

**Université Aix-Marseille**  
École doctorale 355 « Espaces, cultures et sociétés »

## THÈSE DE DOCTORAT

Pour obtenir le grade de docteur  
de l'ENSA Marseille  
Spécialité « Architecture »

---

**Vers un confort thermique grâce à des  
concepts d'enveloppes de bâtiments, inspirés de la nature :  
le mur respirant comme un exemple biomimétique approprié  
aux bâtiments en zones chaudes.**

---

Présenté par

**Mahmoud Mohamed ELGHAWABY**

Directeur de thèse : **Stéphane HANROT**  
Co-encadrant : **Marc-André VELAY-DABAT**

Soutenue le 11/06/2013 devant le jury :

**SIRET Daniel**

(HDR, laboratoire CERMA, ENSA Nantes)

Rapporteur

**SABRY Hanan**

(Prof. à l'université d'Ain Chams, Égypte)

Rapporteur

**HANROT Stéphane**

(HDR, ENSA Marseille)

Directeur de thèse

**BEL Nicolas**

(Ingénieur à l'INSA de Lyon)

Examineur

**VELAY-DABAT Marc-André**

(Chercheur, ENSA Marseille)

Co-encadrant de thèse



**Université Aix-Marseille**  
École doctorale 355 « Espaces, cultures et sociétés »

## THÈSE DE DOCTORAT

Pour obtenir le grade de docteur de l'ENSA Marseille  
Spécialité « Architecture »

---

**Vers un confort thermique grâce à des  
concepts d'enveloppes de bâtiments, inspirés de la nature :  
le mur respirant comme un exemple biomimétique approprié  
aux bâtiments en zones chaudes.**

---

Présenté par

**Mahmoud Mohamed ELGHAWABY**

Directeur de thèse : **Stéphane HANROT**  
Co-encadrant : **Marc-André VELAY-DABAT**

Soutenue le 11/06/2013 devant le jury :

**SIRET Daniel**

(HDR, laboratoire CERMA, ENSA Nantes)

Rapporteur

**SABRY Hanan**

(Prof. à l'université d'Ain Chams, Égypte)

Rapporteur

**HANROT Stéphane**

(HDR, ENSA Marseille)

Directeur de thèse

**BEL Nicolas**

(Ingénieur à l'INSA de Lyon)

Examineur

**VELAY-DABAT Marc-André**

(Chercheur, ENSA Marseille)

Co-encadrant de thèse

École Nationale Supérieure d'Architecture de Marseille  
184 av. de Luminy - case 924 13288 Marseille cedex 09  
Téléphone : 04 91 82 71 00 / Télécopieur : 04 91 82 71 80

ED 355 École doctorale «Espaces, Cultures et Sociétés»  
5, rue du Château de l'Horloge - BP 647  
13094 Aix-en-Provence  
Téléphone : 04 42 52 40 74 / Télécopieur : 04 42 52 43 66

*À Ncha*

*et*

*À ma petite famille*



## REMERCIEMENT

Je tiens à adresser en premier lieu mes plus chaleureux remerciements à mes directeurs de thèse *Stéphane Hanrot* et *Marc-André Velay-Dabat*. Ils n'ont pas simplement accepté de diriger ma thèse ; ils m'ont transmis la passion de la recherche. J'ai pu apprécier non seulement leurs dimensions scientifiques, mais aussi leurs non moins importante dimension humaine. J'en profite pour exprimer ici ma plus profonde gratitude.

Je remercie très sincèrement *Daniel Siret* et *Hanan Sabry* d'avoir accepté de rapporter ma thèse et pour leurs précieuses remarques afin d'améliorer ma thèse. C'est également un très grand honneur d'avoir comme membre du jury *Niçolas Bel*, dont la gentillesse n'a d'égal que ses immenses compétences scientifique.

Je souhaite remercier très chaleureusement *Jean-louis Izard* pour accepter ma proposition de recherche en 2008 et pour sa patience à prodiguer des conseils pertinents. Je tiens également à remercier tous l'équipe du laboratoire ABC et surtout *Mohamed Belmaaziz* pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Je voudrais dédier des remerciements particuliers pour *Anne-Marie Helary* et *Claudine Sulle*, les responsables administratives du DREAM (Département de la Recherche de l'ENSA-Marseille). Il est difficile de trouver des qualificatifs assez forts pour souligner leurs gentillesse, leurs humilités et patiences. Elles ont m'aidé beaucoup à produire ce travail de recherche.

Durant ces cinq années de thèse, j'ai eu la chance d'accompagner de nombreuses personnes et collaborateurs à l'ENSA Marseille : que toutes soient remerciées pour les bons moments partagés et surtout pendant les voyages à Naples, à Istanbul et à Montréal. Je pense notamment (pardon à ceux que j'oublie) à *Gianluca*, *Layla*, *Kamel*, *Naceur*, *Marie*, *Amir*, *David*, *Lizeth* et *Katia*.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et ma belle famille pour leur soutien constant. Cette thèse, aboutissement de longues années d'études. Il m'est impossible de trouver des mots pour dire à quel point je suis fier d'eux, et à quel point je les aime. Pour conclure, je souhaite bien évidemment remercier mon extraordinaire femme *Noha Said*, sans elle, rien n'aurait été possible. Ma chère *Noha*, cette thèse t'est dédiée.



# RÉSUMÉ

La recherche consiste à étudier le problème du confort thermique à l'intérieur des bâtiments situés en zones chaudes et arides comme en Égypte. L'idée principale est d'utiliser des concepts basés sur le potentiel de la nature comme instrument qui nous aide à réaliser des façades appropriées à l'environnement. L'inspiration de la nature n'est pas nouvelle, mais elle a commencé récemment à être scientifiquement formulé en vertu de plusieurs notions, telles que, le biomimétisme, la biomimétique, la bionique ou la bio-inspiration. La science du biomimétisme imite la nature à travers l'étude de la forme, la fonction, le comportement et les écosystèmes des organismes biologiques pour créer des systèmes non biologiques.

L'architecture biomimétique s'inspire de la nature de ces divers systèmes intelligents tels que la capacité thermorégulatrice de la peau humaine, les changements saisonniers de la peau de beaucoup d'animaux, l'ouverture et la fermeture des fleurs en réponse à la lumière du soleil. Cette recherche vise à clarifier les possibilités que le biomimétisme peut offrir pour développer des systèmes architecturaux de refroidissement. Elle observe les exemples naturels dans la flore et la faune pour améliorer l'efficacité des systèmes de ventilation afin d'atteindre le confort thermique dans les bâtiments situés en zones chaudes et arides.

*Les systèmes biomimétiques trouvés dans la nature sont-ils considérés comme base de concepts architecturaux à même de s'adapter au climat chaud?*

Cette thèse permettra de bien analyser ces systèmes et de les imiter, à l'aide des technologies nouvelles, dans des façades compatibles avec l'environnement. Je m'intéresse à appliquer cet idée à la région du Sinaï qui est considérée comme une des plus importantes régions en Egypte pour le développement urbain.

## MOTS CLES

Architecture bioclimatique, biomimétisme, ventilation naturelle, mur respirant, Sinaï.



## ABSTRACT

This research aims at studying the problem of thermal comfort inside buildings located in hot and arid climates such as in Egypt. The principal idea behind this research is using concepts based on the potential of nature as an instrument that helps us creating appropriate facades with the environment. Inspiration from nature is not a new approach, but it has recently formulated under several scientific terms such as, biomimicry, bionics or bio-inspiration. Biomimicry is the science that imitates the nature through the study of form, function, behavior and ecosystems of biological organisms in order to create non-biological systems.

The biomimetic architecture tries to be inspired by the nature with its intelligent different systems such as smart thermoregulatory human skin, seasonal changes of the skin of many animals, the opening and closing of flowers in response to light sun. This research aims at clarifying the possibilities that can be offered by the science of biomimicry to develop architectural cooling systems. It focuses on natural thermal adaptation systems found in flora and fauna beside the thermoregulation process in human body. These biomimetic concepts can help in enhancing the effectiveness of ventilation systems in buildings located in hot climate which helps to achieve thermal comfort for users.

*Biomimetic systems found in nature could be considered as base of architectural concepts appropriate and adapted to hot climate?*

This thesis will analyze these natural systems and imitate it while using new technologies in order to create facades appropriate with the environment. I am interested to apply this idea in buildings located in the region of Sinai, which is considered one of the most important regions in Egypt for its urban development rate.

## KEYWORDS

Bioclimatic architecture, biomimicry, natural ventilation, breathing wall, Sinai.



