l'atteinte de son confort et dans les performances énergétiques du bâtiment en lui proposant des opportunités d'adaptation. Un manifeste signé par 170 délégués à Québec lors de la 26e conférence PLEA (Passive and Low Energy Architecture) en 2009<sup>92</sup>, soutient que ces opportunités passives et une liberté de choisir viennent encourager une interaction entre un occupant actif et responsable et son environnement bâti ainsi que favoriser la santé, le confort et la productivité. Cette théorie vise le confort des occupants et l'économie d'énergie par l'adaptation comportementale qui, avec l'attente, a de bien plus grands effets que la simple acclimatation<sup>93</sup>. En effet, plusieurs études ont démontré que la plage de confort thermique et visuelle d'un occupant augmente en fonction des opportunités d'adaptation offertes.

Bien que la subjectivité de l'utilisation des stratégies adaptatives puisse présenter une certaine imprévisibilité et potentiellement un risque de surconsommation<sup>94</sup>, les auteurs soutenant la théorie de l'adaptabilité affirment que l'action humaine doit constituer la force d'une architecture passive<sup>95</sup> et que l'éducation des occupants et l'implantation de méthodes claires et de systèmes d'information en temps réel repoussent l'utilisation appropriée des diverses stratégies.

Le contrôle sur l'environnement bâti est d'une importance significative dans la question du confort environnemental parce qu'il touche aux aspects du confort. On peut dire que des systèmes de contrôle environnemental constituent un pont avec l'environnement extérieur. Et affirme que le contrôle et la participation favorisent l'autonomie et l'estime de soi des occupants et donc le bien-être psychologique.

---

<sup>90</sup> Cole, Raymond J., Zosia Brown & Sherry McKay (2010). « Building human agency: a timely manifesto ». *Building Research and Information*, vol. 38, no. 3, p. 339-350

<sup>91</sup> Janda, Kathryn B. (2009). « Buildings Don't Use Energy: People Do » In PLEA 2009 (Québec, 22-24 juin 2009). Québec : Les Presses de l'Université Laval.

<sup>92</sup> Demers, Claude MH & André Potvin (2008). « Productivité durable : vers une biophilie architecturale ». *Esquisse*, vol. 19, no. 1, p. 21-23.

<sup>93</sup> Brager, Gail S. & Richard J. de Dear (1998). « Thermal adaptation in the built environment: a literature review ». *Energy and Buildings*, vol. 27, no. 1, p. 83-96.

<sup>94</sup> Hammad, Fawwaz (2010). « An Evaluation Study of External Dynamic Louvers in Office Building in Abu Dhabi ». mémoire de maîtrise, Dubai: The British University in Dubai, 198 p.

<sup>95</sup> Cole, Raymond J., Zosia Brown & Sherry McKay (2010). « Building human agency: a timely manifesto ». *Building Research and Information*, vol. 38, no. 3, p. 339-350

## II.2 La façade adaptative :

Plusieurs auteurs soutiennent qu'une façade adaptative constitue par son dynamisme la meilleure réponse à la variabilité des conditions climatiques et des besoins des occupants. Nielsen affirme qu'un tel type de façade permet une utilisation plus judicieuse des énergies renouvelables disponibles.<sup>96</sup>

Moloney<sup>97</sup>, comme Lee et al<sup>98</sup> décrit une façade adaptative comme un ensemble fixe composé d'éléments mobiles. Ces éléments constituent des dispositifs d'occultation et de redirection de la lumière et viennent moduler la relation entre l'extérieur et l'intérieur. Les effets simultanés des façades dynamiques sur la consommation énergétique et sur l'ambiance lumineuse semblent toutefois être un sujet peu abordé dans les écrits scientifiques. La recension démontre les avantages énergétiques des dispositifs mobiles par rapport aux dispositifs fixes bien que dans certains cas, l'avantage ne soit pas considérable<sup>99</sup>. Littlefair et al. (2010) notent entre autres que l'avantage des dispositifs mobiles en climat froid sur une base annuelle semble moins évident. Ces auteurs indiquent toutefois que l'utilisation de l'occultation par les occupants pour réduire l'éblouissement a un impact significatif sur l'apport de gains solaires et donc sur l'efficacité du dispositif.<sup>100</sup>

Le type de contrôle, automatique ou manuel, constitue à cet égard une question sérieuse lors de la conception d'une façade adaptative. Sur le plan de la consommation énergétique, un système automatique génère de préférables économies. L'utilisation de systèmes manuels dans le cadre d'une architecture adaptative peut toutefois avoir des privilèges considérables sur le confort des occupants en leur permettant de s'adapter aux conditions environnementales.

---

<sup>96</sup> Nielsen, Martin V., Svend Svendsen & Lotte B. Jensen (2011). « Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight ». *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, p. 757-768.

<sup>97</sup> Moloney, Jules (2011). *Designing kinetics for architectural facades: state change*. Abingdon, Oxon [Angleterre]: Routledge, xiii, 178 p

<sup>98</sup> Ibid. Nielsen, Martin V., Svend Svendsen & Lotte B. Jensen (2011).

<sup>99</sup> Hammad, Fawwaz (2010). « An Evaluation Study of External Dynamic Louvers in Office Building in Abu Dhabi ».

<sup>100</sup> Cédric du Montier, 2013, LA FAÇADE ADAPTATIVE EN ARCHITECTURE Potentiel énergétique et lumineux du panneau isolant mobile, Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en Sciences de l'architecture pour l'obtention du grade de maître ès sciences. P 14.

### II.3 Mouvement en façade :

Schumacher (2010)<sup>101</sup> et Moloney (2011)<sup>102</sup> se sont intéressés à la question du dynamisme en architecture, principalement au niveau de la façade. Ils identifient deux grandes familles de mouvements de plans, soit **la translation** et **la rotation**, qui forment les différentes typologies de mouvement (figure 20). Schumacher (2010) définit le mouvement comme « résultant du passage d'une position stationnaire à une nouvelle position stationnaire » (traduction libre, p.8). Il peut être fonctionnel, sensible, poétique. Fox, Michael & Miles Kemp (2009)<sup>103</sup> notent un grand potentiel en architecture. Ils affirment que le mouvement en façade peut intégrer la conception notamment sur les plans de la limite entre zones publiques et privées et de l'optimisation environnementale.

La conception d'une façade adaptative doit tenir compte de l'effet du mouvement sur le confort des occupants, mais pareillement de l'esthétique du mouvement en tant que tel. Bien que la recherche ne s'attarde pas à cette question, il existe effectivement dans le mouvement une poésie intrinsèque.<sup>104</sup>

*« Bien que la forme et le mouvement soient en eux-mêmes simples, ils semblent complexes et insondable. C'est là que réside sa poésie. »*<sup>105</sup>

L'esthétique du mouvement peut constituer pour le concepteur un langage architectural riche. De simples mouvements peuvent engendrer un nombre quasi incalculable de combinaisons et d'expériences. L'esthétisme du mouvement constitue donc une composante importante de la conception de façades dynamiques à ne pas négliger.<sup>106</sup>

*« Le plus grand défi de tous n'est pas scientifique (créer de plus en plus mature modèles mathématiques), ni technologiques (création de la physique et de systèmes permettant des niveaux d'interactivité et de sensibilité dans la construction et les paramètres). Et ce n'est pas non plus fonctionnel. Non, le vrai défi est comme toujours d'une nature esthétique. »*<sup>107</sup>

---

<sup>101</sup> Schumacher, Michael, Oliver Schaeffer & Michael-Marcus Vogt (2010). Move: dynamic components and elements in architecture. Basel, London: Birkhäuser, Springer, p 138.

<sup>102</sup> Moloney, Jules (2011). Designing kinetics for architectural facades: state change. Abingdon, Oxon [Angleterre]: Routledge, xiii, 178 p.

<sup>103</sup> Fox, Michael & Miles Kemp (2009). Interactive architecture. New York: Princeton Architectural Press, 256.

<sup>104</sup> Cédric du Montier, 2013, LA FAÇADE ADAPTATIVE EN ARCHITECTURE. p 16.

<sup>105</sup> Schumacher, Michael, Oliver Schaeffer & Michael-Marcus Vogt (2010). Move: dynamic components and elements in architecture. Basel, London: Birkhäuser, Springer, p 8.

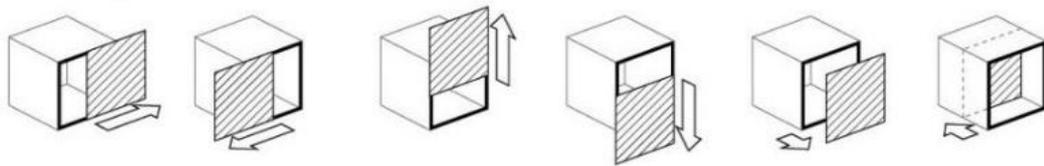
<sup>106</sup> Ibid.

<sup>107</sup> Moloney, Jules (2011). Designing kinetics for architectural facades: state change. Abingdon, Oxon [Angleterre]: Routledge, xiii, p 33

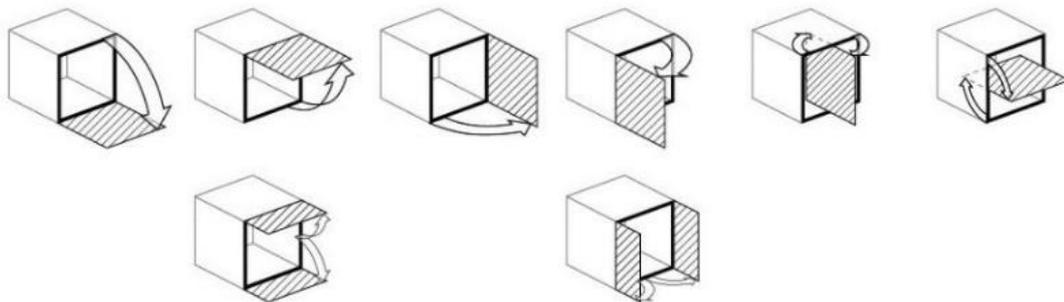
Bien que Saggio identifie l'esthétisme comme principal défi, la performance environnementale et énergétique d'une façade dynamique soulève de réelles questions techniques dans un contexte de développement durable en architecture.<sup>108</sup>

### II.3.1 Typologies de mouvement :

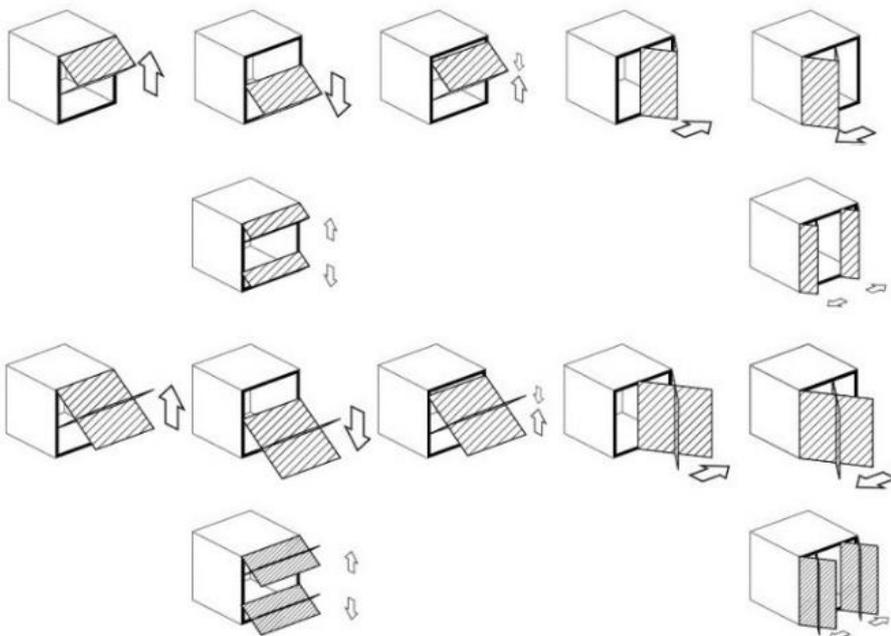
#### Coulissant



#### Pivotant



#### Pliant



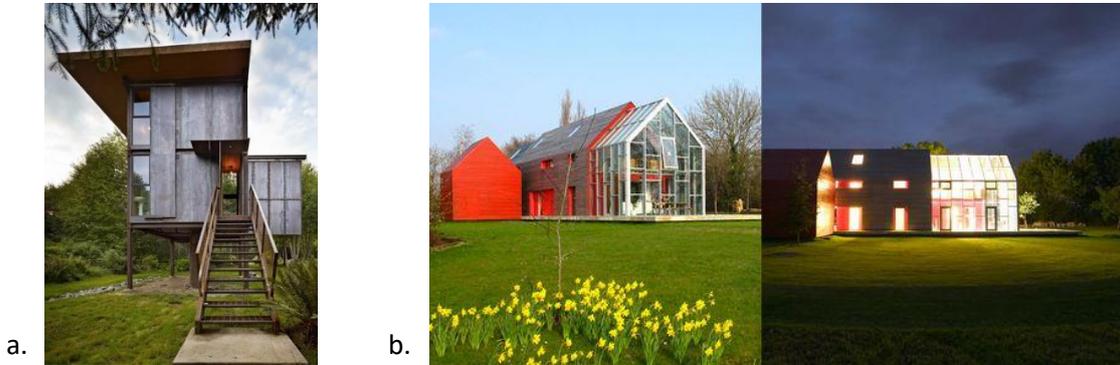
**Figure21 :** Typologie de mouvement de plans.

**Source :** Schumacher (2010)

<sup>108</sup> Ibid.

### II.3.1.1 Coulissant :

Sur la **Figure 21-a** l'architecte vise l'ouverture, l'intimité et conservation. L'utilisation d'une couverture entière mobile dans le « sliding house » vise l'exposition, la conservation et la protection.



**Figure 22 :** a. Stilt Cabin Seattle, EU par Olson Sundberg, (Source: [www.trendir.com](http://www.trendir.com)) b. Sliding House Suffolk, Royaume-Uni par dRMM (Source: [www.pinterest.co.uk](http://www.pinterest.co.uk))

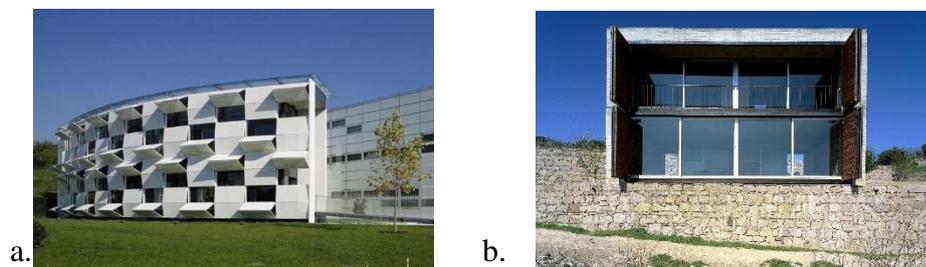
### II.3.1.2 Pivotant :

La figure 22 représente des projets qui cherchent à créer une occultation pour avoir un espace conservé à la réflexion.



**Figure 23 :** a. Tucker House, Victoria, Australie par Sean Godsell, (Source: [www.pinterest.co.uk](http://www.pinterest.co.uk)) b. Arup Campus, Solihull, Royaume-Uni par Arup Associates (Source: [www.arup.com](http://www.arup.com)) c. False Bay Cabin, San Juan, Island par Tom Kundig (Source: [www.gessato.com](http://www.gessato.com))

### II.3.1.3 Pliant :



**Figure 24 :** a. Kiefer Technic Showroom, Steiemark, Autriche par Brecht+PartnerZT GmbH, (Source: <http://www.designindaba.com>) b. B2 House, Çanakkale, Turquie par Han Tümertekin (Source: <http://www.akdn.org/architecture/project/b2-house>)

On note trois grandes typologies de mouvement dans l'étude des panneaux rigides mobiles, c'est-à-dire les types coulissants, pivotants et pliants (figure 21). Chaque type a des particularités et des fonctions différentes, mais dans tous les cas, le mouvement fait place à d'importantes transformations de la façade architecturale.

#### **II.3.1.4 Comparaison entre les trois typologies de mouvement :**

- Les fonctions de panneaux coulissants sont plutôt limitées en comparaison aux panneaux pivotants et pliants. La fermeture du panneau vient cacher, créer de l'intimité et s'il est muni d'isolation favoriser la conservation thermique. En coulissant le plus souvent dans un axe parallèle à la façade, ce type de panneau ne fait que dégager une partie de la façade, souvent une fenêtre. De l'intérieur, il est présent ou il ne l'est pas, en venant exposer entièrement la fenêtre. Son mouvement, bien qu'il soit limité, peut significativement contraster les ambiances lumineuses et thermiques d'un espace puisqu'il se solde par une variation évidente du ratio de transparence de l'enveloppe. Le projet *Sliding House* de la firme *dRMM* (figure 22.b) illustre bien cet effet alors qu'une couverture coulissante de grande ampleur permet d'exposer un espace serre entièrement vitré et participe à la création d'ambiances diversifiées en plus d'occulter et de conserver l'énergie en position close. De l'extérieur, un contraste peut également être observé alors qu'un panneau peut sembler disparaître et faire apparaître une ouverture. Le projet *Stilt Cabin* conçu par l'architecte Olson Sundberg (figure 22.a) en est un exemple. La transformation de la façade par des panneaux coulissants peut engendrer un certain élément de surprise puisque le dynamisme des éléments mobiles est moins explicite, lorsque ceux-ci sont immobiles, que celui des panneaux pivotants et pliants. Les panneaux pivotants présentent une plus grande diversité de mouvements et de fonctions du fait principalement qu'ils peuvent se déployer sur un axe perpendiculaire à la façade en pivotant sur un axe horizontal ou vertical, vers le haut ou vers le bas. Ils peuvent créer des dispositifs d'occultation extérieurs horizontaux (projet *Tucker House*) ou verticaux (projet *Arup Campus*) en position ouverte en plus de procurer un contrôle de l'intimité lorsque refermés (figure 23.b). Le projet « False Bay Cabin » de l'architecte Tom Kundig (figure 23.c) profite de panneaux pivotant vers le bas pour créer des espaces extérieurs habitables. Ce type de mouvement de panneaux peut également être efficace pour réfléchir le rayonnement et contrôler l'apport de lumière naturelle.

- Les panneaux pliants sont en plusieurs points semblables aux panneaux pivotants. Leurs quatre points d'attache à l'enveloppe constituent toutefois un privilège dans certains cas sur le plan de la rigidité. Ils peuvent entre autres servir, en position ouverte ou entrouverte, de

dispositifs d'occultation ou de réflexion horizontaux ou verticaux. Le projet Kiefer Technic Showroom de la firme Brecht + Partner ZT GmbH (figure 24.a) montre que l'utilisation répétitive du panneau pliant participe à donner une texture à la façade. De la même manière, l'utilisation de panneaux pivotants permet également de raffiner la composition architecturale d'une enveloppe par l'apparition d'une troisième dimension.

#### **II.4 Le panneau isolant mobile :**

L'utilisation de l'isolation mobile constitue une réponse à la dualité qui caractérise la transparence en architecture. Sa fonction initiale consiste à réduire les déperditions thermiques par la couverture temporaire des fenêtres, généralement en période d'inoccupation, lorsqu'elles n'assurent plus l'apport de gains solaires. De cette manière, l'utilisation de l'isolation mobile permet une conservation préférable, principe important du chauffage solaire passif. Lorsque conçu en tant que dispositif d'occultation et de contrôle de la lumière naturelle, un PIM peut également réduire la surchauffe et l'inconfort visuel potentiel que génère la transparence tout en optimisant les gains solaires désirables. En tant que dispositif de contrôle, il permet non seulement de mieux profiter de l'énergie solaire disponible, mais parce qu'il est manœuvrable par les occupants, il offre à ceux-ci un moyen d'adaptation dans l'optique d'une architecture adaptative. Cette recherche tente entre autres de démontrer l'intérêt du PIM en tant qu'opportunité d'adaptation.

Des auteurs comme Brown et al. (2001)<sup>109</sup>, Langdon (1980)<sup>110</sup>, Shurcliff (1980)<sup>111</sup> et Zaheeruddin (1990)<sup>112</sup> introduisent l'isolant mobile comme un système ayant un fort potentiel de diminution de la consommation énergétique. Langdon et Shurcliff témoignent que l'utilisation de dispositifs d'isolation mobile permet de réduire les déperditions thermiques de 40 à 60%. Shurcliff ajoute que si l'emploi de ce dispositif était généralisé en milieu résidentiel, elle pourrait contribuer à la réduction de la dépense énergétique annuelle.

Les graphiques ci-dessous faites par Langdon en 1980 illustrent le potentiel de réduction des déperditions thermiques par des ouvertures sud, est/ouest et nord durant l'année pour la ville de Madison, Wisconsin. L'utilisation de l'isolation mobile montre des réductions

---

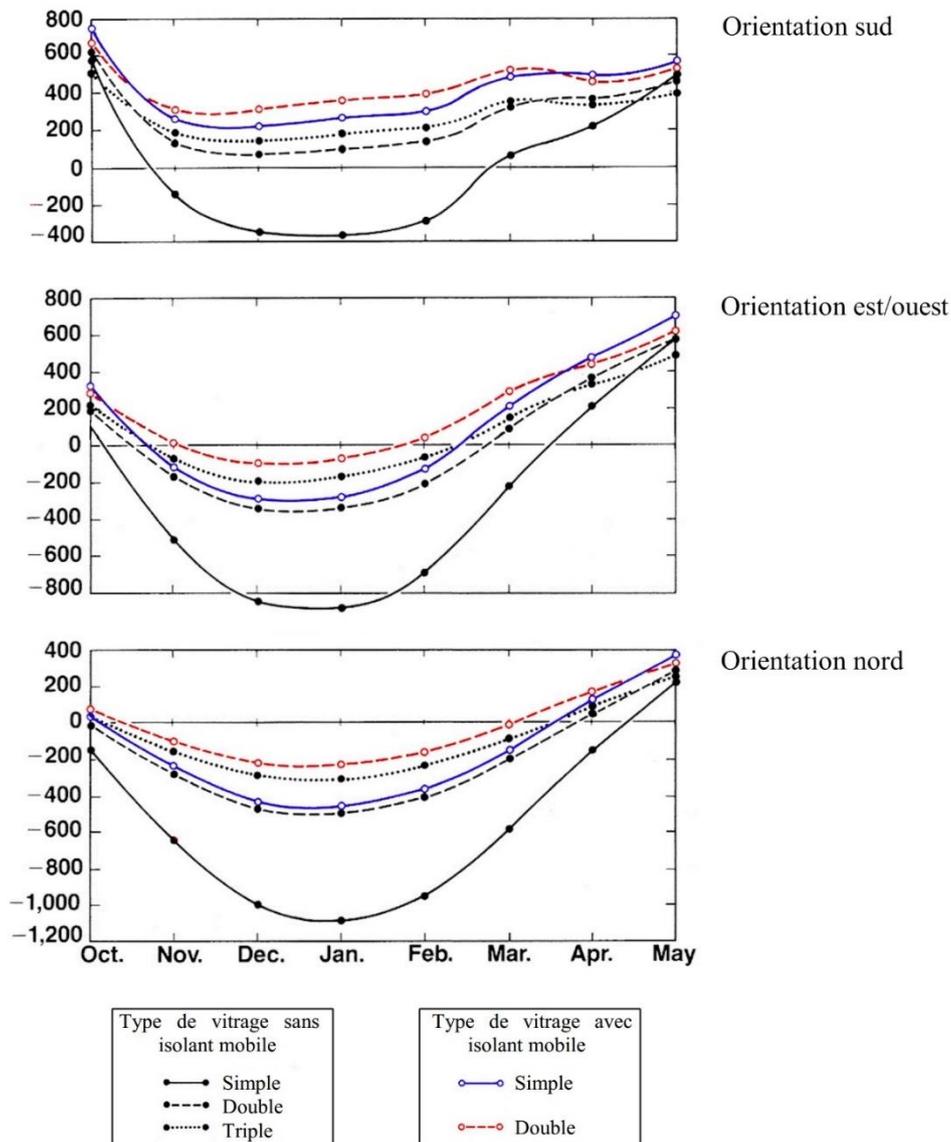
<sup>109</sup> Brown, G. Z. & Mark DeKay (2001). *Sun, wind & light: architectural design strategies* (2e ed.). New York: Wiley, 382 p.

<sup>110</sup> Langdon, William K. (1980). *Movable insulation: a guide to reducing heating and cooling losses through the windows in your home*. Emmaus, Pa.: Rodale Press, 379 p.

<sup>111</sup> Shurcliff, William A. (1980). *Thermal shutters and shades: over 100 schemes reducing heat-loss through windows*. Andover, Mass.: Brick House Pub. Co., 238.

<sup>112</sup> Zaheeruddin, Mohammed (1990). « Dynamic Effects of Thermal Shutters ». *Building and Environment*, vol. 25, no. 1, p. 33-35.

absolues semblables des déperditions thermiques pour les différentes orientations. Les graphiques montrent également l'intérêt des ouvertures orientées au sud et l'utilisation de l'isolation mobile sur ces ouvertures. On note alors des gains thermiques nets durant l'hiver contrairement aux ouvertures nord et est/ouest. Le modèle étudié dans le cadre de la présente recherche s'intéresse pour cette raison à une ouverture sud.



**Figure 25 :** Transferts thermiques à travers des vitrages orientés sud, est/ouest et nord pour la ville de Madison, Wisconsin, **Source :** Langdon, 1980, p. 30

Zupancic et al. (2006) s'intéresse à l'adaptabilité de l'enveloppe en différents aspects, soit l'occultation mobile ainsi que l'isolation mobile des murs et des fenêtres, sous le climat de la Slovénie. Pour une cellule expérimentale ayant des dimensions de 4 mètres par 3 mètres

par 2,5 mètres et sur une période de trois jours, l'isolation mobile au niveau des parois opaques permet une économie de 15% (3kWh). L'isolation mobile au niveau des fenêtres, sur une période de quatre jours, se traduit par une économie de 17% (10 kWh). Dans les deux cas, le mouvement des dispositifs est périodique et complètement ouvert ou fermé. Lavergne (2009) s'intéresse également à l'isolation mobile lors d'une étude d'espaces serre annexés à un appartement de la ville de Québec. Il observe des réductions importantes de la demande de chauffage de la pièce adjacente à l'espace serre durant l'hiver (35% à 48%) et le printemps (27% à 37%) et note que l'isolation mobile est essentielle en climat nordique.<sup>113</sup>

L'efficacité de l'isolant mobile, c'est-à-dire son potentiel de réduction de la consommation énergétique, dépend de plusieurs facteurs et varie énormément d'un projet à l'autre. L'économie dépend d'abord de la localisation étant donné la variation des périodes d'insolation d'un climat à l'autre et d'une latitude à l'autre<sup>114</sup>. Les propriétés de l'ouverture, soit la taille de la fenêtre ainsi que le type de vitrage, influencent également significativement le potentiel de réduction de consommation. L'orientation de l'ouverture semble toutefois peu affecter la performance absolue de l'isolant mobile (figure 25), quoiqu'une orientation sud demeure importante dans la conception d'une architecture solaire passive efficace. Le comportement de l'occupant, qui doit comprendre le fonctionnement d'un dispositif d'isolation mobile, est un facteur supplémentaire important à considérer. Enfin, le matériau utilisé comme isolant aura un effet sur l'efficacité du dispositif.

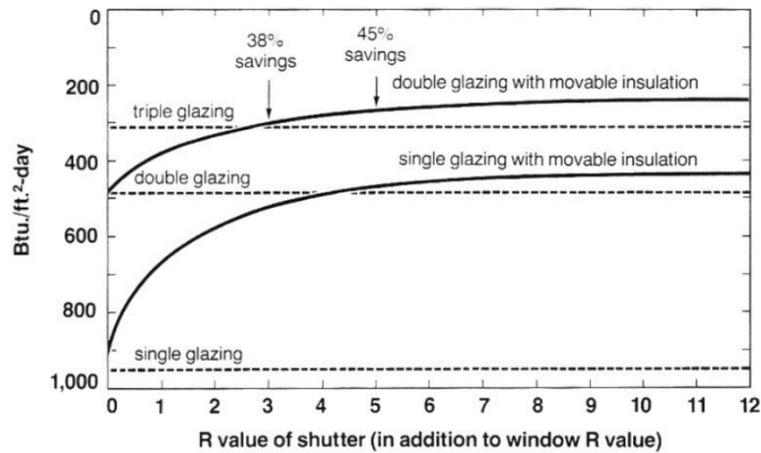
Langdon (1980) soutient que même un matériau de faible résistance thermique peut avoir un effet sérieux dans la diminution des déperditions thermiques. Comme une fenêtre possède une faible résistance thermique, l'ajout d'un isolant mobile vient facilement doubler ou tripler la résistance totale de l'ouverture. En ce sens, l'augmentation de la valeur isolante du matériau utilisé produit des effets rapidement alors qu'on observe progressivement l'apparition d'un plateau dans la réduction des déperditions. Le graph de la figure 26 démontre ce phénomène en présentant les déperditions thermiques relevées lors d'une journée de janvier (-1°C) en fonction de la résistance thermique de l'isolant mobile. L'auteur constate alors un maximum de 58% de réduction des déperditions pour un verre double et affirme

---

<sup>113</sup> Ibid, Cédric du Montier, 2013, LA FAÇADE ADAPTATIVE EN ARCHITECTURE. P 23.

<sup>114</sup> Brown, Zosia, Raymond J. Cole, Meg O'Shea & John Robinson (2009). « New Expectations in Delivering Sustainable Buildings: From occupant to inhabitant » In PLEA 2009 (Québec, 22-24 juin 2009). Québec : Les Presses de l'Université Laval.

qu'une valeur isolante R5 est optimale. Le graph montre pareillement l'intérêt de l'utilisation de l'isolation mobile et d'un verre double par rapport à l'utilisation seule d'un verre triple.



1 Btu (IT)/foot<sup>2</sup> [Btu/ft<sup>2</sup>] = 11356.526682227 joule/meter<sup>2</sup> [J/m<sup>2</sup>]

**Figure 26 :** Déperditions en fonction de la résistance de l'isolant

**Source :** Langdon, 1980, p. 54

Brown et al. (2001) notent les effets de l'isolation mobile de résistance R9 dans deux projets. Ils avancent toutefois que ces effets peuvent être en grande partie atteints avec une résistance R4 ou R5. Shurcliff (1980) soutient également qu'au-delà de R5, les effets sont moins importants. Ces deux auteurs viennent confirmer les résultats de Langdon (1980).<sup>115</sup>

L'efficacité de l'isolation mobile dépend aussi de son utilisation. Celle-ci peut être mieux ajustée à certains usages. En effet, un bâtiment administratif par exemple est caractérisé par une occupation régulière de jour. La fermeture du dispositif d'isolant mobile la nuit ne constitue donc pas un inconvénient. De plus, l'ensemble de ce type de bâtiment est de façon générale largement transparente afin d'admettre un maximum de lumière. L'impact du mécanisme peut dans ce cas être significatif. Bien que l'isolation mobile puisse être profitable dans d'autres milieux comme en milieu résidentiel, les bâtiments de type administratifs semblent plus adaptés à son utilisation. Cette recherche s'intéresse donc à l'utilisation de l'isolation mobile dans ce type de milieu.

Les dispositifs d'isolation mobile des façades adaptatives peuvent être à l'intérieurs ou à l'extérieurs. L'utilisation extérieure demeure toutefois profitable en plusieurs points. Ce type de système n'engendre pas de problèmes de condensation créés par les infiltrations entre le

<sup>115</sup> Ibid. Cédric du Montier, 2013, LA FAÇADE ADAPTATIVE EN ARCHITECTURE. P 24.

vitrage et l'isolant mobile intérieur et par le choc thermique lors de l'ouverture de ce dernier<sup>116</sup>. À ce sujet, un verre à la température de la pièce (isolant mobile extérieur) résiste beaucoup mieux au choc thermique lorsqu'exposé au froid qu'un verre froid exposé à la chaleur. De plus, un isolant mobile extérieur n'encombre pas la pièce et peut être utilisé en tant que dispositif d'occultation et de réflexion<sup>117</sup>. Un dispositif d'occultation extérieure est d'ailleurs beaucoup plus efficace puisqu'il occulte le rayonnement avant que celui-ci ne pénètre à l'intérieur. Les gains solaires internes en sont donc largement réduits. Un dispositif d'isolation mobile extérieur doit toutefois pouvoir être manœuvrable de l'intérieur et résister aux forces extérieures (vent, neige, glace) particulièrement importantes.

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre dédié aux façades adaptatives, on s'intéresse donc aux dispositifs extérieurs et à leur exploitation dans des façades adaptatives en tant que stratégie d'occultation.

Les dispositifs d'isolation mobile ont différentes formes. Ils peuvent être flexibles ou rigides en fonction principalement de leur utilisation et de leur emplacement, c'est-à-dire à l'extérieur, à l'intérieur ou entre les pans de verre. Les dispositifs extérieurs rigides sont durables et bien adaptés aux intempéries<sup>118</sup> bien qu'on puisse également noter l'utilisation extérieure d'auvents textiles et de volets en rouleau. Cette recherche étudie les panneaux rigides principalement en raison de leur capacité de résistance et en raison de la variété de formes et de configurations qu'ils peuvent prendre en fonction de leur installation. Ces formes et configurations peuvent de plus apporter différentes qualités architecturales à la façade.