# LISTE DES ABRÉVIATIONS

## **UTBSC**

*United Technology Building Systems Corporation*

## **SGB** (*BMS en anglais*)

*Système de gestion du bâtiment (Building management system)*

## **FSA**

*Foundation for smart architecture*

## **SBM**

*Le syndrome du bâtiment malsain*

## **ASHREA**

*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

## **Q**

*Débit d'air (m<sup>3</sup> / s)*

## **A**

*Surface du flux (m<sup>2</sup>)*

## **V**

*Vitesse du vent (m / s)*

## **C<sub>v</sub>**

*Efficacité des ouvertures*

## **C**

*Coefficient de décharge*

## **g**

*Accélération de la pesanteur, 9.81 m/s<sup>2</sup>*

## **h**

*Hauteur, m*

## **To/Text**

*Température extérieure*

## **Ti/Tint**

*Température intérieure*

## **Tair**

*Température d'air*

## **Top**

*Température opérative*

## **Trm**

*Température radiante moyenne*

## **AEEER**

*L'autorité d'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, le département d'énergie aux États-Unis*



## GLOSSAIRE

### **Le biomimétisme / la biomimétiq** (*Biomimicry en anglais*)

*La science qui imite la nature afin de créer des produits non-biologiques. Benyus a défini « la biomimétiq » comme un terme technique utilisé en biochimie, en biologie, en pharmacie, en ingénierie, en architecture et en science des matériaux, pour la quête dans les organismes vivants et les systèmes naturels, des propriétés pouvant être extrapolées à partir de l'observation et l'analyse scientifique, afin de les appliquer dans l'industrie, la médecine ainsi que dans d'autres disciplines*

### **La bionique** (*Bionic en anglais*)

*Un synonyme du mot « biomimétiq ou biomimétisme », mais il est utilisé plus largement dans le domaine des innovations médicales/*

### **Biomorphologie** (*Biomorphology en anglais*)

*L'imitation qui se concentre sur la forme naturelle*

### **Biophilia** (en anglais)

*L'imitation qui se concentre sur l'apparence et l'esthétique de la nature*

### **Architecture intelligente** (*Intelligent architecture en anglais*)

*Le terme 'bâtiment intelligent' a été utilisé pour la première fois au début des années 1980. Il avait été promu par des architectes et des ingénieurs, notamment Michael Davies qui avait travaillé sur le potentiel des nouveaux matériaux et des systèmes de gestion des bâtiments. Au début, ce terme s'est concentré sur la conception de principes liés à l'auto-adaptation/ajustement et à la réactivité, rendus possibles par les nouvelles technologies en général, et les technologies de l'information en particulier.*

### **Smart architecture** (en anglais)

*Le terme « smart architecture », a été introduit dans la langue anglo-saxonne pour exprimer la tendance de l'architecture intelligente « intelligent architecture » vers la nature. Ce terme n'existe pas dans la langue francophone. Il ne remplace pas l'ancien terme 'intelligent architecture', mais les deux termes ont été utilisés pour exprimer deux aspects différents. Contrairement aux premières définitions de l'architecture intelligente qui se concentrent sur l'utilisation de la haute technologie et la communication entre les différents équipements en acceptant la complexité de la technologie, le nouveau terme 'smart architecture' se focalise sur la nature et la simplicité des systèmes.*

### **L'approche écologique** (*Deep-eco trend en anglais*)

*Une approche architecturale qui vise à diminuer l'impacte négative des bâtiments sur l'environnement.*

### **L'approche d'haute technologie** (*Hi-tech trend en anglais*)

*Une approche architecturale d'haute technologique 'hi-tech' qui emploie la technologie comme un but en soi afin de refléter l'image technologique d'aujourd'hui.*

### **L'approche écologique-technologique** (*Eco-tech trend en anglais*)

*Une approche architecturale qui utilise l'haute technologie afin de diminuer l'impacte négative sur l'environnement.*

### **Le syndrome du bâtiment malsain (SBM)**

*Le syndrome du bâtiment malsain (SBM) est dans le domaine de la santé environnementale, un syndrome décrivant une combinaison de symptômes ou de maladies scientifiquement inexplicables et associées à un lieu précis.*



*The more our world functions like the natural  
world, the more likely we are to endure on this  
home that is ours, but not ours alone.*  
*Lanine Benyus*



## PRÉAMBULE

« Le génie de l'homme peut produire de nombreuses inventions grâce à la mise en œuvre de divers instruments contribuant au même but. Cependant, il n'en fera jamais de plus belles, de plus simples ou de plus adaptées que celles de la nature car, dans ses inventions à elle, rien ne manque et rien n'est superflu », Léonard De Vinci<sup>1</sup>

La biomimétique, le biomimétisme, ou la bionique (biomimicry, bionic ou bio-inspiration en anglais), sont des termes scientifiques pour exprimer l'inspiration de la nature. C'est la science qui étudie la nature, puis imite ou s'inspire de ses modèles et de ses méthodes pour résoudre les problèmes de l'homme. Cette approche n'est pas un nouveau concept, mais elle a commencé récemment à être scientifiquement formulée. Au cours de l'histoire humaine, l'homme regarde la nature avec beaucoup d'étonnement. La nature offre des solutions à tous les problèmes auxquels l'homme fait face dans sa vie pratique. D'ailleurs, la nature très souvent a déjà résolu la plupart des problèmes auxquels nous sommes confrontés.

« La nature est un professeur universel et sûr pour celui qui l'observe », Carlo Goldoni<sup>2</sup>

La nature a fait évoluer ses systèmes pendant des milliards d'années et ils travaillent en harmonie les uns avec les autres. Les animaux, les plantes et les microbes sont des ingénieurs qualifiés. Ils ont trouvé ce qui fonctionne, ce qui est approprié, et ce qui dure. C'est pourquoi la nature est considérée comme le professeur permanent et universel au cours de l'histoire et dans tous les domaines. Après des milliards d'années de recherches et de développements naturels, nous pouvons considérer ce qui nous entoure dans la nature comme étant le secret de la survie.

« La biomimétique comme science est basée sur ce que nous pouvons apprendre de la nature, et non sur ce que nous pouvons extraire », [Benyus, 1997, p.2]

Le mot « biomimétique » est le terme technique utilisé en biochimie, en biologie, en pharmacie, en ingénierie, en architecture et en science des matériaux, pour la quête dans les organismes vivants et les systèmes naturels, des propriétés pouvant être extrapolées à partir de l'observation et l'analyse scientifique, afin de les appliquer dans l'industrie, la médecine ainsi que dans d'autres disciplines [Benyus, 1997, p. 1].

---

<sup>1</sup> Cité par Guillot et Meyer *in* [Guillot et Meyer, 2008, p.17].

<sup>2</sup> Cité par Guillot et Meyer *in* [Guillot et Meyer, 2008, p.1].

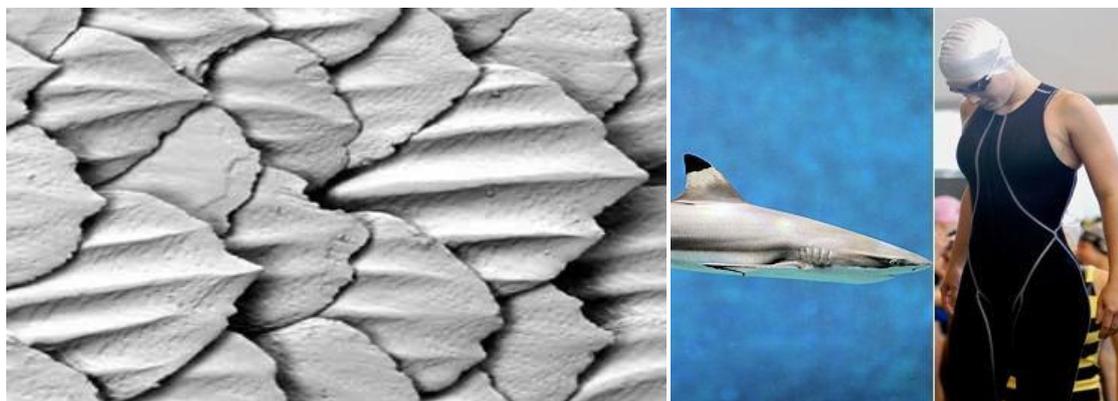
« Notre défi est d'apprendre et d'être inspirés par leur vérité pour créer des nouveaux systèmes et des nouvelles valeurs culturelles », J. A. Swan et R. Swan<sup>3</sup>

La nature avec ses systèmes et ses applications est considérée comme une source d'innovations pour l'humanité. Nous apprenons, par exemple, la façon d'exploiter l'énergie comme une feuille, de cultiver de la nourriture comme une prairie, de voler comme les oiseaux, de nager comme les dauphins et de construire comme les araignées. L'émulation consciente du génie de la vie est une stratégie de survie pour la race humaine, et un chemin vers un avenir durable.

Aujourd'hui, la science a inventé beaucoup de produits inspirés de la nature. Léonard de Vinci a étudié comment les oiseaux volent en proposant de nombreux concepts de machines volantes [Bhushan, 2009, p.1446]. L'étude approfondie du processus de la vision a aidé à inventer les appareils photo. Le mécanisme de l'homme était le prototype pour créer des robots. La voiture biomimétique Mercedes est inspirée par le poisson-coffre « la famille des Ostraciidae » pour une efficacité aérodynamique. Un maillot de bain olympique s'est inspiré de la peau du requin (figure 1 & 2) [Pawlyn, 2011, p.5].