---

<sup>116</sup> Quirouette, Richard L. (1980). Volets d'isolation pour fenêtres (traduit par L. Bastrash & M. L. Racette). Division des recherches sur le bâtiment. Ottawa : Conseil national de recherches du Canada, 4 p

<sup>117</sup> Shurcliff, William A. (1980). Thermal shutters and shades: over 100 schemes reducing heat-loss through windows. Andover, Mass : Brick House Pub. Co., 238.

<sup>118</sup> Perron, Jocelyn, arch. (architecture et ingénierie : isolation mobile), Génivar inc., Québec, conversation privée, février 2012.

## **PARTIE III :**

**La simulation numérique du cas d'étude**

### **Chapitre II :**

**La simulation des chambres d'hôtel  
d'affaire.**

## **PARTIE III : La simulation numérique du cas d'étude**

### **Chapitre I : La simulation des chambres d'hôtel d'affaire.**

#### **Introduction :**

Dans ce chapitre présente la technique de recherche par expérimentation par simulation pour l'évaluation du comportement thermique d'un ensemble des chambres dans un hôtel d'affaire en phase d'esquisse. Ces dernières ont été modélisée avec le logiciel ECOTECT. Les simulations ont été effectuées pour deux scénarios (avec et sans façades adaptatives). Le but de cette simulation est d'étudier l'effet de la façade adaptative sur le comportement énergétique de ces chambres. La Figure 27 est une visualisation graphique des chambres sur le logiciel ECOTECT.

#### **I.1 L'outil de travail (simulation numérique) :**

C'est l'un des outils qui consiste à simuler (faire paraître comme réelle une chose qui ne l'est pas) un système/phénomène donné afin d'étudier son fonctionnement, ses propriétés et de prédire son évolution. La simulation numérique repose sur la programmation de modèles théoriques ou mathématiques adaptés aux moyens numériques. C'est donc une série de calculs utilisant souvent la technique, dite des éléments finis effectuée sur un support matériel "ordinateur" dont les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats par des "images de synthèse".<sup>119</sup>

#### **I.2 Objectif de l'étude :**

L'objectif de la présente étude est de déterminé l'influence de type de façade sur le confort thermique dans les chambres d'hôtel, afin de confirmer ou infirmer les hypothèses citées dans le chapitre introductif.

#### **I.3 Argumentation du choix des logiciels de Simulation :**

Les logiciels de simulation informatique thermique ont connu et connaissent encore une évolution très rapide. Ils permettent de simuler l'effet de chaleur sur la consommation énergétique dans un espace architectural localisé. Cela donne la possibilité de réaliser une conception économe des bâtiments.

Nous avons opté pour le choix du logiciel ECOTECT ANALYSIS 2011, grâce à son adéquation avec notre méthodologie du travail : c'est un outil d'analyse environnementale qui

---

<sup>119</sup> BENKHEDDA Samira, 2012, Simulation multi agents d'un comportement humain face à une situation d'urgence, Mémoire présenté Pour l'obtention du diplôme de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran, p 13.

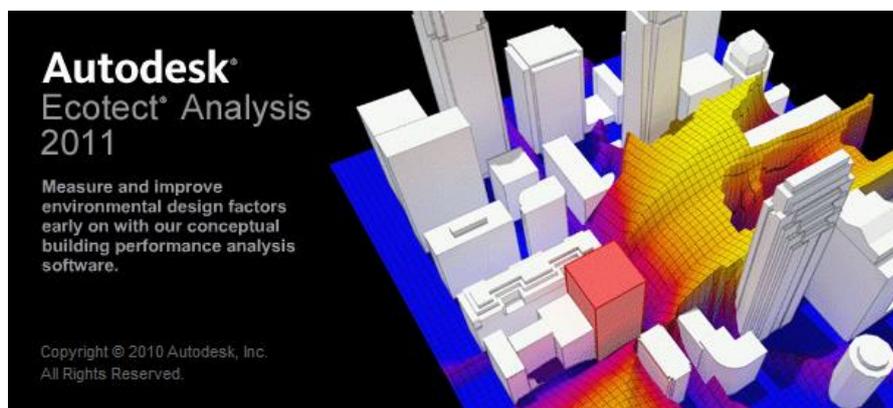
offre un large choix de fonctionnalités de simulation et d'analyse qui peut améliorer la qualité du confort des bâtiments.

Il permet, aux concepteurs de travailler facilement en 3D et appliquer tous les outils nécessaires en un temps efficace. Il compte d'une série d'outils d'analyse et de traitement de données qui simplifient plus d'un autre logiciel le travail des architectes.

Il appartient au groupe Autodesk, ce qui simplifie l'interaction avec les fichiers en 2D (Format DFX).

### **I.3.1. Présentation de logiciel de simulation Ecotect 2011 :**

Ecotect est un logiciel de simulation développé pour la première fois par Andrew Marsh et récemment approprié par la société américaine Autodesk<sup>120</sup>. Ecotect a été conçu avec comme principe que la conception environnementale la plus efficace est à valider pendant les premières étapes conceptuelles du design<sup>121</sup>. En plus des différentes possibilités de calcul qu'il offre pour les analyses énergétiques, performance thermique, consommation d'eau et évaluation des coûts, Ecotect permet aussi d'avoir une idée précise sur le rayonnement solaire (en visualisant le rayonnement solaire sur les fenêtres et les autres surfaces, à n'importe quelle période de l'année), sur l'éclairage naturel (en calculant les valeurs des facteurs d'éclairage naturels et les niveaux d'éclairement à n'importe quel point du modèle) et aussi sur les ombres et réflexions (en affichant la position et le parcours du soleil par rapport au modèle à la date, à l'heure et à l'emplacement choisis).<sup>122</sup>



**Figure 27:** Ecotect Analysis 2011

**Source:** Ecotect Analysis 2011

<sup>120</sup> Diego Ibara (2010), Using ECOTECT for Exterior Qualitative Solar Analysis: Direct Shading Analysis, Harvard Design School. Article disponible sur : <https://gradebuddy.com/doc/2868035/direct-shading-analysis?full=1>

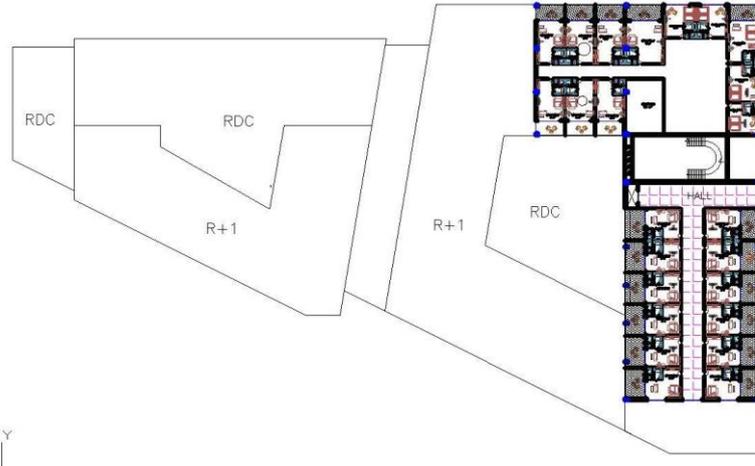
<sup>121</sup> Mohamed-Anis Gallas (1999), Lumière naturelle en phase de conception : quels outils/méthodes pour l'architecte, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy. P 30.

<sup>122</sup> Autodesk FR, disponible sur : <https://knowledge.autodesk.com/support/ecotect-analysis/learn-explore/caas/video/youtube/watch-v-BKZ35xh4ofw.html>

## I.4. La méthode de simulation :

### I.4.1. Préparation des plans :

La première tâche est de dessiner les plans et l'environnement immédiat de l'objet d'étude en utilisant le logiciel Autodesk-Autocad 2016.

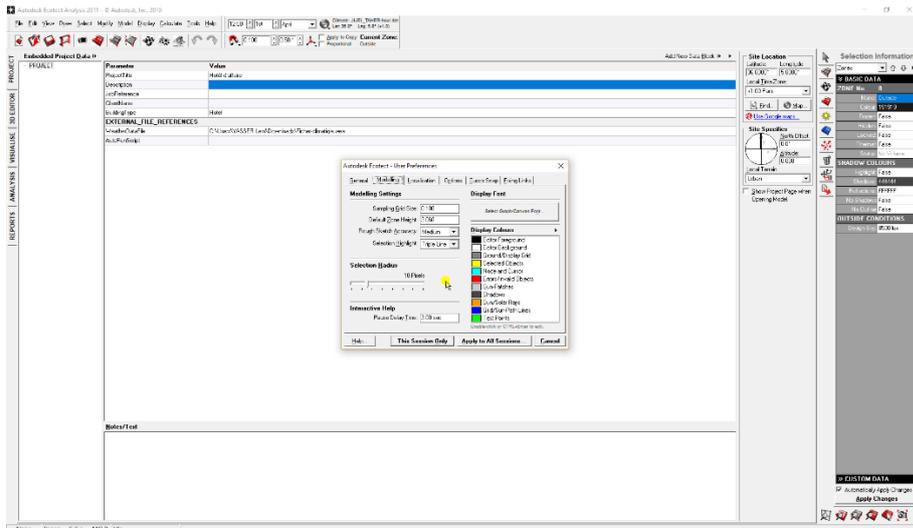


**Figure 28 :** Le plans dessinés

**Source :** Auteur

### I.4.2. Paramétrage de l'Ecotect Analysis :

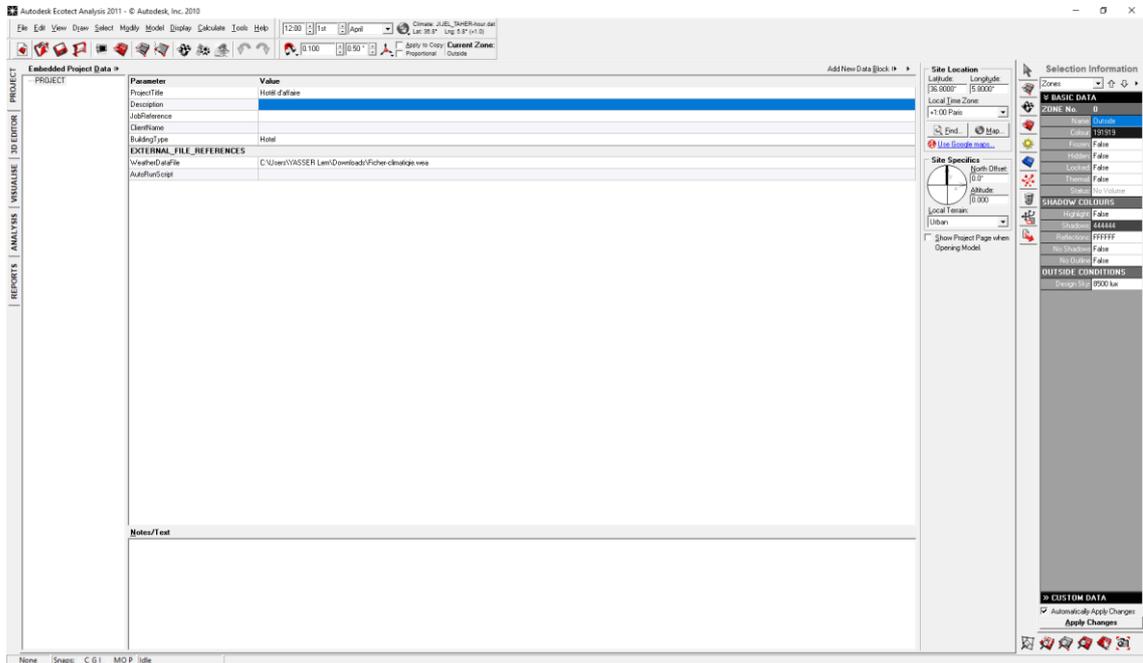
Cette tâche sert à introduire dans le logiciel les informations essentielles pour l'obtention des résultats adéquats. Ces paramètres contiennent toutes les données relatives au modèle et à son environnement à savoir :



**Figure 29 :** modification de la dimension du modèle.

**Source :** Ecotect Analysis 2011

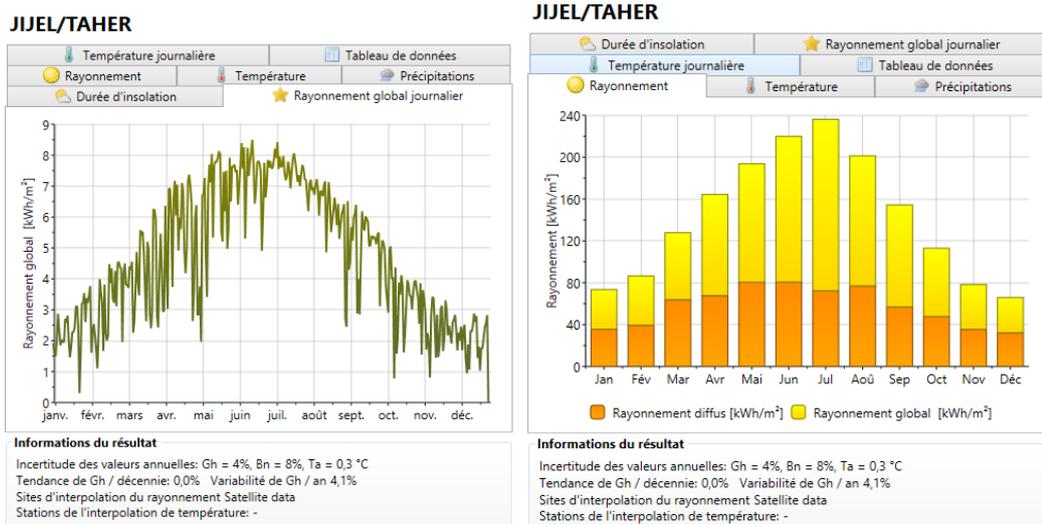
**I.4.2.1. La description du projet :** Dans cette première phase de travail, les informations sur le projet (son nom, genre et sa destination ainsi que son emplacement géographique).



**Figure 30 :** Discription du projet et importation du fichier “ \*.WEA “ de Jijel.

**Source :** Ecotect Analysis 2011

**I.4.2.2. Les données climatiques :** avant de démarrer le travail il faut ajouter un fichier de format ” Weather data ” créer par le logiciel meteonorm7 convertit vers format WEA pour que l'Ecotect la connaisse.

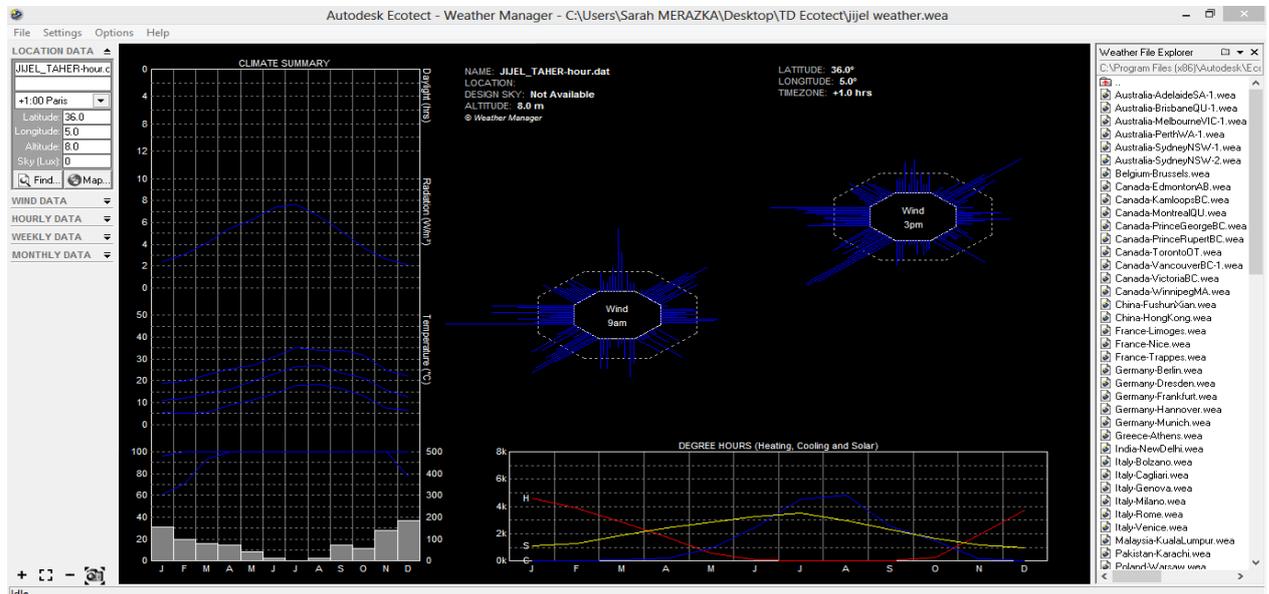


**Figure 31 :** quelque résultat de météonorm7 concernant le rayonnement et le rayonnement global journalier

**Source :** meteonorm7

Dans notre cas, on a utilisé un fichier météo de la ville de Jijel qui contient les différentes données climatiques comme : la température, le régime des vents, l'humidité et l'ensoleillement.

On peut aperçu ces données de la commande WEATHER TOOL.

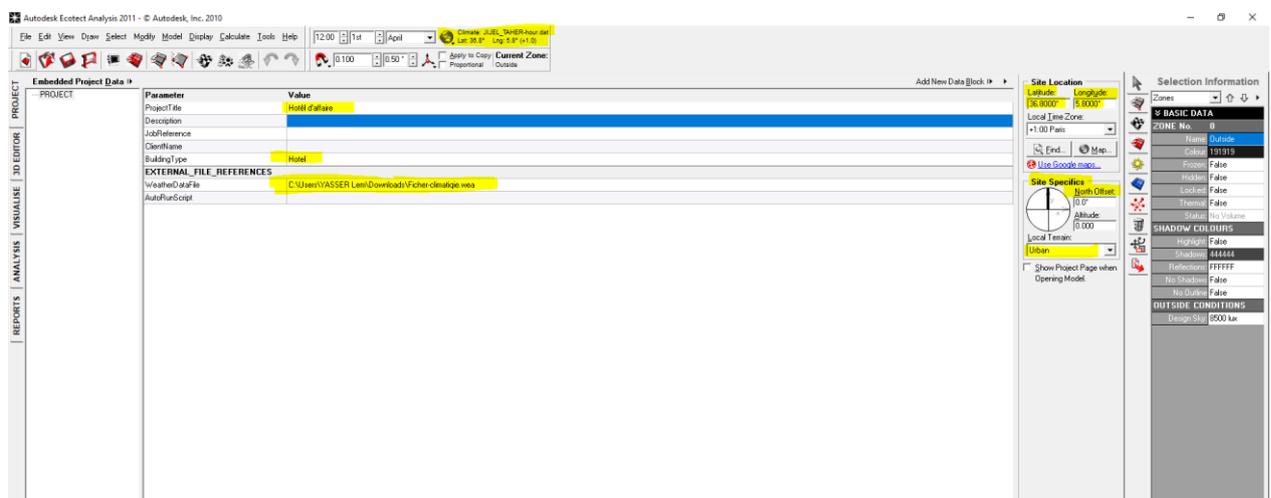


**Figure 32 :** Aperçu ces données de la commande WEATHER TOOL.

**Source :** Ecotect Analysis 2011.

### I.4.2.3 L'orientation :

La définition des paramètres de l'orientation dès le début est une obligation, parce que c'est l'étape la plus importante dans le processus de simulation, ainsi que la définition de la nature de site et le choix de type urbain.

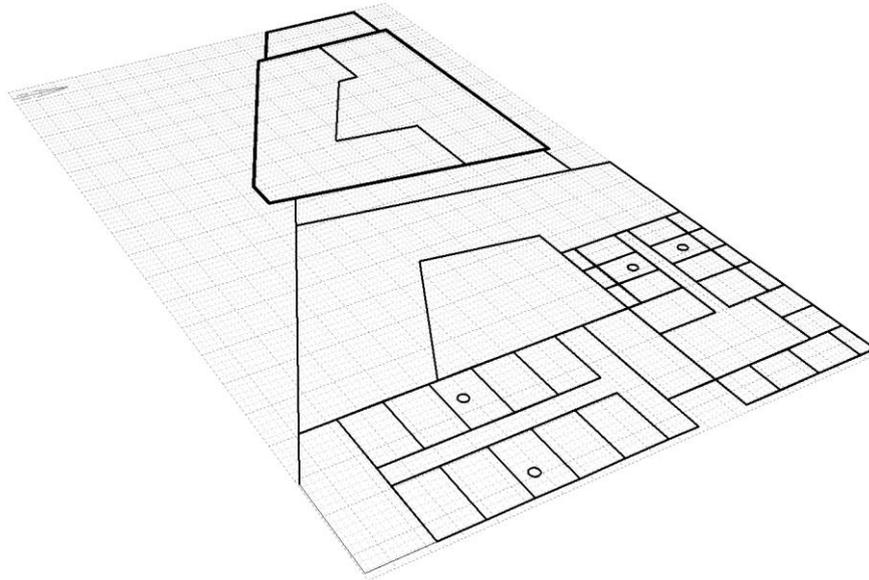


**Figure 33 :** le paramétrage du logiciel.

**Source :** Ecotect Analysis 2011.

### I.4.3. Importation des plans :

Après avoir modelé Les plans de l'objet d'étude par le logiciel Autocad 2016, et enregistré sous format DXF pour les connaître par Ecotect, on l'importe en prenant en considération le réglage de différents paramètres tel que la compatibilité des échelles.

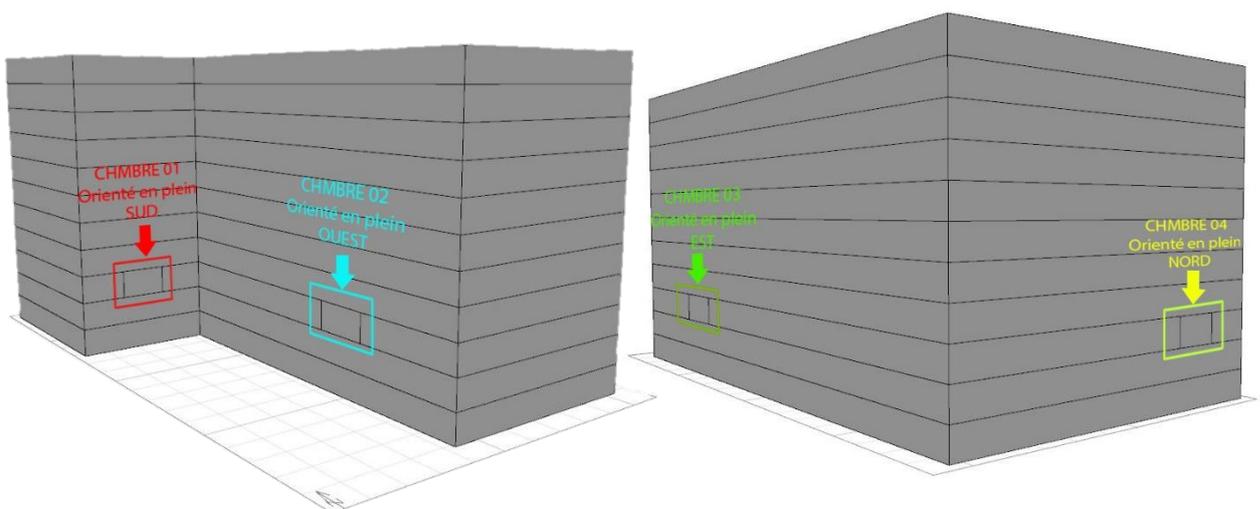


**Figure 34 :** Importation du fichier DXF.

**Source :** Ecotect Analysis 2011.

### I.4.4. Modelage en 3D :

Avec l'utilisation de la barre 'modélisation' de l'Ecotect, on a modelé la 3D des chambres objets d'études avec ses entourage immédiat avec la commande « Zone ».

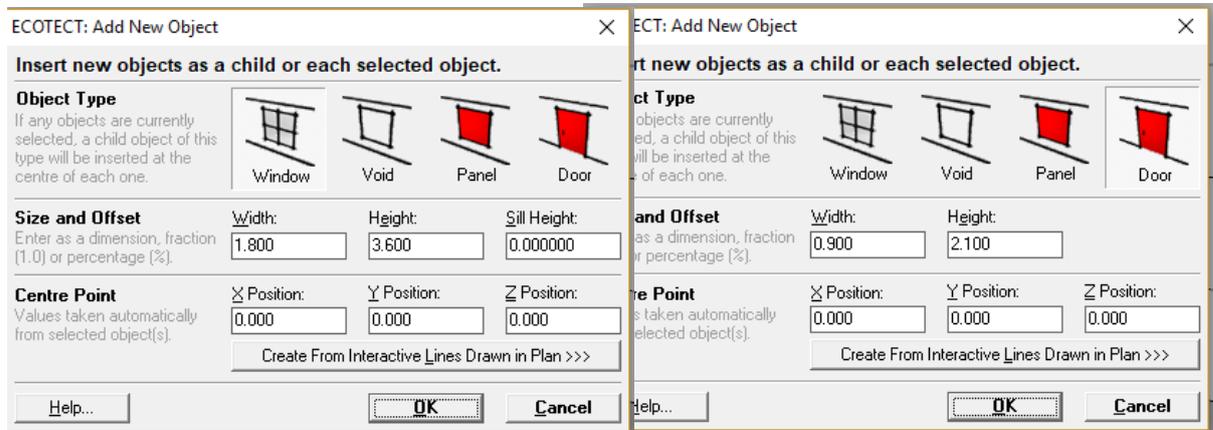


**Figure 35 :** Modélisation de la 3D en Ecotect.

**Source :** Ecotect Analysis 2011.

### I.4.5. Insertion des ouvertures et des portes :

La possibilité de manipulation de l'emplacement de l'ouverture dans la fenêtre 3d lors et après l'ajout de l'ouverture.



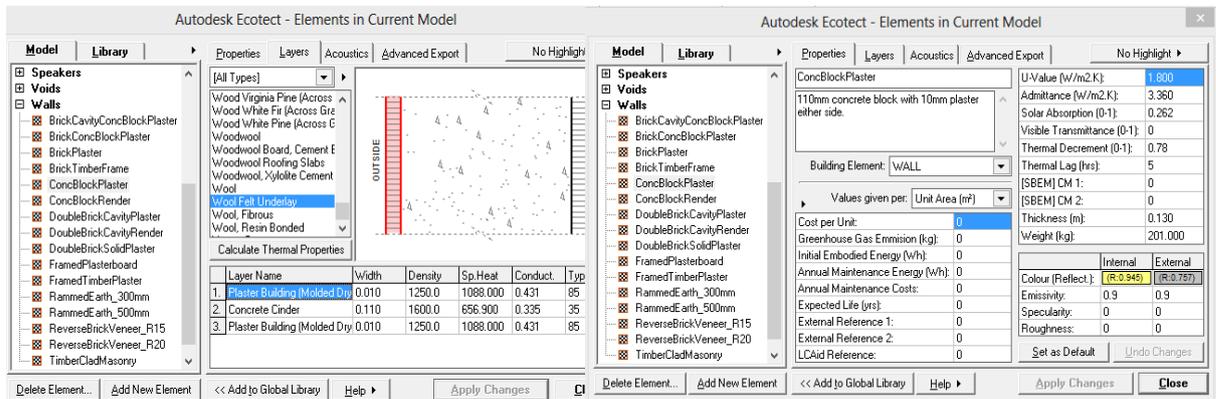
**Figure 36 :** Insertion des ouvertures et des portes.

**Source :** Ecotect Analysis 2011.

### I.4.6. Le choix des matériaux :

Le choix des caractéristiques des matériaux/textures revêtant les composantes internes de l'espace (sol, murs et plafond) sont faites depuis la liste des matériaux de la bibliothèque intégrée dans le logiciel. Cela, dans le but d'obtenir des résultats plus proches à la réalité.

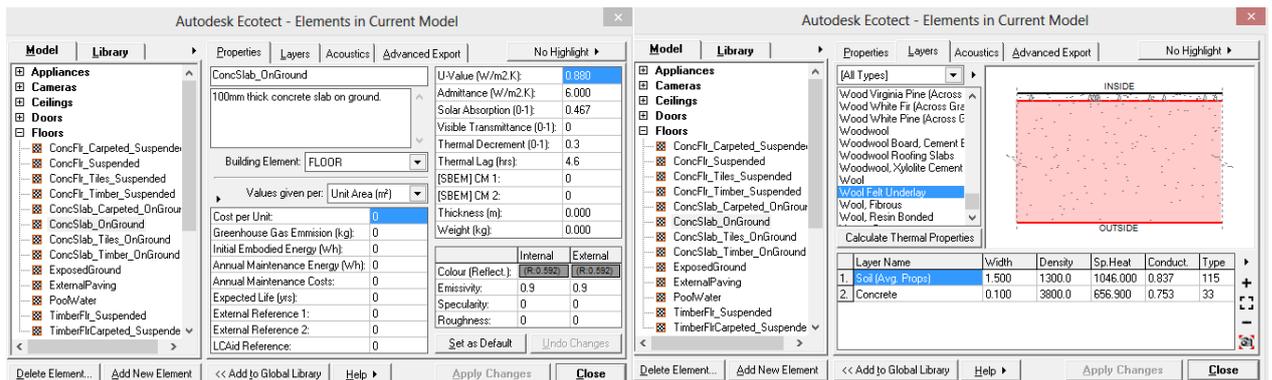
#### a. Les murs (Walls) :



**Figure 37 :** Insertion des matériaux des Murs.

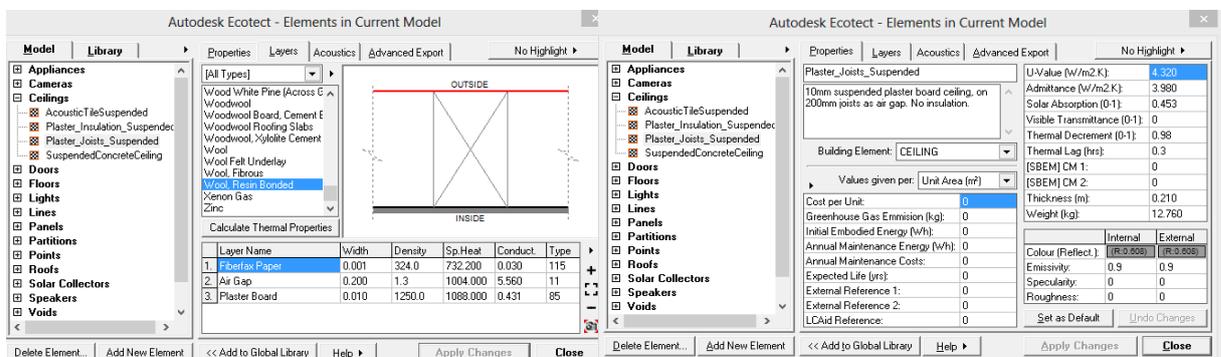
**Source :** Ecotect Analysis 2011.

## b. Sol (Floor) :



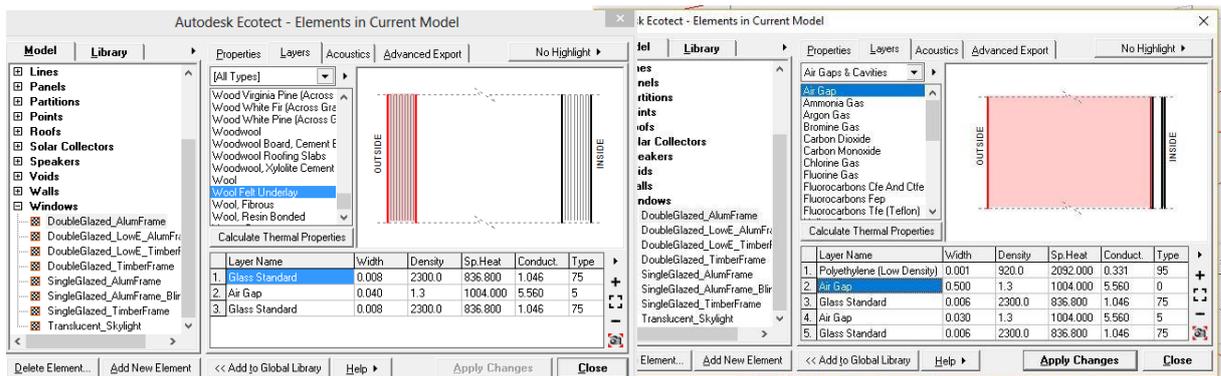
**Figure 38 :** Insertion des matériaux du sol.  
**Source :** Ecotect Analysis 2011.