*Figure 1 : La voiture biomimétique « Mercedes » et le poisson-coffre [Pawlyn, 2011, p.6]*



*Figure 2 : L'entreprise Speedo conçoit ainsi depuis 2004 des maillots inspirés des caractéristiques de la peau des requins.*

<sup>3</sup> Cité par Benyus in [Benyus, 1997, p.238].

Les êtres humains ont atteint des choses vraiment remarquables, mais quand on voit quelques-unes des adaptations extraordinaires qui ont évolué dans les organismes naturels, il est difficile de ne pas ressentir un sentiment d'humilité au sujet de toutes les choses que nous avons encore à apprendre. Malgré les nombreuses innovations inspirées de la nature qui existent aujourd'hui autour nous, Julian Vincent, professeur de biomimétique au département de génie mécanique à l'université de Bath, estime que seulement 12% sont utilisés entre la biologie et la technologie en terme de mécanismes [Vincent et al, 2006, p.471]<sup>4</sup>. Ce fait exprime la grande opportunité que cette approche peut nous offrir à l'avenir.

La biomimétique a influencé aussi l'architecture comme les autres domaines. La biomimétique a peut-être ajouté des nouveautés sur la forme « *Biomorphology* », sur l'apparence et l'esthétique « *biophilia* », ou bien sur la fonction « *biomimicry* » [Pawlyn, 2011, p.2]. Nous pouvons facilement observer cette influence au cours de l'histoire de l'architecture et surtout sur la « *Biomorphology* » et la « *biophilia* ». Il est tout à fait possible à plusieurs approches biomimétiques de coexister dans un même bâtiment. Pendant les dernières années, cette influence a commencé à toucher le fonctionnement et surtout le domaine de la durabilité. Cette approche vise à construire un monde durable en apprenant de la nature et de ses applications impressionnantes.

« L'architecture de l'avenir puisera de l'inspiration non des machines du 20ème siècle, mais des fleurs et des animaux qui les entourent », [Berkebile et McLennan, 2004]<sup>5</sup>

Cette recherche suppose que l'approche de la biomimétique peut offrir de nouvelles solutions aux problèmes architecturaux. Dans l'avenir, les maisons dans lesquelles nous vivrons, seront conçues pour fonctionner comme des organismes vivants pour une efficacité maximale et un impact minimal sur l'environnement. Ces nouveaux bâtiments seront adaptés à l'environnement et au climat local en produisant leurs besoins en énergie et en eau par le soleil et la pluie. Ils ont été imaginés pour générer leur énergie sans pollution, nettoyer l'ensemble de leurs propres déchets sur le site, répondre activement aux changements de température afin de maintenir une ambiance intérieure confortable. En suivant cette approche, de nouvelles normes et des recommandations seraient créées dans les domaines de la production d'énergie, du traitement des déchets et du confort humain.

---

<sup>4</sup> voir (<http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/3/9/471>)

<sup>5</sup> voir ([http://www.jasonmclennan.com/articles/The\\_Living\\_Building.pdf](http://www.jasonmclennan.com/articles/The_Living_Building.pdf))

Afin de réaliser une architecture biomimétique, il est nécessaire, d'un côté, de bien préciser le problème auquel nous faisons face, et d'un autre côté de rechercher comment la nature pourra résoudre le même problème. La problématique de cette recherche a été évoquée dans un mémoire de fin d'études en 2006 sur l'architecture intelligente, basée sur l'idée de l'imitation de l'intelligence naturelle en créant des bâtiments intelligents et réactifs. C'est pour cela que Brian Atkins déclare qu'un bâtiment intelligent doit faire référence à trois attributs:

- Les bâtiments doivent *savoir* ce qui se passe à l'intérieur et à l'extérieur.
- Les bâtiments doivent *décider* de la manière la plus efficace afin de fournir un environnement confortable, pratique et productif pour les occupants.
- Les bâtiments doivent *réagir* rapidement aux changements.

« *Intelligent buildings* », Brian Atkins.

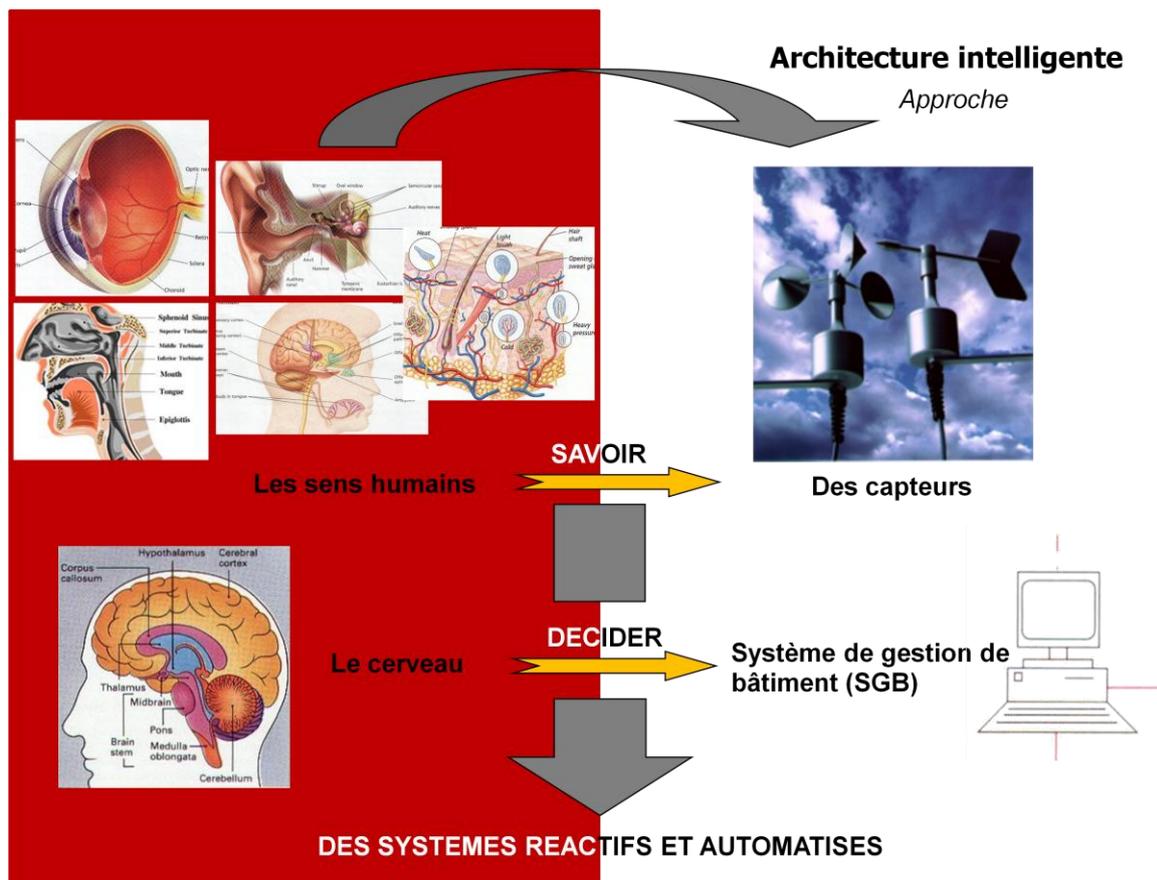


Figure 3: L'idée principale derrière le mouvement de l'architecture intelligente

Dans ce mémoire nous avons montré le spectre des approches architecturales utilisées dans les dernières décennies en Égypte en expliquant que la plupart des tendances sont globalement rattachées à trois approches architecturales : à une approche écologique « deep-eco »<sup>6</sup>, à une approche technologique « hi-tech »<sup>7</sup> et à une approche éco-technologique « eco-tech ».

Généralement, les deux premières approches sont critiquées. L'approche écologique 'deep-eco' est considérée conservatrice, adopte une attitude défensive et ne tire pas profit des avancées de la modernisation. Elle favorise la réduction, l'inactivité et le retour à une époque préindustrielle. Les bâtiments conçus et basés sur ces concepts sont fondamentalement différents de ceux qui reflètent l'identité de notre époque moderne.

Au contraire, l'approche technologique 'hi-tech' emploie la technologie comme un but en soi avec des impacts négatifs sur l'environnement. Beaucoup de bâtiments, parmi les nouveaux projets en Égypte, sont basés fondamentalement sur l'utilisation de nouvelles technologies importées d'Europe et des Etats-Unis sans avoir d'études approfondies sur l'impact de ces technologies et sur la particularité des sites égyptiens. Cette approche augmente fortement la consommation d'énergie et est ainsi facteur de la pollution de l'environnement. Ces bâtiments contemporains, en verre, non seulement consomment beaucoup d'énergie et ont maintenant une image très négative au point de vue environnemental et économique.

Au-delà de ces observations, le fait que les utilisateurs d'aujourd'hui ne peuvent ni abandonner leurs besoins technologiques divers, ni laisser les effets négatifs des technologies dégrader l'environnement, la recherche affirme que le futur des concepts en architecture suivra les tendances éco-technologiques. L'application de cette tendance 'eco-tech' a montré que la durabilité et la technologie peuvent être développées conjointement. Cette tendance architecturale 'eco-tech' a été introduite pendant les deux dernières décennies au sein de plusieurs théories telles que l'« architecture intelligente ».