## c. Plafond (Ceiling) :



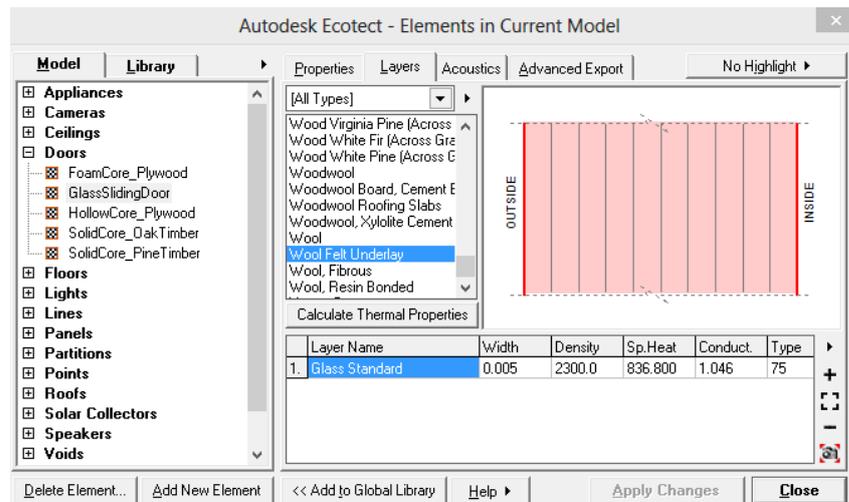
**Figure 39 :** Insertion des matériaux des plafond.  
**Source :** Ecotect Analysis 2011.

## d. Ouverture (Windows) :



**Figure 40 :** Insertion des matériaux des ouverture. (Scénario 01 et 02)  
**Source :** Ecotect Analysis 2011.

## e. Portes (Doors) :



**Figure 41 :** Insertion des matériaux des portes.

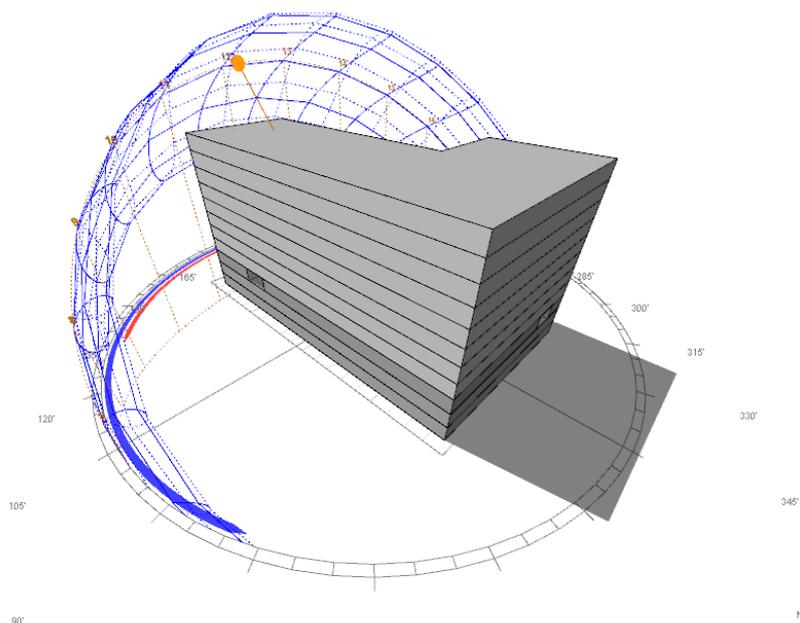
**Source :** Ecotect Analysis 2011.

## I.5. Protocole de simulation :

### I.5.1. Le projet objet de simulation dans son environnement immédiat :

Dans toute simulation vis a évalué la qualité du confort visuel dans un local il est obligatoire d'ajouté l'objet d'étude a l'interface de travail avec son environnement.

Les chambres objets de simulation sont au 12eme étage qui est exposée à l'extérieur vers les 4 orientations.

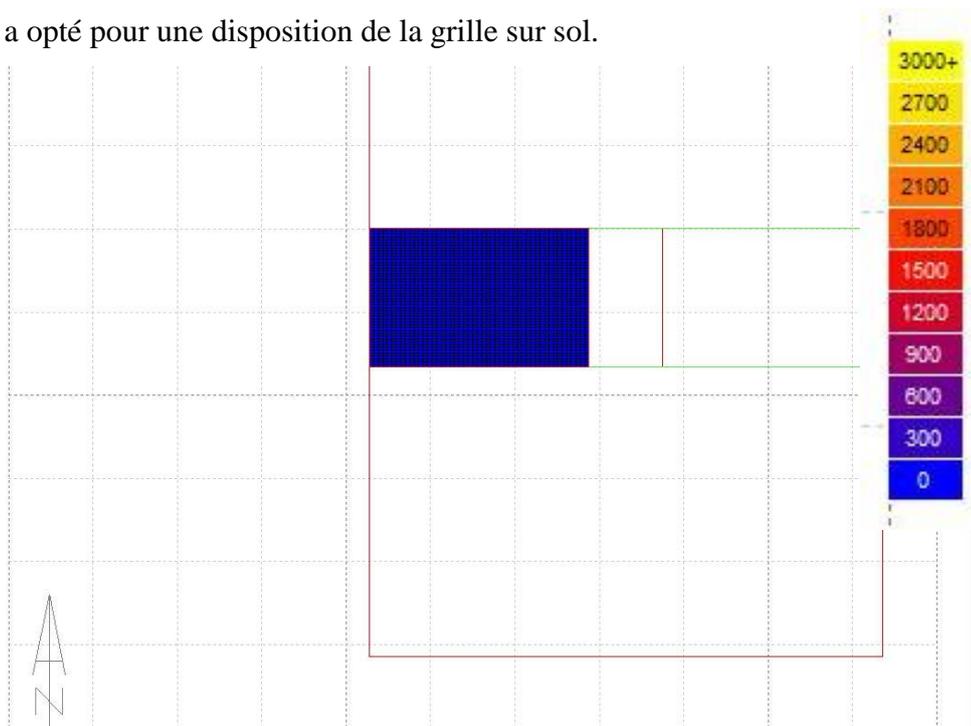


**Figure 42 :** L'ensoleillement annuel des tours

**Source :** Ecotect Analysis 2011

### I.5.2. Les grilles d'analyses des chambres :

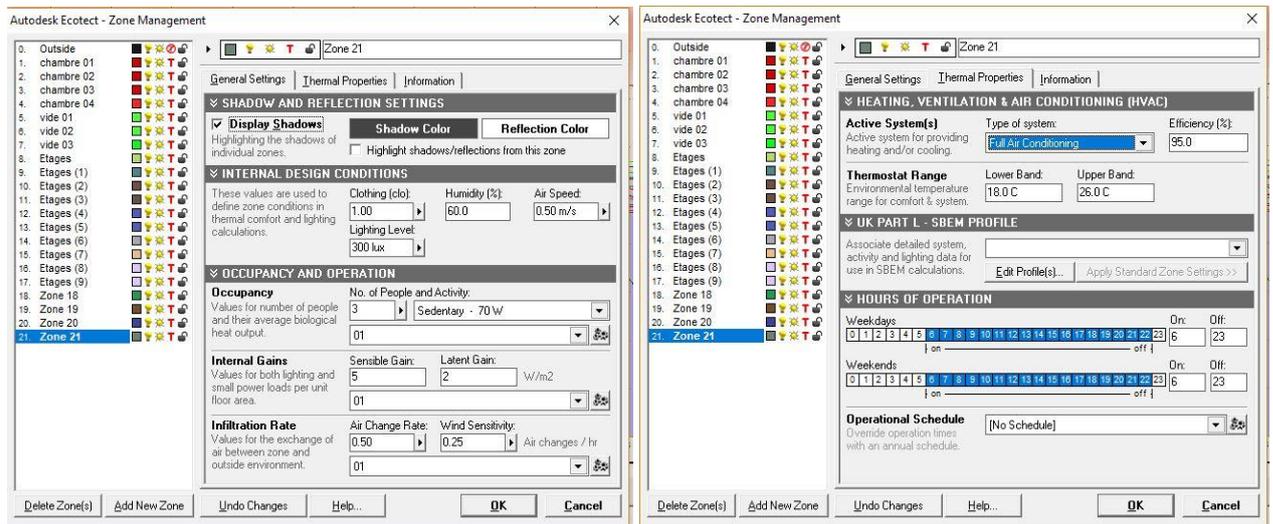
On a opté pour une disposition de la grille sur sol.



**Figure 43 :** Grille d'analyse.  
**Source :** Ecotect Analysis 2011

### I.5.3. Les périodes et le mode d'occupation :

Le logiciel nous permet de déterminer : les périodes d'occupation (journalière, saisonnière,), le mode d'occupation : repos, activité physique, mentale, et le nombre

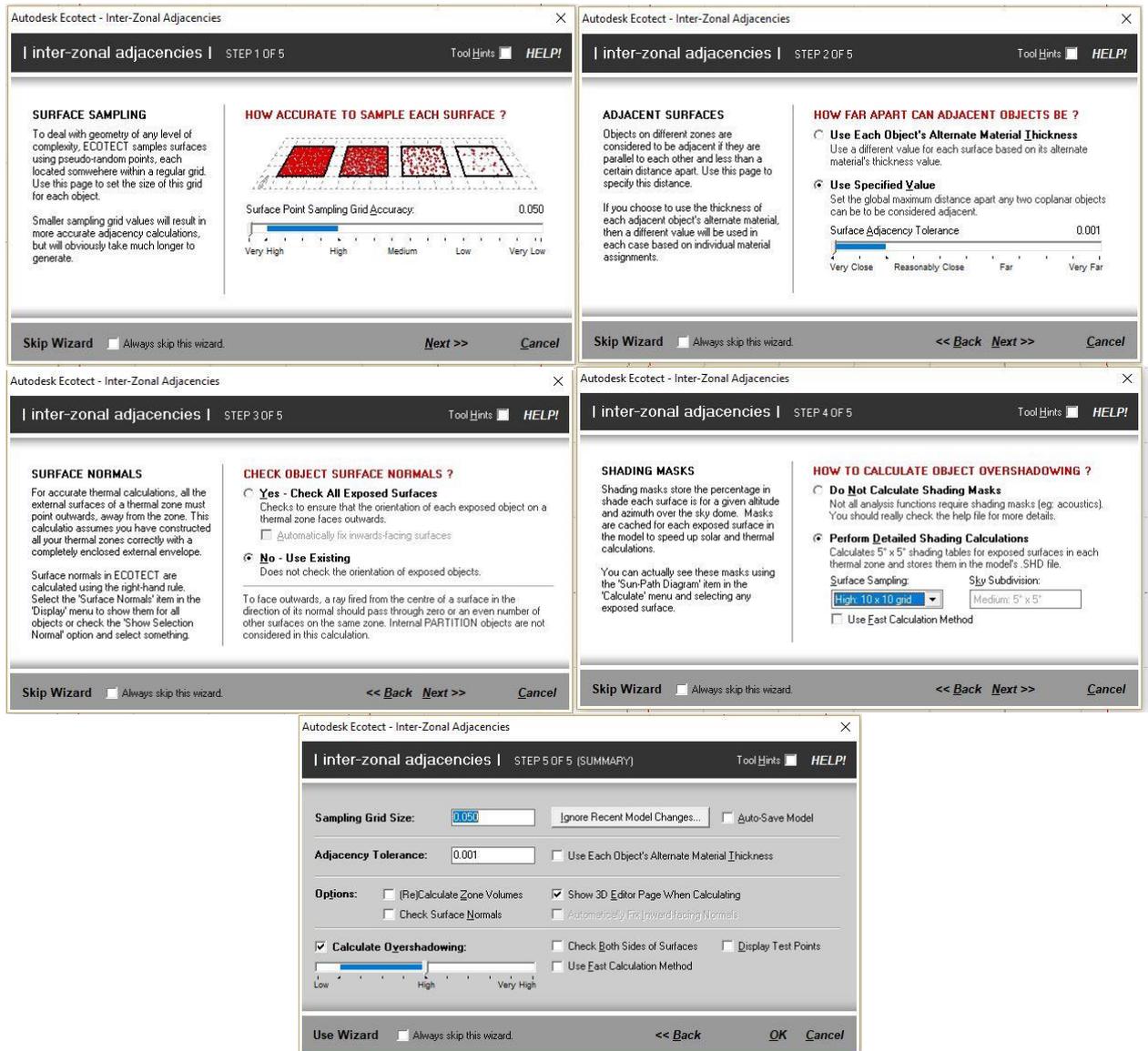


d'usagers.

**Figure 44:** Insertion des périodes d'occupation et les autres facteurs.  
**Source :** Ecotect Analysis 2011

## I.5.4. Le lancement de la simulation :

Le logiciel nous permet un nombre important des paramètres pour l'obtention des résultats plus exact lors la simulation.



**Figure 45 :** La boite de dialogue a 5 étapes pour le lancement de la simulation.  
**Source :** Ecotect Analysis 2011

## I.6. Les résultats de simulation :

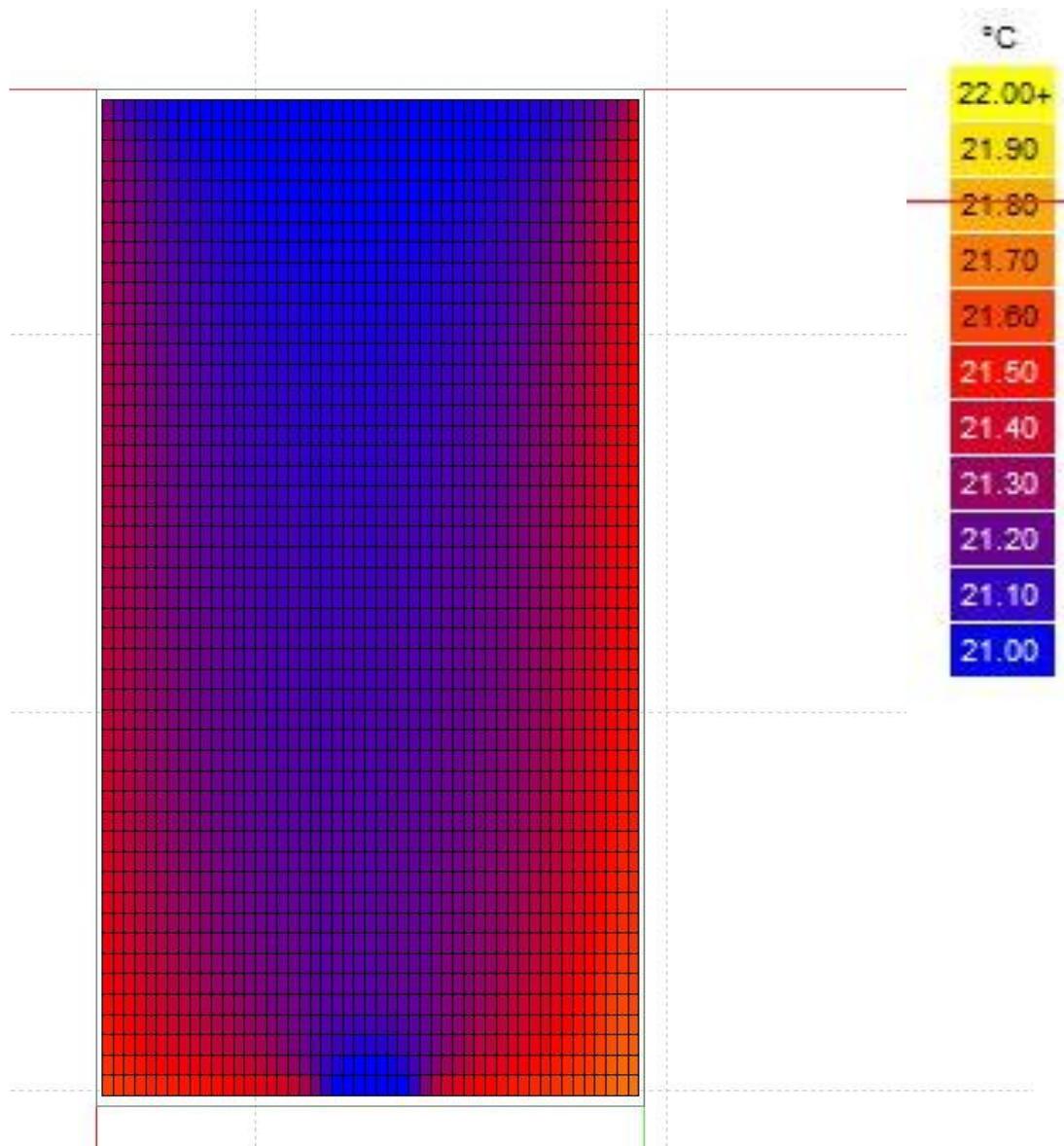
### I.6.1 Chambre 01 (NORD) :

#### I.6.1.1 Scénario a (sans façade adaptative) :

##### a) Les sources de chaleurs :

Les sources de la chaleur radiante sur la **chambre 01** sont représentées sur la figure 46, une valeur maximum de 22 degré Celsius et un minimum de 21 sont obtenue. On