« Le bâtiment intelligent est un bâtiment qui répond à sa fonction propre et à l'environnement grâce à la technologie », Bennetts Rab<sup>8</sup>

Le terme 'bâtiment intelligent' a été utilisé pour la première fois au début des années 1980 par l'« UTBSC »<sup>9</sup> aux Etats-Unis. Il avait été promu par des architectes et des ingénieurs, notamment Michael Davies qui avait travaillé sur le potentiel des nouveaux matériaux et des systèmes de gestion des bâtiments. Au début, ce terme s'est concentré sur la conception de

---

<sup>6</sup> Deep ecological trends

<sup>7</sup> High technological trends

<sup>8</sup> Cité par Wigginton et Harris *in* [Wigginton et Harris, 2002, p.171]

<sup>9</sup> United Technology Building Systems Corporation

principes liés à l'auto-adaptation/ajustement et à la réactivité, rendus possibles par les nouvelles technologies en général, et les technologies de l'information en particulier.

Le bâtiment (City place) de 'Skidmore Owings et Merrill' à Hartford USA, construit en 1983, est considéré comme le premier 'bâtiment intelligent' [Wigginton et Harris, 2002, p.9]. Une tour de bureaux de 38 étages aux Etats-Unis a été construite en 1984, contenant des systèmes de gestion d'équipements techniques totalement intégrés et reliés par des câbles à fibres optiques. Le réseau assure le lien entre, d'un côté, les équipements techniques du bâtiment tels que les systèmes de chauffage, de refroidissement, d'éclairage et de ventilation et, d'un autre côté, le traitement des données informatiques. Le bâtiment a été décrit comme offrant un «système nerveux» reliant la 'respiration' (climatisation), la 'circulation' (les ascenseurs) et les 'sens' (capteurs et systèmes de sécurité) auparavant séparés. Après un examen plus approfondi, le bâtiment est tout simplement 'bien câblé' avec peu d'aspiration vers une vraie intelligence artificielle.

Le Professeur Walter Kroner de l'Institut Polytechnique de Rensselaer proclame que beaucoup de bâtiments soi-disant intelligents se résument simplement à des bâtiments électroniquement bien reliés par un réseau, contrôlés et automatisés par un SGB<sup>10</sup>. Selon de nombreux architectes, cette approche crée, bien évidemment, des bâtiments réactifs automatisés, mais pas forcément des bâtiments intelligents. De telles critiques incitent les architectes à réorienter les définitions de l'architecture intelligente.

Pendant la dernière décennie, les définitions se sont focalisées sur la durabilité, la simplicité et l'intelligence naturelle. Un nouveau terme, 'smart architecture', a été introduit dans la langue anglo-saxonne par la FSA<sup>11</sup> pour exprimer cette nouvelle tendance vers la nature [Elghawaby, 2006]. Ce terme ne remplace pas l'ancien terme 'intelligent architecture', mais les deux termes ont été utilisés pour exprimer deux aspects différents. Contrairement aux premières définitions de l'architecture intelligente qui se concentrent sur l'utilisation de la haute technologie et la communication entre les différents équipements en acceptant la complexité de la technologie, le nouveau terme 'smart architecture' se focalise sur la nature. Alors que l'architecture intelligente utilise le terme d'intelligence artificielle, la 'smart architecture' s'intéresse à l'intelligence naturelle. Elle voit la nature comme un allié dont on peut utiliser le potentiel si nécessaire et analyser ses propres systèmes afin de s'en inspirer, tout en utilisant la technologie pour les réalisations.

« La 'Smart architecture' est naturelle; elle apprend de la nature et elle l'utilise lorsque c'est nécessaire », [Hinte et al, 2003, p.7]

Une évaluation a été faite pour comparer différents bâtiments qui suivent l'approche de la « smart architecture » dans le monde ainsi qu'en Égypte [Elghawaby, 2006]. Le but était d'évaluer ces bâtiments dans leur capacité à atteindre les objectifs de cette approche, du point de vue technologique, environnemental, économique et en termes de confort des usagers. Cette évaluation a été appliquée aux systèmes de contrôle (collecte des données, réseau de communication et SGB) ainsi qu'aux équipements techniques (climatisation, ventilation, éclairage naturel et artificiel, systèmes de sécurité).

L'analyse s'est portée sur des projets égyptiens, tels que la bibliothèque d'Alexandrie, les bâtiments du 'smart village' (Xceed Contact Center, Egypte). Cette analyse montre qu'en Égypte, l'application se concentre sur les objectifs technologiques et l'automatisation des bâtiments, mais elle n'est pas efficace par rapport aux objectifs environnementaux et économiques comme les systèmes d'éclairage, de refroidissement et de ventilation qui consomment la plupart de l'énergie utilisée dans ces bâtiments.

**Tableau 1 :** évaluation des bâtiments « smart » [Elghawaby, 2006]

		Écologique	Technologique	Confort humain	Économique
Ex. internationaux	<b>GSW Headquarters, Allemagne</b>	84% Très bien	95% Excellent	93% Excellent	68% Bien
	<b>Commerz-Bank Headquarters,</b>	80% Très bien	88% Excellent	93% Excellent	72% Bien
	<b>School of Engineering and Manufacture, GB</b>	74% Bien	78% Très bien	88% Excellent	82% Très bien
	<b>SUVA Insurance Company, Suisse</b>	82% Très bien	87% Excellent	72% Bien	73% Bien
	<b>Green House, Irlande</b>	92% Excellent	73% Bien	72% Bien	78% Très bien
	<b>Tree House, Allemagne</b>	83% Très bien	70% Bien	70% Bien	75% Très bien
Ex. égyptiens	<b>Xceed Contact Center, Egypte</b>	60% Accepté	87% Excellent	82% Très bien	67% Accepté
	<b>Alexandria Library, Egypte</b>	60% Accepté	83% Très bien	78% Très bien	67% Accepté



*Figure 4 : La grande façade en verre n'est pas appropriée aux zones chaudes et arides.*

Ces anomalies révèlent la non-appropriation aux climats locaux des systèmes importés d'Europe dans les bâtiments égyptiens (figure 4). Nous avons réussi à importer des systèmes de gestion du bâtiment qui fonctionnent correctement, mais ce n'était pas une bonne idée d'utiliser des systèmes de refroidissement et de ventilation pas du tout adaptés au climat chaud. Ces résultats m'ont inspiré l'idée de présenter une thèse sur des systèmes de ventilation et de refroidissement appropriés aux climats chauds tels qu'en Égypte et de chercher dans la nature comment elle fait face à ce même problème.

# 1. INTRODUCTION

Notre approche ne recherche pas à imiter un système de contrôle et de décision trouvé dans la nature, mais nous nous efforçons de comprendre la logique de fonctionnement du système d'adaptation thermique au climat et de l'appliquer à nos bâtiments. Nous prenons comme hypothèse que la nature et les organismes vivants sur le site ont évolué et développé des systèmes différents d'adaptation thermique au climat chaud.

*Ces idées trouvées dans la nature qui fonctionnent correctement depuis longtemps, qui sont durables et qui sont, bien sûr, appropriées à l'environnement local, peuvent être considérées comme des sources de concepts idéaux pour l'architecture.*

Cette hypothèse nous incite à retourner vers la nature, à suivre cette science qui imite la nature, à faire des recherches dans ses systèmes et ses applications et à s'inspirer d'elle afin de développer et d'améliorer les systèmes architecturaux. S'inspirer de la nature peut offrir de nombreuses possibilités et des concepts qui aideront à développer et à améliorer des systèmes non biologiques tels que les systèmes de refroidissement et de ventilation naturelle.

Bien que la climatisation dans nos bâtiments soit considérée comme l'une des causes principales de la pollution, les organismes naturels interagissent sous les mêmes conditions climatiques depuis des millions d'années de manière efficace et durable, sans nuire aux ressources naturelles ou polluer l'environnement. Ils ont évolué en systèmes biologiques de grande efficacité au cours de milliards d'années et fonctionnent en harmonie mutuelle et en harmonie avec l'environnement. Notre défi est d'apprendre de leur fonctionnement naturel et de s'en inspirer pour créer de nouveaux systèmes ayant de nouvelles valeurs culturelles.

Les méthodes impressionnantes d'adaptation thermique au climat chaud de la flore et la faune peuvent être donc considérées comme des bases d'idées qui aideront à l'amélioration des conditions climatiques de nos bâtiments. Ce processus n'est pas une simple imitation de la nature mais plutôt la recherche dans la forme d'une meilleure compréhension des principes d'adaptation climatique des organismes biologiques.