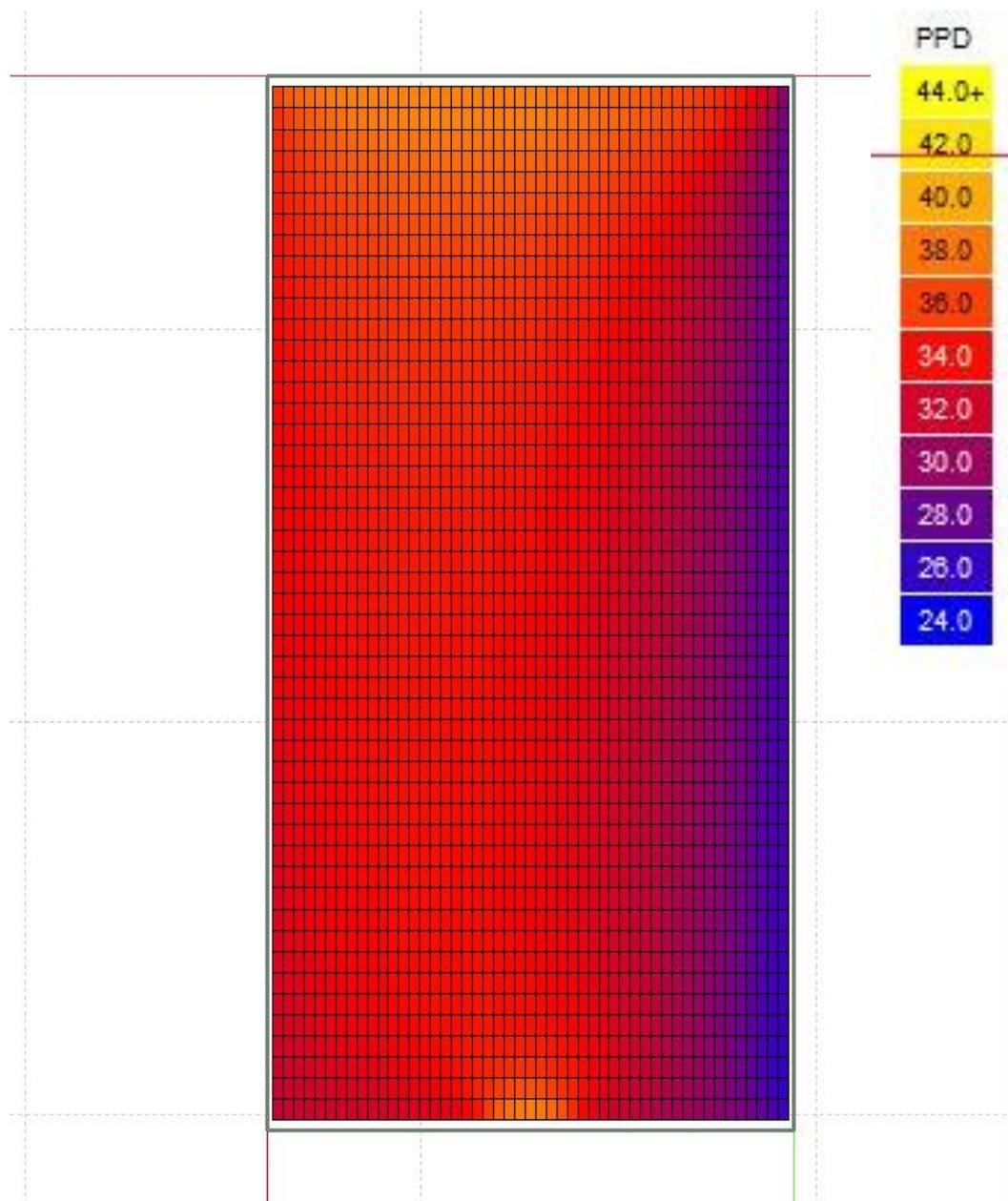
remarque que la quantité la plus importante est obtenue depuis le vitrage de mur rideau extérieur. Et depuis les chambres du côté Est et OUEST.



**Figure 46 :** Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario A)  
**Source :** Ecotect Analysis 2011

### **B) Le taux de l'insatisfaction :**

La figure 47, représente les résultats de l'insatisfactions obtenu par ECOTEC, pour l'occupation projeté de **la chambre 01** par 3 personnes en état de repos.

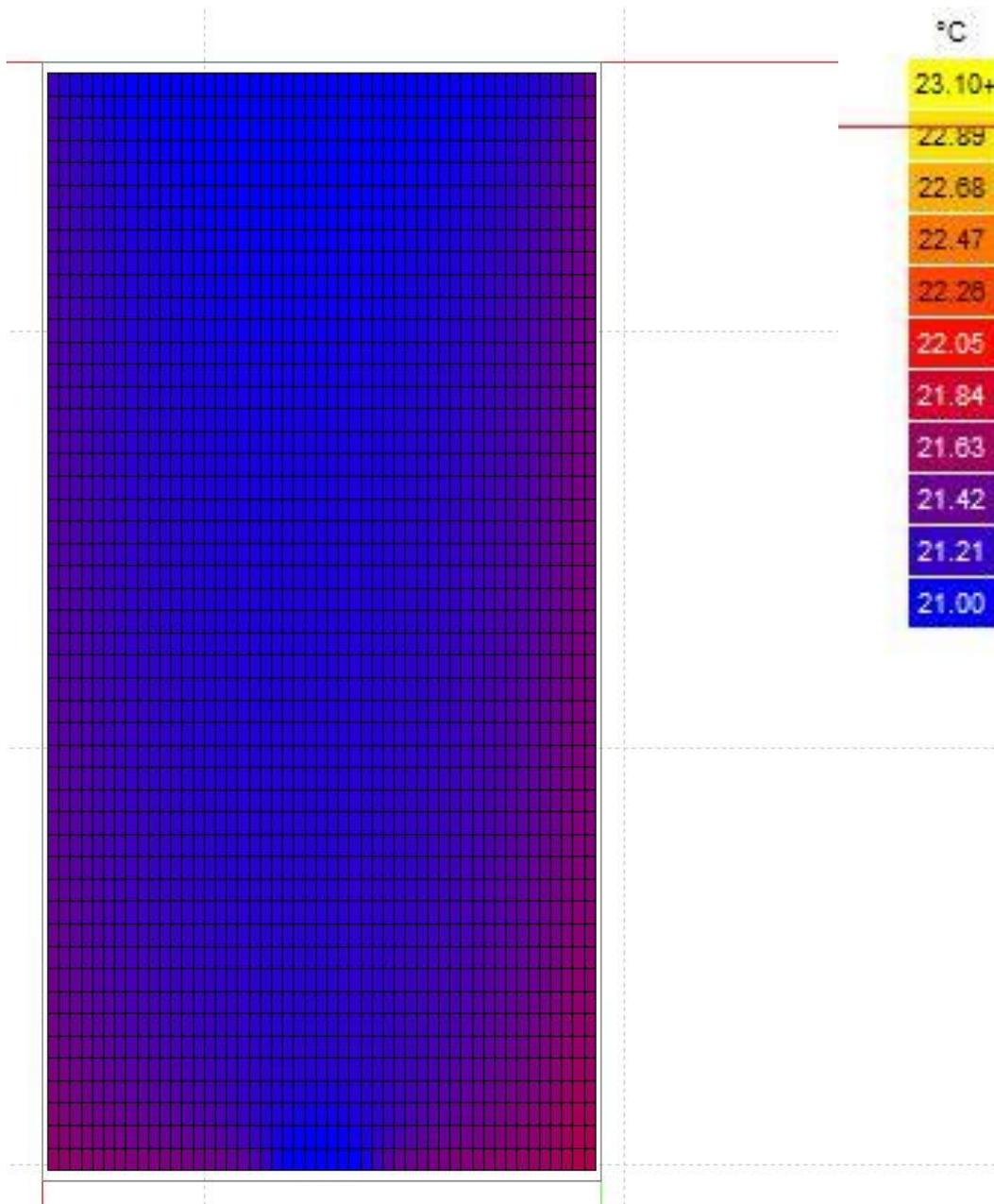


**Figure 47 :** Résultat de simulation de pourcentage de l'insatisfaction. (Scénario A)  
**Source :** Ecotect Analysis 2011

### I.6.1.2 Scénario b (avec façade adaptative) :

#### a) Les sources de chaleurs :

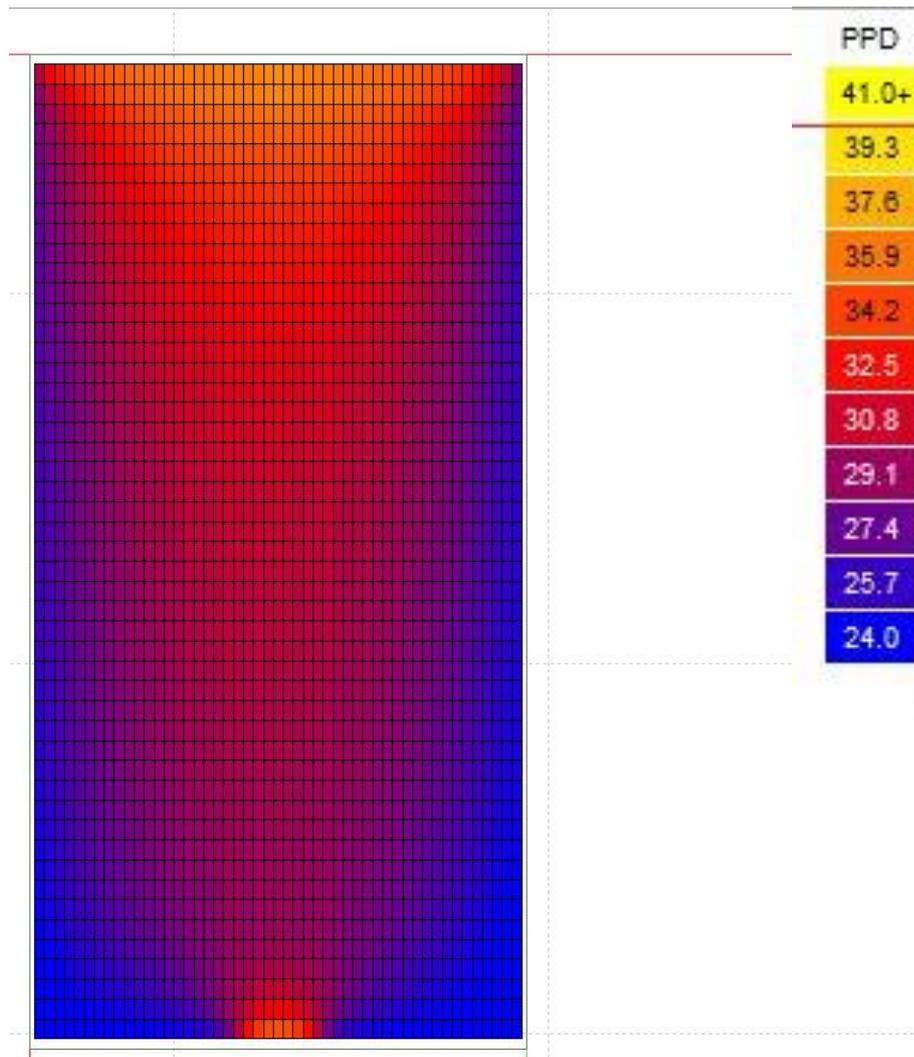
En ajoutant une façade adaptative, on remarque que les sources de la chaleur radiante sur **la chambre 01** (représentées sur la figure 48), sont réduits où on obtient une valeur maximum de 22 degré Celsius et un minimum de 21. On remarque que la quantité la plus importante est obtenue depuis le vitrage de mur rideau extérieur. Et la quantité depuis les chambres du côté EST et OUEST est diminuée remarquablement.



**Figure 48 :** Résultat de simulation des sources de chaleurs radiante. (Scénario B)  
**Source :** Ecotect Analysis 2011

### **B) Le taux de l'insatisfaction :**

La figure 49, représente les résultats de l'insatisfactions obtenu par ECOTEC, pour l'occupation projeté de **la chambre 01** par 3 personnes en état de repos. On remarque une diminution apparente par rapport aux premiers résultats.



**Figure 49 :** Résultat de simulation de pourcentage de l’insatisfaction. (Scénario B)

**Source :** Ecotect Analysis 2011

## Conclusion :

Dans ce chapitre on a expliqué la méthode de simulation, en présentant quelques scènes obtenues lors la simulation par l’ECOTECT ANALYSIS 2011, dans une journée spécifique, le 21 juillet qui est la journée la plus chaude tout au long de l’année pour la zone de Jijel selon les données climatiques obtenue à partir de Méteonorm 7.

On a commencé par une simulation du cas d’étude pour un 1<sup>er</sup> scénario, où on utilise que le double vitrage pour les murs rideaux des chambres. Ensuite, dans le 2<sup>eme</sup> scénario, on a ajouté une façade adaptative à double peaux, pour étudier l’effet de cette dernière sur le confort thermique dans les chambres objet d’étude. Les résultats concernant la chambre 01 obtenus sont démontrés dans ce chapitre, les résultats des chambres 02, 03 et 04 sont jointent dans l’annexe. L’interprétation est faite dans le chapitre suivant.

## **Chapitre II :**

**Analyse et interprétation des résultats.**

## Chapitre II : Analyse et interprétation des résultats.

### Introduction :

Il est nécessaire d'expliquer les résultats qu'on a eu de la simulation précédente de confort thermique des chambres, pour évaluer l'efficacité énergétique de la façade adaptative sur les bâtiments.

Aussi, on va proposer un ensemble des solutions qui seront vérifiées par rapport aux normes, on se basant sur les résultats obtenus. Le choix sera dégagé en fonction de leur efficacité en ce qui concerne l'amélioration de confort thermique à l'intérieur des chambres en utilisant l'adaptabilité des façades, et leurs panneaux isolant mobiles, qui permettent une pénétration contrôlée des rayons solaires et donc un bénéfice maximal des potentialités énergétique naturel, en réduisant la nécessité d'utiliser les énergies artificielles (électricité) pour le chauffage ou bien pour la climatisation.

### II.1. Analyse et interprétation des résultats :

Comme cité précédemment, la méthode d'évaluation numérique pour déterminer les taux de confort thermique des de scénarios choisi, nous a donnée des résultats intéressants.

Alors, l'évaluation sera faite sur la base des données extraites. (Tableau 01, 02). Et a l'aide de l'Excel on a obtenu des histogrammes en barres qui nous permet d'une lecture et d'une comparaison plus facile des résultats obtenus.

Scénario	Scénario 01 (Sans façade adaptative)		Scénario 02 (Avec façade adaptative)	
	Chaleur MAX	Chaleur MIN	Chaleur MAX	Chaleur MIN
Chambre 01 (NORD)	23 °C	22 °C	22 °C	21 °C
Chambre 02 (SUD)	25 °C	21 °C	23 °C	21 °C
Chambre 03 (EST)	33 °C	25 °C	23 °C	21 °C
Chambre 04 (OUEST)	37 °C	32 °C	22 °C	21 °C

**Tableau 01 :** Résultat de simulation de chaleur latente dans les 2 scénarios choisi

**Source:** Auteurs

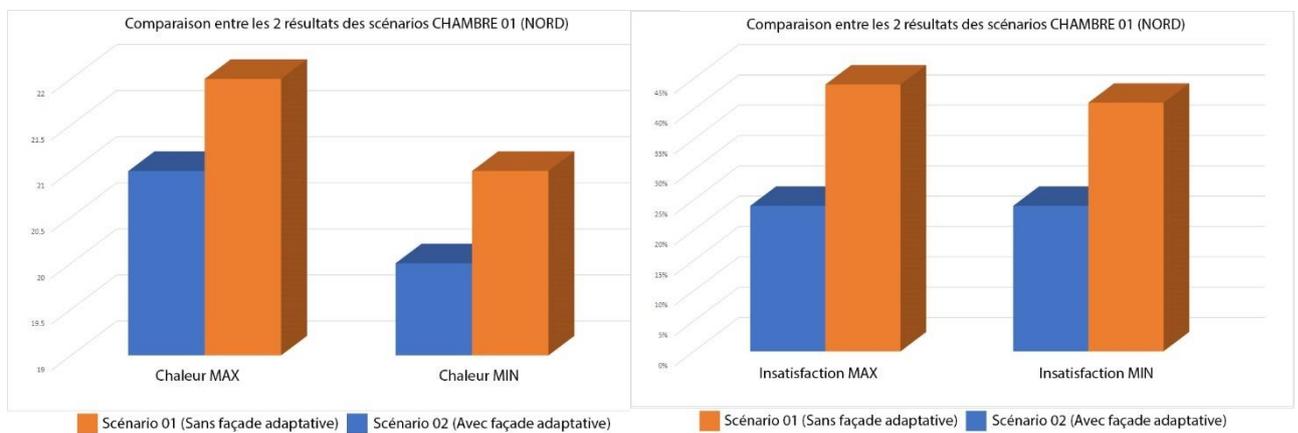
Scénario	Scénario 01 (Sans façade adaptative)		Scénario 02 (Avec façade adaptative)	
	Insatisfaction MAX	Insatisfaction MIN	Insatisfaction MAX	Insatisfaction MIN
Chambre 01 (NORD)	44 %	41 %	41 %	24 %
Chambre 02 (SUD)	41 %	21 %	35 %	21 %
Chambre 03 (EST)	0 %	0 %	0 %	0 %
Chambre 04 (OUEST)	100 %	90 %	33 %	21 %

**Tableau 02 :** Résultat de simulation d'Insatisfaction dans les 2 scénarios choisis

**Source :** Auteurs

Comme mentionné précédemment, la date choisie pour ces simulations était la journée la plus chaude de l'année (le 21 juillet), obtenue selon les calculs faits par Ecotec Analysis 2011 de la base de données exportée depuis Météonorm7.