## 1.1. Problématique

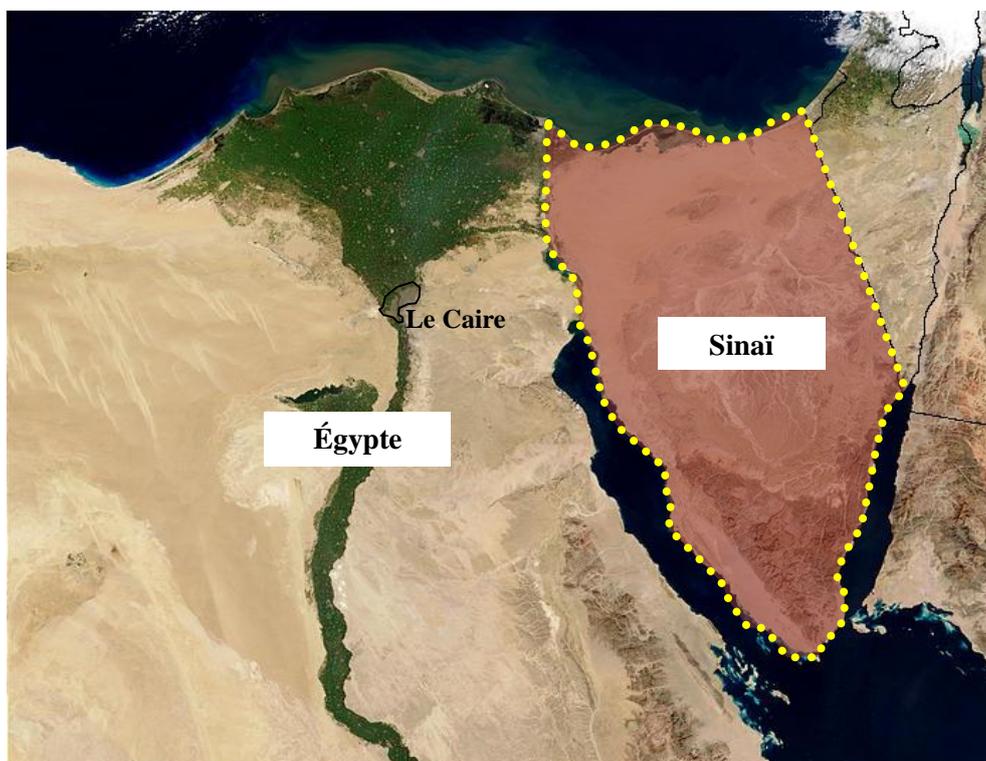
Nous cherchons, dans cette thèse, à clarifier les possibilités que la biomimétique peut offrir pour améliorer le comportement thermique de nos bâtiments. Afin d'atteindre cet objectif, il faut que nous approfondissions notre connaissance de la biomimétique à travers l'analyse des systèmes biologiques d'adaptation thermique au climat chaud. Par cette approche biomimétique qui observe les exemples naturels dans la flore et la faune, nous pourrions améliorer l'efficacité des systèmes de ventilation afin d'atteindre un confort thermique dans les bâtiments situés en des zones climatiques chaudes. Cette étude se concentre sur la région désertique du Sinaï à l'Est de l'Égypte qui a un climat chaud et aride ou semi-aride. La nature de la région du Sinaï qui est riche en organismes vivants ayant la capacité d'interagir avec leur environnement en utilisant de nombreuses méthodes d'adaptation climatique, peut offrir des concepts bioclimatiques pouvant être considérées comme des bases d'idées architecturales appropriées au climat local.

### 1.1.1. Sinaï : Le site d'étude

Le Sinaï, région désertique située au Nord-est de l'Égypte, est une péninsule d'environ 60 000 km<sup>2</sup> de forme triangulaire, entre la Méditerranée au nord et la Mer Rouge au sud-est et au sud-ouest. Sa frontière terrestre longe le canal de Suez à l'ouest et la frontière palestino/israélo-égyptienne au nord-est (figure 1.1&1.2). Cette région désertique se trouve entre la latitude 27°43' et 31°19' N, et les longitudes 32°18' et 34°54' E.



Figure 1.1 : Le site d'étude, Sinaï- Égypte, par rapport au monde.



*Figure 1.2 : La péninsule du Sinaï, Égypte.*

Le Sinaï est considéré comme une des plus importantes régions en Égypte pour le développement urbain. Au cours des 20 dernières années, il a été confronté à un investissement et à une croissance extrêmement rapide, le développement devrait se poursuivre et même s'amplifier. Par conséquent, la croissance urbaine dans cette région s'est beaucoup accélérée depuis les années 90 à cause du développement touristique qui est considéré comme le secteur le plus rapides dans l'économie égyptienne [Sims et Elminiawy, 2003, P.17]<sup>1</sup>.

Le recensement de 1960 figure une population totale du Sinaï de 49,769 habitants. En 1967, le Sinaï a été occupé par Israël, et pour cela aucun recensement n'est disponible jusqu'à l'année 1981. Bien que partant d'une base de population très faible, la croissance de la population du Sinaï est phénoménale. Globalement, l'augmentation annuelle de population entre 1981 et 2010 est de 6,7% (de 9,1% dans les zones urbaines et de 4,8% dans les zones rurales). Cette augmentation de la population par rapport au taux général en Égypte (sur la même période la population de l'Égypte a augmenté de 2,3% par an) montre la croissance du développement qui est très élevé et rapide dans cette région. En 1994, le ministère de la planification a publié « le plan national pour le développement du Sinaï 1994-2017 » dans lequel 75 milliards de dollars a été estimé pour la période 1994-2017 [Ali, 1998, P.23]<sup>2</sup>. Le recensement de 2012 montre une population de 554 000 personnes dans la région du Sinaï, et arrive à 800 000 si nous prenons en compte la population qui existe à l'Est du Canal de Suez.

<sup>1</sup> voir (<http://st-katherine.net/downloads/Development%20Profile.pdf>)

<sup>2</sup> voir (<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-4798-175245/unrestricted/dina.pdf>)

Cette population est prévue d'être doublée dans les prochains 10 ans [Gamal-Elden, 2012, en ligne,]<sup>3</sup> [Sims et Elminiawy, 2003, P.20].

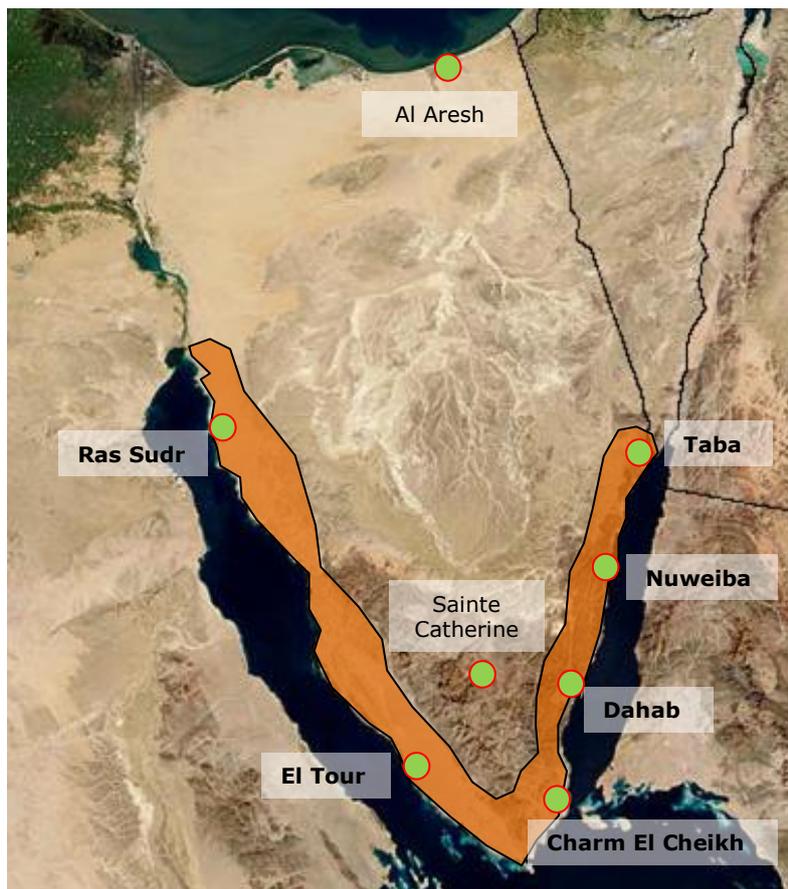


Figure 1.3 : Huit villes dans la région du Sinaï dont six sur la côte sud.

La croissance la plus rapide se passe dans la ville de Charm el-Cheikh, avec une augmentation annuelle de 16,9%, suivie par Nuweiba (10% annuel), Dahab (8,9% annuel), et El Tur (8,4% annuel) [Sims et Elminiawy, 2003, P.18]. Cette croissance de population qui est concentrée dans les villes du Sud et surtout du Sud-est reflète la croissance rapide du développement de cette région qui se trouve sur le golfe d'Aqaba. Le golfe d'Aqaba s'étend de Ras Mohamed dans le sud à Taba dans le nord. Il est d'environ 250 km de longueur avec quatre villes touristiques.

Selon les données au cours des années 1996-2003, nous voyons une augmentation annuelle moyenne, relativement constante, du nombre de chambres touristiques comprise entre 26,3% et 27,3%. Le plan de développement du Sinaï du Sud montre une estimation jusqu'en 2017 du nombre de chambres touristiques en augmentation annuelle d'environ 15 à 20% [Sims et Elminiawy, 2003, P.9-10] (Tableau 1.1).