### II.1.1 Chambre 01 (NORD) :



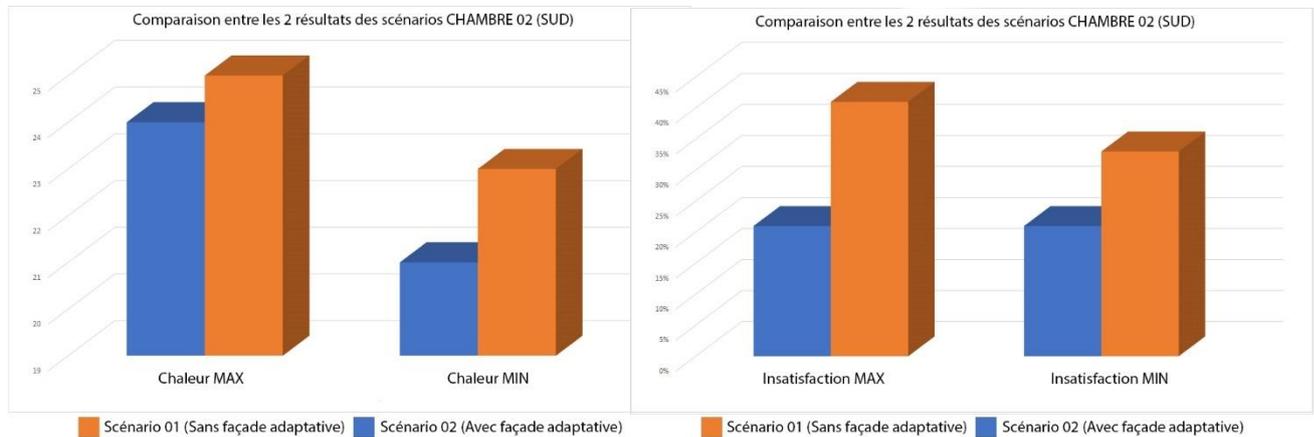
**Figure 50 :** Comparaison entre les résultats obtenus des 2 scénarios pour la chambre 01.

**Source:** Auteurs

- On remarque une diminution de 9% de chaleur latente dans la **chambre 01** après la mise en place des panneaux isolants mobiles de la façade adaptative.
- Cette réduction peut être considérée comme des gains énergétiques, où on n'a plus besoin d'utiliser la climatisation pour la réduction de chaleur dans la chambre.

- Le taux de l'insatisfaction est réduit par **27%** après la mise en place d'une façade adaptative, ce qui veut dire que le confort thermique dans cette chambre est amélioré par **27%** du cas où on n'utilise que le double vitrage de mur rideau.

### II.1.2 Chambre 02 (SUD) :

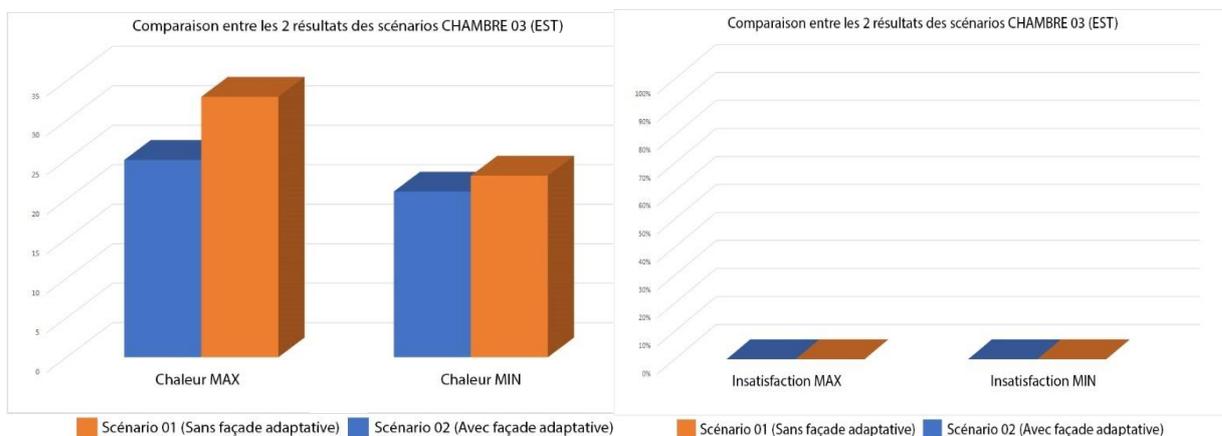


**Figure 51 :** Comparaison entre les résultats obtenues des 2 scénarios pour la chambre 02.

**Source :** Auteurs

- On remarque une démunitions de **5%** de chaleur latente dans la **chambre 02** après la mise en place des panneaux isolants mobile de la façade adaptative.
- Le taux de l'insatisfaction est réduit par **10%** après la mise en place d'une façade adaptative, ce qui veut dire que le confort thermique dans cette chambre est amélioré par **10%** du cas où on n'utilise que le double vitrage de mur rideau.

### II.1.3 Chambre 03 (EST) :

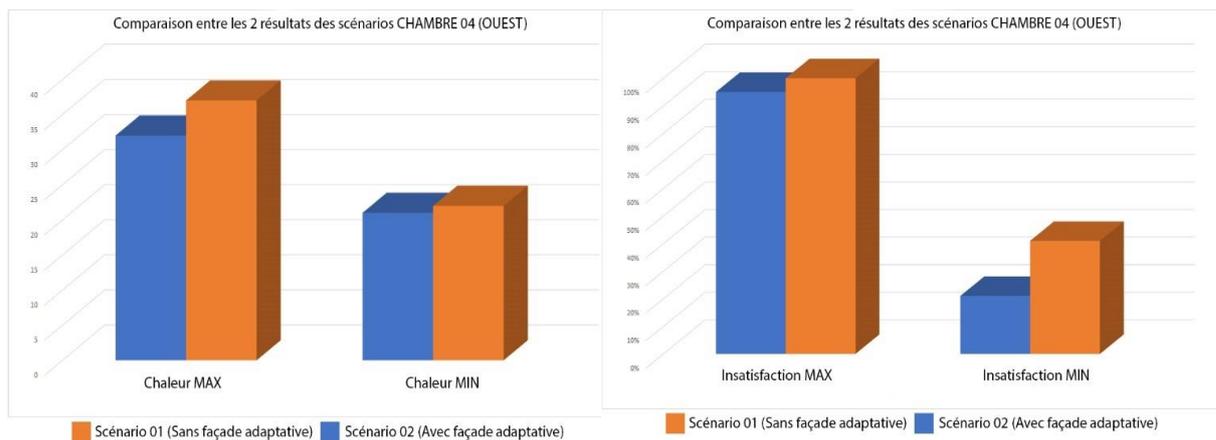


**Figure 52 :** Comparaison entre les résultats obtenues des 2 scénarios pour la chambre 03.

**Source :** Auteurs

- On remarque une démunissions de **25%** de chaleur latente dans **la chambre 03** après la mise en place des panneaux isolants mobile de la façade adaptative.
- Vue que logiciel Ecotec considère que la chambre est orienté vers une orientation meilleur, il affirme que le confort thermique dans cette chambre sera idéal pour les 2 scénario, ou on remarque que les résultats obtenues sont identiques.

#### II.1.4 Chambre 04 (OUEST) :



**Figure 53 :** Comparaison entre les résultats obtenus des 2 scénarios pour la chambre 04.

**Source :** Auteurs

- On remarque une démunissions de **38%** de chaleur latente dans **la chambre 04** après la mise en place des panneaux isolants mobile de la façade adaptative.
- Le taux de l'insatisfaction est réduit par **72%** après la mise en place d'une façade adaptative, ce qui veut dire que le confort thermique dans cette chambre est amélioré par **72%** du cas où on n'utilise que le double vitrage de mur rideau.

#### Conclusion :

Il est important de souligner que les façades adaptatives affectent non seulement l'apparence générale de l'espace, mais aussi le confort thermique des usagers en augmentant le niveau de satisfaction et en réduisant la température dans l'espace en limitant l'utilisation des ventilation mécaniques, qui réduit en suite la consommation énergétique, donc il faut profiter de ces façades lors de la conception, en fonction du climat, situation géographique, caractère fonctionnel de l'espace...etc. Afin d'aboutir un maximum des résultats souhaités et recommandés.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale :**

Cette recherche exploratoire a comme objectif de démontrer l'impact énergétique de l'utilisation journalière de la façade adaptative avec les panneaux isolants mobiles, sous le climat de la ville de Jijel en venant illustrer l'effet de cette façade en tant que dispositifs mobiles d'occultation sur le contrôle de la consommation énergétique. Elle cherche également à évaluer et à classer divers scénarios de manipulations en fonction de présence et absence de ces dispositifs sur la façade d'un projet, du rapport entre potentiels d'économie d'énergie et de contrôle de l'éclairage ainsi qu'en fonction du potentiel d'adaptabilité.

Les résultats illustrent la complexité de l'introduction d'éléments mobiles en architecture sur la prédiction de la performance environnementale. En effet, les performances quantitatives énergétiques varient significativement en fonction des scénarios proposés exprimant ainsi l'impact potentiel de la subjectivité des occupants. Bien que les effets du mouvement ne soient pas intuitifs, les résultats de cette recherche montrent que les façades adaptatives présentent un potentiel énergétique et lumineux appréciable lors de journée étudiée. Ils permettent également de qualifier l'utilisation de ces façades en tant qu'opportunité d'adaptation par les occupants dans le cadre d'une architecture adaptative.

En fin, on peut dire qu'après l'interprétation des résultats obtenus, il est absolument nécessaire d'intégrer une façade adaptative dans la conception de l'hôtel cas d'étude où on recommande :

### **II.2.1. Recommandations concernant le cas d'étude :**

- Une façade adaptative, avec des panneaux isolant mobiles est une nécessité pour le but d'augmenté consommation énergétique de bâtiment.
- L'utilisation de ce type de façade permet de profiter automatiquement et d'une manière effective des rayons solaires.
- L'intégration de ce type de façade permet d'abandonner l'installation des sheds ou des rideaux dans les chambres d'hôtel et donc réduire le coût total d'aménagement.

### **II.2.2. Recommandations à généraliser :**

Les recommandations établies sont devisées sur trois parties essentielles :

- Environnement extérieur.
- Ouvertures en façades.
- Matériaux utilisés

### **II.2.2.1 Environnement extérieur :**

Vue que ce type de façade a la possibilité de se changer selon le parcours de soleil automatiquement grâce à un système informatique installé, l'orientation des pièces sera plus libre, même si les variations saisonnières sont très marquées sur les différentes façades.

### **II.2.2.2 Les ouvertures en façade :**

Même s'il n'est pas le plus efficace, la baie vitrée en façade est le moyen le plus simple et le plus répandu d'apporter de la lumière naturelle et des rayons solaires à l'intérieur d'un local. Cependant, une grande surface de vitrage sur une façade ne permet pas à elle seule de définir si elle assure un confort thermique suffisant pour les occupants du local.

En complément, il faut prendre en considération plusieurs autres paramètres tels que :

- L'orientation et l'inclinaison.
- La position.
- La forme et les dimensions.
- Les matériaux de transmission.

La variabilité dans le parcours de soleil tout au long de l'année, et la répartition des rayons solaires sur l'ensemble du projet implique que l'orientation et l'inclinaison d'une baie, a un impact sur le flux de chaleur naturelle qui la traverse.

### **II.2.2.3 Les matériaux utilisés :**

#### **II.2.2.3.1 Le vitrage :**

##### **a. Double ou triple vitrage : le coefficient Ug**

Le coefficient Ug est l'unité universelle de mesure d'isolation. Il s'agit d'un coefficient de déperdition de chaleur exprimant l'isolation contre le froid. La valeur « Ug » d'un simple vitrage de 4 mm atteint 6,8. Avec un double vitrage, la valeur « Ug » est égale à 2,8 tandis que celle du triple vitrage est de 0,8.<sup>123</sup>

##### **b. La différence entre double et triple vitrage :**

Un double vitrage est constitué de deux feuilles de verre séparées par un espace hermétique clos renfermant de l'air ou un autre gaz déshydraté. Cet espace permet d'améliorer l'isolation thermique par rapport à un simple vitrage.

Le triple vitrage comprend une lame de verre supplémentaire séparant la couche d'air en deux. Le triple vitrage procure une meilleure isolation qu'un double vitrage, car le

---

<sup>123</sup> L'ISOLATION THERMIQUE DOUBLE ET TRIPLE VITRAGE ISOLANT, disponible sur : <https://www.picbleu.fr/page/l-isolation-thermique-double-et-triple-vitrage-isolant>

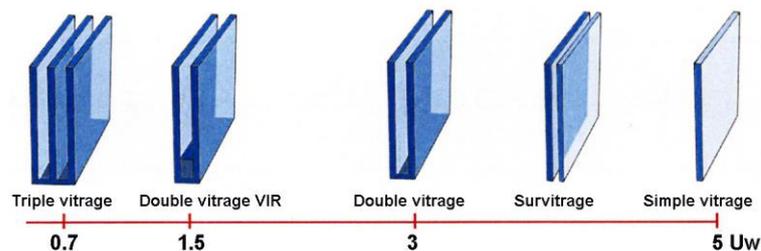
coefficient de conductivité thermique est plus faible. Toutefois, ce type de vitrage est rarement appliqué, car sa forte épaisseur et son poids élevé ne s'adaptent pas aux menuiseries classiques.<sup>124</sup>

Valeur thermique	Type de vitrage	Description	Performances
Ug = 6.3		Double vitrage standard 4/16/4	(Ug=2,8W/m²K).
Ug = 2.8		Double vitrage supérieur 4/16/4 sans gaz	(Ug=1,4 W/m²K).
Ug = 1.4		Double vitrage super 4/16/4 avec gaz Argon (gaz neutre et lourd)	(Ug=1,2W/m²K).
Ug = 1.2		Double vitrage supérieur 4/16/4 avec gaz Argon (gaz neutre et lourd) et feuilles intercalaires.	(Ug=1,0W/m²K)

**Tableau 03 :** Tableau comparatif des différents types de vitrages et leur performances énergétiques  
**Source :** <https://www.picbleu.fr/page/l-isolation-thermique-double-et-triple-vitrage-isolant>

### c. Performances des fenêtres : le coefficient Uw

Les fenêtres : les performances se calculent avec le coefficient UW. Ci-dessous, plus le coefficient Uw est faible, plus la fenêtre est performante.