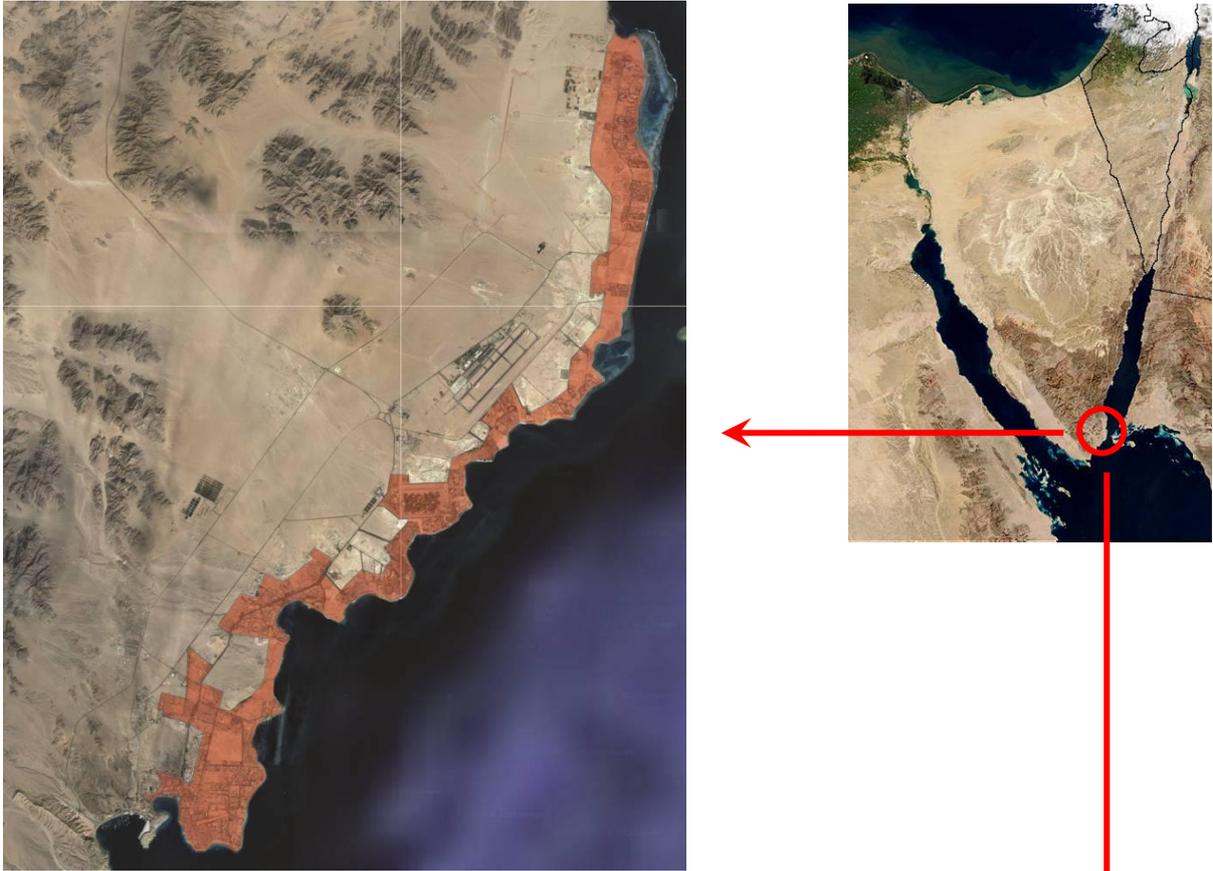
<sup>3</sup> Voir (<http://digital.ahram.org.eg/articles.aspx?Serial=817901&eid=1827>)

**Tableau 1.1** : Estimation du nombre de chambres touristiques dans le Sinaï du Sud [Sims et Elminiawy, 2003, P.10]

Année	Statistique	Projection		
	2003	2008	2013	2017
<b>Charm El Cheikh</b>	27267	67849	136469	199804
<b>Ras Sudr</b>	2085	5188	10435	15278
<b>El Tur</b>	194	483	971	1422
<b>Taba</b>	3104	7724	15535	22745
<b>Nuweiba</b>	1057	2630	5290	7745
<b>Dahab</b>	2935	7303	14689	21507

À cause de cette croissance démographique et économique, plusieurs projets résidentiels et touristiques sont effectués dans cette région afin de fournir les demandes. Ces projets sont le long de la côte sud, et surtout dans les villes qui se trouvent sur la côte du golfe d'Aqaba. L'établissement typique de tourisme dans le Sinaï du sud est soit un village touristique, soit un ressort hôtelier, et une classification en 3, 4 ou 5 étoiles. Il compte en moyenne entre 200 et 400 chambres (400 à 800 lits) [Sims et Elminiawy, 2003, P.7].

Le développement économique dans le secteur du tourisme ainsi que l'existence d'une grande surface de terrains vides dans la zone côtière du Sud incitent à concevoir des programmes touristiques horizontaux en formant des projets liniers sur les côtes de la Mer Rouge (figure 1.4&1.5). Les réglementations urbaines dans cette région limitent à une hauteur maximum de deux étages les bâtiments du bord de mer, et la surface bâtie ne doit pas dépasser 40% de la surface totale du terrain. Cette tendance crée des villes linières et des projets touristiques indépendants avec des bâtiments à un ou deux étages maximum.



*Figure 1.4 : Une image satellite montre la ville de Charm El-Cheikh et sa forme linéaire le long de la côte du golfe d'Aqaba.*



*Figure 1.5 : Vue de l'avion sur la ville de Charm El-Cheikh montre la forme urbaine horizontale (deux étages maximum), Charm El-Cheikh, Sinäi.*

Dans la plupart des projets, les bâtiments prennent la forme soit de chalets détachés et dispersés sur le terrain (figure 1.7), soit de groupes de bâtiments mitoyens formant probablement des cours orientées vers la vue principale (figure 1.6). Ces formes urbaines sont les plus courantes dans cette région, ce qui crée des projets architecturaux horizontaux avec de grands espaces urbains utilisés pour les activités de divertissement.



**Figure 1.6 :** Des bâtiments mitoyens formant des regroupements orientés vers la mer, « Mövenpick Hotel », « Gafy Resort » et « Al-Bostan Park », Charm El-Cheikh, Sinäi.



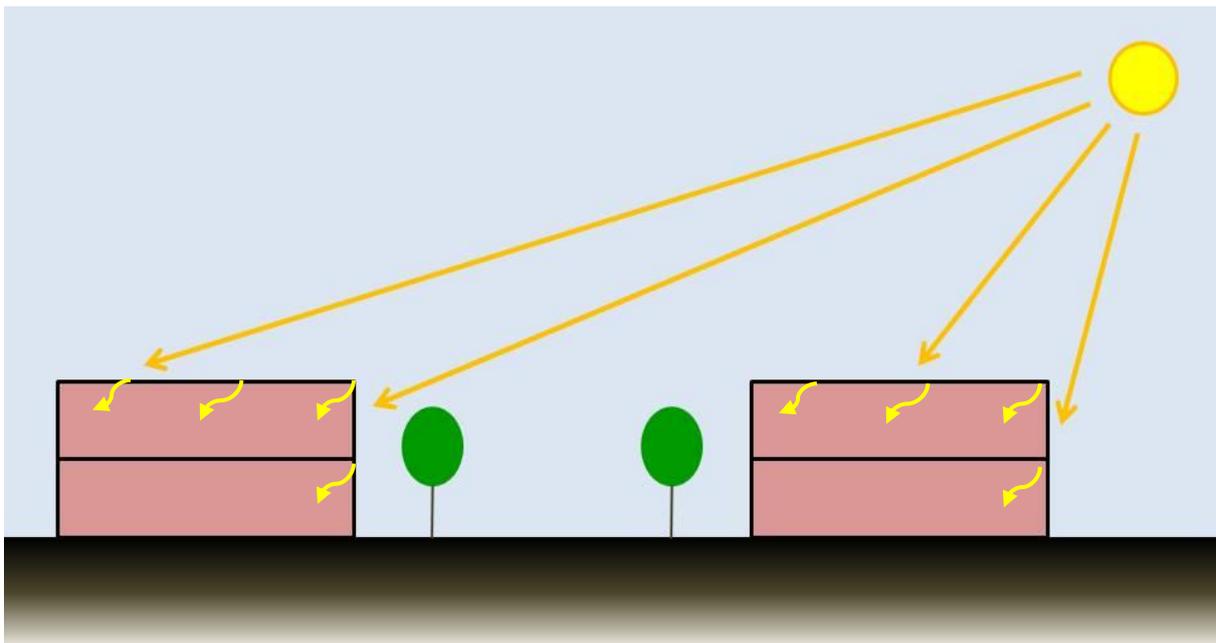
**Figure 1.7 :** La forme des bâtiments détachés, « Ghazala Beach », Charm El-Cheikh, Sinäi.