**Figure 54 :** Performance des fenêtres selon le type de vitrage.

**Source :** <https://www.picbleu.fr/page/l-isolation-thermique-double-et-triple-vitrage-isolant>

## II.2.2.3. Les panneaux isolants :

### a. Panneaux isolants PUR

PUR est l'abréviation du polyuréthane, un des isolants thermiques les plus performants qui est disponible sur le marché. Ce matériau est disponible sous forme de panneaux, mais également sous forme de mousse de PUR. Les panneaux ont une meilleure valeur d'isolation que la mousse de PUR. En plus, les panneaux assurent d'avance une certaine épaisseur, ce qui n'est pas le cas lors de l'usage de la mousse de PUR. Il n'est pas nécessaire de poser du ruban

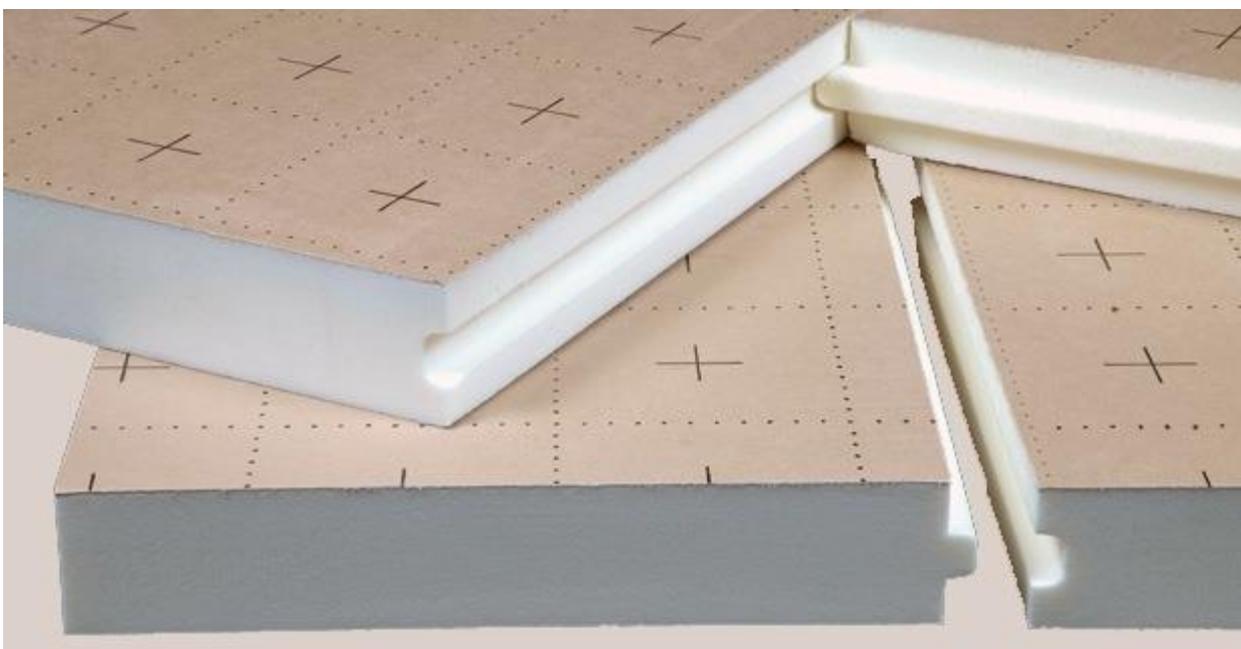
<sup>124</sup> Ibid.

adhésif sur les panneaux et de les polir tandis que ces deux étapes sont essentielles lors du soufflage de mousse de PUR.<sup>125</sup>

### **b. Emploi et types de panneaux PUR**

Les panneaux isolants sont fabriqués de matières synthétiques. Au jour d'aujourd'hui, la plupart des panneaux isolants sont pourvus d'un système d'assemblage par des dents et des rainures. Grâce à ce système, vous pouvez fixer les panneaux beaucoup plus facilement et donc plus vite à la surface à isoler (murs creux, planchers, toits...).

Les panneaux isolants PUR sont disponibles sous plusieurs formes, formats et épaisseurs. L'avantage de grands panneaux est qu'ils peuvent couvrir rapidement une grande surface d'un mur, d'un toit ou d'un plancher.<sup>126</sup>



**Figure 55 :** Panneaux isolant PUR

**Source :** <https://www.isolation-expert.be/panneaux-isolants/panneaux-isolants-pur>

---

<sup>125</sup> Disponible sur : <https://www.isolation-expert.be/panneaux-isolants/panneaux-isolants-pur>

<sup>126</sup> Ibid.

# **Bibliographie**

# Bibliographie

## Monographies et dictionnaires :

1. **Brown, G. Z. & Mark Dekay.** (2001). Sun, wind & light: architectural design strategies (2e ed.). New York: Wiley.
2. **Cédric PHILIBERT.** (2005). The Present and Futur Use of Solar Thermal Energy as a Primary Source of Energy. Paris : International Energy Agency, 16 p.
3. **Christian SCHITTICH.** (2012). Architecture solaire : Stratégies, Visions, Concepts, BIRKHÄUSER.
4. **Colin PORTEOUS.** (2005). Solar Architecture in Cool Climates. London: Earthscan, p 186.
5. **Claude MH DEMERS & André Potvin.** (2008). « Productivité durable : vers une biophilie architecturale ». Esquisse, vol. 19, no. 1.
6. **Gail S BRAGER & Richard J. DE DEAR.** (1998). « Thermal adaptation in the buil environment: a literature review ». Energy and Buildings, vol. 27, no. 1.
7. **Jules Moloney.** (2011). Designing kinetics for architectural facades: state change. Abingdon, Oxon [Angleterre]: Routledge, xiii.
8. **Ken YEANG et Arthur SPECTOR.** (2011). Green design: from theory to practice. London: Black Dog Pub.
9. **Martin V NIELSEN, Svendsen SVEND & Jensen LOTTE B.** (2011). « Quantifying the potential of automated dynamic solar shading in office buildings through integrated simulations of energy and daylight ». Solar Energy, vol. 85, no. 5.
10. **Mary GUZOWSKI.** (2000). Daylighting for sustainable design. New York: McGraw-Hill.
11. **Michael BELL & Kim JEANNIE.** (2008). Engineered transparency: the technical, visual, and spatial effects of glass (1st ed.). New York: Princeton Architectural Press, 272 p.
12. **Michael FOX & Miles KEMP.** (2009). Interactive architecture. New York: Princeton Architectural Press.
13. **Michael SCHUMACHER, Oliver SCHAEFFER & Michael-Marcus VOGT.** (2010). Move: dynamic components and elements in architecture. Basel, London: Birkhäuser, Springer.
14. **Michael TUTTON, Elizabeth HIRST, Jill PEARCE & H. J. LOUW.** (2007). Windows: history, repair, and conservation. Dorset: Donhead, ix, 470 p.
15. **Mohammed Zaheeruddin.** (1990). « Dynamic Effects of Thermal Shutters ». Building and Environment, vol. 25, no. 1.

16. **Paul A LYNN.** (2010). *Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics*. Chichester : Wiley, p 121.
17. **Pierre LAVINGE.** (2009). « Concevoir des bâtiments bioclimatiques » *Fondements et méthodes, le moniteur*. 430 pages.
18. **Pierre VON MEISS.** (2003). *De la forme au lieu : Une introduction à l'étude de l'architecture*. 2e éd. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.
19. **Raymond J COLE, Zosia Brown & Sherry McKay.** (2010). « Building human agency: a timely manifesto ». *Building Research and Information*, vol. 38, no. 3.
20. **Robert HASTING et Maria WALL.** (2007). *Vol. 1 Strategies and Solution de Sustainable Solar Housing*. London : Earthscan.
21. **Rolland KRIPPNER.** (2003). «Solar Technology - From Innovation Skin to Energy-Efficient Renovation». In *Detail Solar Architecture* sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser.
22. **Simon ROBERTS et Nicolò GUARIENTO.** (2009). *Building integrated photovoltaics: a handbook*. Basel: Birkhäuser.
23. **William A SHURCLIFF.** (1980). *Thermal shutters and shades: over 100 schemes reducing heat-loss through windows*. Andover, Mass : Brick House Pub. Co.

#### Articles :

1. **Asmaa DEHKAL.** (2016). « Etats des lieux des énergies renouvelables dans l'Algérie », magazine *Nour des études économiques*, n03, page : 192. Disponible sur : ["https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/245/2/3/14225"](https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/245/2/3/14225).
2. **Brown, Zosia, Raymond J. Cole, Meg O'Shea & John Robinson.** (2009). « New Expectations in Delivering Sustainable Buildings: From occupant to inhabitant » In *PLEA 2009* (Québec, 22-24 juin 2009). Québec : Les Presses de l'Université Laval.
3. **Christoph MORBITZER et al.** (2001). «Integration of building simulation into the design process of an architecture practice». In *Seventh International IBPSA Conference*. (Rio de Janeiro, 13-15 Août 2001). Rio de Janeiro: IBPSA, pp. 697-704.
4. **Edna SHAVIV.** (1999). «Design Tools for Bio-Climatic and Passive Solar Buildings». *Solar Energy*. 67(4-6). p. 189.
5. **Daniel AELENEIA, Laura AELENEI, Catarina PACHECO VIEIRAB.** (Juin 2016). *Energy Procedia*, Volume 91, disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216303162> .
6. **David RODITI.** (2011). *Outils solaires*. Disponible sur : <http://www.outilssolaires.com> . Page consultée le 4-5 mars 2018.

7. **Goetzberger, A. et Schmid, J.** « Review of Components for Passive Solar Energy Use ». International Journal of Solar Energy. 1985. p. 186
8. **Ibara DIEGO.** (2010). Using ECOTECT for Exterior Qualitative Solar Analysis: Direct Shading Analysis, Harvard Design School. Article disponible sur : <https://gradebuddy.com/doc/2868035/direct-shading-analysis?full=1>
9. **Jocelyn Perron.** (2012). (Architecture et ingénierie : isolation mobile), Génivar inc., Québec, conversation privée.
10. **Kathryn B JANDA.** (2009). « Buildings Don't Use Energy: People Do » In PLEA 2009 (Québec, 22-24 juin 2009). Québec : Les Presses de l'Université Laval.
11. **La façade double peau,** disponible sur : [https://www.ekopedia.fr/wiki/Fa%C3%A7ade\\_double\\_peau](https://www.ekopedia.fr/wiki/Fa%C3%A7ade_double_peau)
12. **LA FAÇADE RIDEAU OU MUR RIDEAU EN ALUMINIUM,** L'enveloppe intelligente des bâtiments avec un façade en aluminium, disponible sur : <http://www.fenetrealu.com/produits/facade-vitree/facade-rideau-alu>
13. **LES FAÇADES RIDEAU ET FAÇADE PANNEAU,** disponible sur : <http://www.construiracier.fr/solutions-constructives/facades/facade-rideau-et-facade-panneau/>
14. **L'ISOLATION THERMIQUE DOUBLE ET TRIPLE VITRAGE ISOLANT,** disponible sur : <https://www.picbleu.fr/page/l-isolation-thermique-double-et-triple-vitrage-isolant>
15. **Loonen RCGM.** (2010). Climate Adaptive Building Shells. Technische Universiteit Eindhoven.
16. **Loonen RCGM.** (2015). Rico-Martinez JM, Favoino F, Brzezicki M, Menezo C, La Ferla G, et al. Design for façade adaptability – Towards a unified and systematic characterization. Proc. 10th Energy Forum - Adv. Build. Ski., Bern, Switzerland.
17. **Marilyn A BROWN.** (2001). «Market failures and barriers as a basis for clean energy policies». Energy Policy.
18. **Marie-Claude DUBOIS et Kajsa FLODBERG.** (2012). «Daylight utilisation in perimeter office rooms at high latitudes: Investigations by computer simulation». Lighting Research and Technology.
19. **Marie-Claude DUBOIS et Miljana HORVAT.** (2010). State-of-the-art of existing software used by architects. Québec : Task 41 Solar Energy and Architecture.
20. **Michele DE CARLI et Valeria DE GIULI.** (2009). «Optimisation of Daylight in Buildings to Save Energy and to Improve Visual Confort: Analysis in Different Latitudes». In Eleventh International IBPSA Conference. (Glasgow, 27-30 juillet 2009).
21. **Novitski, B.J.** (2009). «Greening your design culture to gain a competitive edge». Architectural Record.

22. **Oksana BULGAKOVA.** (2005). « Eisenstein, the Glass House and the Spherical Book: From the Comedy of the Eye to a Drama of Enlightenment ». Rouge no. 7 Disponible sur : <http://www.rouge.com.au/7/eisenstein.html>

23. **Richard L QUIROUETTE.** (1980). Volets d'isolation pour fenêtres (traduit par L. Bastrash & M. L. Racette). Division des recherches sur le bâtiment. Ottawa : Conseil national de recherches du Canada.

24. **Sandrine AMY.** (2008). Les nouvelles façades de l'architecture, disponible sur : <https://journals.openedition.org/appareil/287>

25. **William K LANGDON.** (1980). Movable insulation: a guide to reducing heating and cooling losses through the windows in your home. Emmaus, Pa.: Rodale Press.

### **Thèses :**

1. **Cédric du Montier.** (2013). LA FAÇADE ADAPTATIVE EN ARCHITECTURE Potentiel énergétique et lumineux du panneau isolant mobile, Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en Sciences de l'architecture pour l'obtention du grade de maître ès sciences.

2. **Fawwaz HAMMAD.** (2010). « An Evaluation Study of External Dynamic Louvers in Office Building in Abu Dhabi ». mémoire de maîtrise, Dubai: The British University in Dubai.

3. **Francis PRONOVOST.** (2010). « Développement d'un concentrateur solaire dans une perspective d'exploitation durable de l'énergie solaire ». Mémoire de maîtrise. Québec : Université Laval, p. 70.

4. **Harris POIRAZIS.** (2004). Double Skin Façades for Office Buildings – Literature Review. Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Lund University.

5. **Hegger MANFRED.** (2003) «From Passive Utilization to Smart Solar Architecture». In detail Solar Architecture. Sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser.

6. **Klee Poh LAM et al.** (2004). Energy Modeling Tools Assessment for Early Design Phase. Pittsburgh: Center for Building Performance and Diagnostics Carnegie Mellon University.

7. **Mohamed-Anis Gallas.** (1999). Lumière naturelle en phase de conception : quels outils/méthodes pour l'architecte, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

8. **Müller HELMUT F. O. et Heide G SCHUSTER.** (2003). «Utilizing Daylight». In detail Solar Architecture. Sous la dir. de Schittich. Basel : Birkhäuser.

9. **N. SAFER,** « Modélisation des façades de types double-peau équipé de protection solaires : Approches multi-échelles », Thèse de doctorat en génie civil, soutenue le 13/06/2006, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon.

10. **Samira BENKHEDDA.** (2012). Simulation multi agents d'un comportement humain face à une situation d'urgence, Mémoire présenté Pour l'obtention du diplôme de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran.

11. **Shirley GAGNON.** (2012). ÉNERGIE SOLAIRE ET ARCHITECTURE, Les outils numériques et leur utilisation par les architectes pour la conception solaire. Mémoire présenté à l'Université Laval pour l'obtention du grade de Maître ès sciences.

12. **Shirley GAGNON.** (2011). Light'n books : l'hélio-morphologie d'une librairie urbaine. Projet de fin d'études en architecture (M. Arch.). Québec : École d'architecture de l'Université Laval.

13. **Thomas HERZOG, Roland KRIPPNER, Werner LANG.** (2007). « Construire des façades », Atlas de Construction, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), p.19

14. **Valentin-Florian GAVAN,** « Gestion intelligente et performance énergétique des façades actives de type "double-peau" », 07/10/2009, Thèse ADEME.

### **Publications officielles :**

1. **American Institute of Architects.** (1982). Daylighting. Coll. « Architect's handbook of energy practice ». New York : The Institute

2. **International Energy Agency.** (2009). Task 41: Solar Energy and Architecture. Coll. «Solar Heating & Cooling Programme». Task 41: Solar Energy and Architecture, 15 p.

3. **Journal Officiel de République Algérienne,** ‘Loi N°99-09 du 28 Juillet 1999 Relative à la Maîtrise de l'Énergie’, J.O.R.A., N°51, 2 Août 1999, Alger, Algérie.

4. **Journal Officiel de République Algérienne,** ‘Décret exécutif N°2000-90 du 24 Avril 2000 Portant Réglementation Thermique dans les Bâtiments Neufs’, J.O.R.A., N°25, 30 Avril 2000, Alger, Algérie.

5. **Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme,** Commission Technique Permanente, ‘Réglementation Thermique des Bâtiments d'Habitation et Règles de Calcul des Déperditions Calorifiques’, Document Technique.

### **Sites internet:**

1. Portail des Energies Renouvelables en Algérie, Vendredi 17 septembre 2010, « L'Algérie dispose d'un potentiel solaire suffisant pour alimenter l'économie mondiale », “ <http://portail.cder.dz/> ”

2. LAMY Expertise 1982-2015, Construction maison : les différents types de façades, disponible sur : <https://www.lamy-expertise.fr/expertise-immobiliere/types-facades/facade-lourde.html>

3. Autodesk FR, disponible sur : <https://knowledge.autodesk.com/support/ecotect-analysis/learn-explore/caas/video/youtube/watch-v-BKZ35xh4ofw.html>

## **RÉSUMÉ**

Dans cette recherche on propose une analyse des performances énergétiques des façades adaptatives en utilisant les panneaux isolants mobiles externes pour un espace de vie. Où le but est de contrôler les niveaux d'éclairement requis dans ces espaces, cela se reflète dans la recherche d'une transparence maximale en évitant les pertes de chaleur importantes dans le climat méditerranéen. Les simulations numériques permettent d'évaluer la performance énergétique de l'isolation mobile et de l'occultation, tandis que les simulations effectuées avec 'ECOTEC ANALYSIS 2011' permettent d'analyser les niveaux et la répartition de chaleur générés par la présence et le mouvement automatique de la façade. Les scénarios de présence et d'absence de ce type de façade permettent d'évaluer leur impact sur un espace d'habitation et de travail. Cette recherche conclue sur le potentiel énergétique des façades adaptatives en tant qu'opportunité d'adaptation au sein d'une architecture adaptative.