### 1.1.2. Le problème de l'inconfort thermique

Sur le plan thermique, les formes urbaines horizontales et surtout la forme détachée ont un défaut majeur. Elles augmentent la surface des façades exposées au soleil et en conséquence le gain solaire direct au cours de la journée (figure 1.8&1.9). Ces apports solaires par la transmission surfacique des parois chaudes surchauffent les espaces intérieurs. Le problème de la surchauffe des espaces intérieurs et surtout pendant les mois d'été cause l'inconfort thermique des usagers.



*Figure 1.8 : Les bâtiments détachés et dispersés augmentent les apports solaires par les grandes surfaces de façades exposées au soleil, le village touristique de Basata, 30 km de Taba, Sinäï.*



*Figure 1.9 : Une forme urbaine courante, mais pas bioclimatique.*

A contrario, cette forme urbaine dispersée permet d'avoir un flux d'air important et donne une grande vitesse de vent entre les bâtiments ce qui assure un potentiel pour le processus de refroidissement par ventilation naturelle (figure 1.10).



**Figure 1.10 :** La forme urbaine basse et dispersée nous donne une grande opportunité pour bénéficier du vent qui circule librement entre les bâtiments, village touristique d'holidayin, Nabaq-Bay, Sinäi.

Généralement, les bâtiments sont conçus avec un ou deux étages et des matériaux ayant probablement des résistances thermiques basses (béton armé et brique). Outre le gain solaire important, les bâtiments ne bénéficient pas de la ventilation naturelle comme un moyen de refroidissement. Ces raisons amplifient le problème de l'inconfort thermique à l'intérieur des bâtiments, créant une ambiance inconfortable pour les usagers. Afin de résoudre ce problème d'inconfort et assurer un bien-être thermique, des climatisations ont été utilisées dans la plupart des projets trouvés dans cette région. Cette approche fournit peut être une température et des taux d'humidité relative confortables, mais cette définition est insuffisante. La notion de confort thermique dépasse la simple gamme des températures. Elle repose sur la température, la vitesse de l'air, l'humidité et la pureté de l'air [Klaus, 1998]. Ces facteurs sont bien évidemment liés à la ventilation naturelle qui fait défaut à la plupart de nos bâtiments contemporains.

La ventilation naturelle peut être considérée non seulement comme un moyen pour atteindre un niveau de confort thermique acceptable, mais également comme une nécessité pour créer une ambiance saine. Par la ventilation naturelle, nous pouvons améliorer les conditions de température, de vitesse de l'air, d'humidité et de pureté de l'air afin d'atteindre le confort thermique tout en évitant le problème du syndrome du bâtiment malsain '*sick building syndrome*'<sup>4</sup> que l'on retrouve dans les bâtiments climatisés et mal ventilés.

Cette recherche vise à améliorer les conditions du confort thermique en bénéficiant de la ventilation naturelle. Par la ventilation naturelle, nous ne résoudrons pas seulement le problème de l'inconfort thermique, mais nous assurerons une ambiance confortable et saine. En même temps que nous faisons face à cette question d'inconfort thermique et que nous la traitons par des systèmes mécaniques et énergétiques qui créent des bâtiments malsains en polluant l'environnement, la nature offre des solutions à ce même problème.

Notre méthode sera d'étudier et d'analyser comment les systèmes biologiques surmontent les soucis de surchauffe dans cette région climatique. Nous allons analyser ces systèmes naturels d'adaptation thermique existant dans les plantes et les animaux qui vivent aux mêmes conditions climatiques. La recherche essaiera de comprendre aussi le processus de thermorégulation naturelle qui vise à garder une température interne appropriée. Cette recherche s'intéresse à l'inspiration de la nature et de ses systèmes impressionnants. Elle prend le biomimétique comme une approche afin de découvrir des méthodes biologiques d'adaptation thermique au climat chaud en essayant de les imiter et de les transférer en méthodes architecturales. Dans la partie suivante, nous allons explorer l'approche de la biomimétique et sa définition en se focalisant sur les applications biomimétiques dans le domaine de l'architecture au cours de l'histoire.

---

<sup>4</sup> Le syndrome du bâtiment malsain (SBM) est dans le domaine de la santé environnementale, un syndrome décrivant une combinaison de symptômes ou de maladies scientifiquement inexpliquées et associées à un lieu précis.

### 1.1.3. La biomimétique : la science qui imite la nature

La biomimétique, c'est la science qui imite la nature et ses conceptions et ses systèmes naturels afin de créer de nouveaux produits industriels. L'inspiration de la nature n'est pas un nouveau concept, mais il a commencé récemment à être scientifiquement formulé en vertu de plusieurs notions, telles que, la bionique (*bionic*<sup>5</sup>), la biomimétique, le biomimétisme (*biomimicry*<sup>6</sup>) ou la bio-inspiration.

#### 1.1.3.1. Définitions des termes (bionique et biomimétique)

Le terme « bionique » provient, peut-être, du mot grec « βίον » Bion, qui signifie « unité de vie », et le suffixe « ic/ique » qui signifie « comme ». Réunis, ils signifient «comme la vie», alors que certains dictionnaires présentent le mot comme s'il était formé à partir de «biologie» + «électronique». Ce terme « bionique » a été inventé par Jack E. Steele en 1956, alors qu'il travaillait à la Maison de la Division Aéronautique à Wright-Patterson « Air Force Base ». Le même terme a été utilisé plus tard en septembre 1960 dans une réunion scientifique américaine organisée à Ohio pour signifier une nouvelle discipline utile pour de nombreux domaines [Vincent et al, 2006, P 471].

L'expression «biomimétique» vient aussi du grec « βίον » et du suffixe « mimétique » qui indique « ayant une aptitude pour l'imitation ». D'autres dictionnaires mentionnent que ce terme vient de l'adjectif grec «mimetikos» qui signifie que l'objet est imitatif<sup>7</sup>.

Le terme « biomimétique » a été utilisé pour la première fois en 1962 par Schmitt O. dans le titre d'un article scientifique [Schmitt, 1969]. En 1997, Janine M. Benyus a popularisé le terme « biomimicry » dans son livre « Biomimicry : Innovation Inspired by Nature » [Benyus, 1997], et sa version française publiée en 2011 « biomimétique : quand la nature inspire des innovations durables », dans lequel elle a utilisé ce terme pour exprimer l'approche de mimer la nature dans les domaines scientifiques. D'autres ont utilisé le même terme comme Steven Vogel et Juilan Vincent, professeurs de biologie. Juilan Vincent définit la « biomimétique » comme « l'abstraction d'une bonne conception de la nature » [Powers, 2012, P.123]<sup>8</sup>. C'est cette approche ou ces définitions que nous développons.

Généralement, les termes « biomimétique » ou « biomimétisme » signifie la même chose et sont plus acceptés et privilégiés dans les domaines technologiques. L'utilisation de ces termes vise à éviter toute confusion avec le terme « bionique » utilisé plus largement dans le domaine des innovations médicales. ***Dans cette thèse, nous avons donc choisi d'utiliser le terme « biomimétique » qui est plus approprié à cette recherche architecturale.***

<sup>5</sup> La traduction anglaise du mot « bionique »

<sup>6</sup> La traduction anglaise du mot « biomimétique ou biomimétisme »

<sup>7</sup> Mimetic, Online etymology dictionary, Dictionnaire électronique voir (<http://www.etymonline.com/index.php?search=mimetic&searchmode=none>),

<sup>8</sup> voir (<http://webecoist.momtastic.com/2011/01/28/incredibly-leaf-like-12-bio-inspired-plant-based-designs/>)

### 1.1.3.2. Pourquoi la biomimétique maintenant?

Outre les aspects positifs de la révolution industrielle, cette dernière a eu des impacts négatifs sur l'environnement. Ce n'est pas nouveau de dire que la façon actuelle de traiter notre environnement et la façon dont nous consommons l'énergie est catastrophique. L'architecture participe à ce problème en ayant un impact néfaste sur notre environnement. D'autre part, nous constatons que les organismes naturels interagissent avec l'environnement pendant des millions d'années et qu'ils ont conçu des systèmes biologiques très efficaces pour s'adapter aux conditions environnementales afin de surmonter les défis.

Simultanément, la disponibilité des données biologiques qui sont dupliquées toutes les cinq ans, nous donne de nouvelles opportunités pour découvrir de nouvelles idées, conceptions et systèmes. Cette disponibilité nous donne également la chance de les réaliser et les transformer en concepts architecturaux.

*Cette recherche tente de profiter de la disponibilité des données biologiques dans le but d'imiter le succès de ces systèmes efficaces. Ces raisons soutiennent nos convictions selon lesquelles la biomimétique est une des approches qui guideront le développement technologique dans le domaine de la durabilité en général, et notamment sur la durabilité architecturale.*

### 1.1.3.3. La biomimétique comme une heuristique de recherche

La biomimétique comme méthode de recherche est scientifiquement divisée en deux groupes ; **La biologie influence la conception** (*biology influencing design*) et **les conceptions qui cherchent dans la biologie** (*design looking to biology*) [Pedersen Zari, 2007, p.2-3]<sup>9</sup>.

Le premier groupe « La biologie influence la conception » traite de la découverte de nouveaux comportements, fonctions ou caractéristiques biologiques afin de créer de nouvelles conceptions. Cette approche exige une analyse scientifique sophistiquée des systèmes biologiques et demande un suivi qui prend longtemps, de sorte que cette approche a besoin d'une équipe de scientifiques pour découvrir une idée qui peut utiliser et améliorer une conception.

Alors que la deuxième approche « conceptions qui cherchent dans la biologie » traite de la création de nouvelles conceptions en regardant les organismes et les écosystèmes naturels en vue d'étudier comment ils ont surmonté les mêmes problèmes auxquels sont confrontés les concepteurs pendant leurs conceptions. Cette approche n'a pas besoin de la même profondeur de l'analyse scientifique demandée par le premier groupe. Elle est plus pratique parce que les concepteurs cherchent dans la nature afin de découvrir des solutions d'un seul problème en transformant ces solutions en nouveaux concepts.

Cette recherche suit la deuxième approche « conceptions qui cherchent dans la biologie ». Nous cherchons comment la nature et ses systèmes biologiques peuvent surmonter les mêmes problèmes auxquels nous faisons face. Dans cette méthode de recherche, la biomimétique est une méthode heuristique qui ne passe pas par l'analyse biologique détaillée, mais elle explore les logiques et les règles générales desquels les organismes vivants dépendent afin de surmonter le problème. Ces règles ont besoin d'être appliquées et d'être vérifiées à travers des expérimentations.

Au sein de ces deux approches, les conceptions pourraient imiter quatre dimensions possibles : la composante physique (forme, structure, matériel), le comportement, la fonction (processus) ou l'écosystème. La plupart des exemples existants sont liés à la première dimension : la forme, la structure et le matériel.

Les conceptions qui imitent les comportements et les fonctions sont moins nombreuses. La maison tournante est une architecture biomimétique qui imite le comportement de la fleur du tournesol [Wigginton et Harris, 2002, p.126]. Cette fleur qui tourne avec le soleil donne l'idée de concevoir des maisons tournantes qui suivent la direction du soleil afin de maximiser le gain solaire.

Au centre du Zimbabwe, l'Eastgate, ouvert en 1996, est l'un des exemples les plus célèbres de la catégorie qui imite un système naturel. Mick Pearce, le concepteur, a tenté de fournir un confort thermique à l'intérieur de son bâtiment en imitant le système de ventilation utilisé dans les tours des termites trouvées dans la nature locale [Turner et Soar, 2008, p.1]<sup>10</sup>.

Cependant, il est très difficile de trouver des conceptions de la catégorie «écosystème» jusqu'à présent. Un exemple en est le projet Lavasa copiant la même proportion que l'écosystème d'origine dans la nature. Dans ce projet, on peut constater qu'environ 20 à 30% de la pluviométrie est renvoyée dans l'atmosphère directement, que 10 à 20% finit dans le ruissellement de surface, que 40 à 60% est absorbée par la végétation et le sol et que 7 à 10% est canalisée par des tuyaux souterrains dans le terrain de forêts escarpées. Ainsi, on a essayé de concevoir le projet avec son paysage pour correspondre à ces proportions [Baumeister, 2008]<sup>11</sup>.

*Dans cette thèse, nous ne recherchons pas à copier la nature, mais à analyser la nature pour nous orienter vers de nouvelles pistes pour surmonter le problème de l'inconfort thermique à l'intérieur des bâtiments dans les régions chaudes telles que le Sinaï. Cette recherche ne se concentre pas sur l'imitation des caractéristiques physiques ou des proportions, mais elle se focalise sur la fonction des systèmes de refroidissement et le processus de thermorégulation qui sont des garants pour assurer une température confortable aux organismes vivants.*

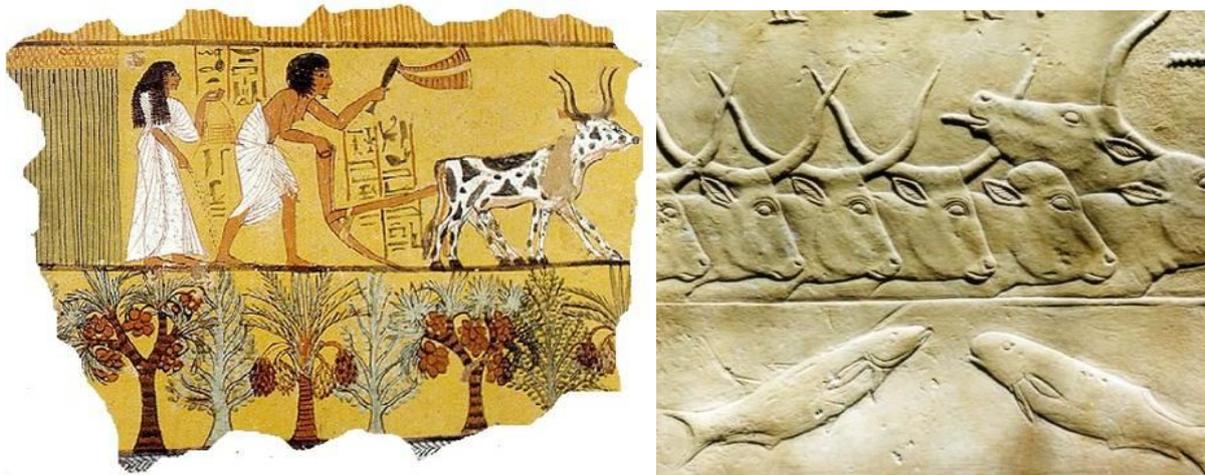
<sup>10</sup> voir (<http://www.rshanthini.com>)

<sup>11</sup> voir (<http://www.worldarchitecturenews.com>)

### 1.1.4. L'architecture et la biomimétique

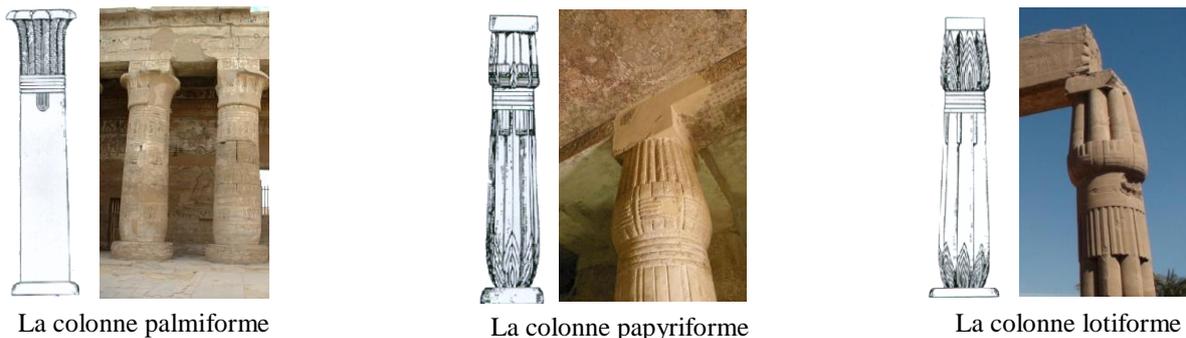
Avant de commencer notre recherche sur la biomimétique et le problème de l'inconfort thermique dans les bâtiments, c'était important de découvrir et de présenter l'histoire de la biomimétique et son rôle dans le domaine de l'architecture et de voir les valeurs qui ont été ajoutées sur l'architecture au cours des milliards d'années grâce à cette approche naturelle. En fait, bien avant d'être une science, la biomimétique était pratiquée dans le domaine de l'architecture, il y a longtemps, pour améliorer le quotidien ou tenter d'augmenter les capacités humaines.

Le premier pas architectural vers la nature était, bien sûr, de copier et de dessiner des figures naturelles sur les murs et les façades des bâtiments. Nous pouvons facilement trouver ces exemples partout dans le monde et dans toutes les civilisations antiques (figure 1.11).



*Figure 1.11 : Les dessins et Les gravures pharaoniques sur les murs de bâtiments anciens égyptiens sont des exemples pour la première application biomimétique dans le domaine de l'architecture.*

Les anciens architectes ont conçu différents types de colonnes dont la forme s'inspire de l'architecture végétale (figure 1.12). Il existe plusieurs types de ces colonnes dans l'architecture grecque et romaine comme la colonne ionique, corinthienne et composite. Dans l'architecture égyptienne, nous pouvons trouver aussi des exemples comme la colonne palmiforme, papyriforme et lotiforme.



La colonne palmiforme

La colonne papyriforme

La colonne lotiforme

*Figure 1.12 : Les différents types des colonnes phréniques.*

Il y a 2100 années, l'architecte romain Vitruve a ouvert une nouvelle dimension dans l'architecture biomimétique. Selon Vitruve, l'architecture est une imitation de la nature. Il a appliqué l'approche biomimétique en comparant les proportions de temples avec celles inspirées de la nature et surtout du corps humain [Guillot et Meyer, 2008, p.4].

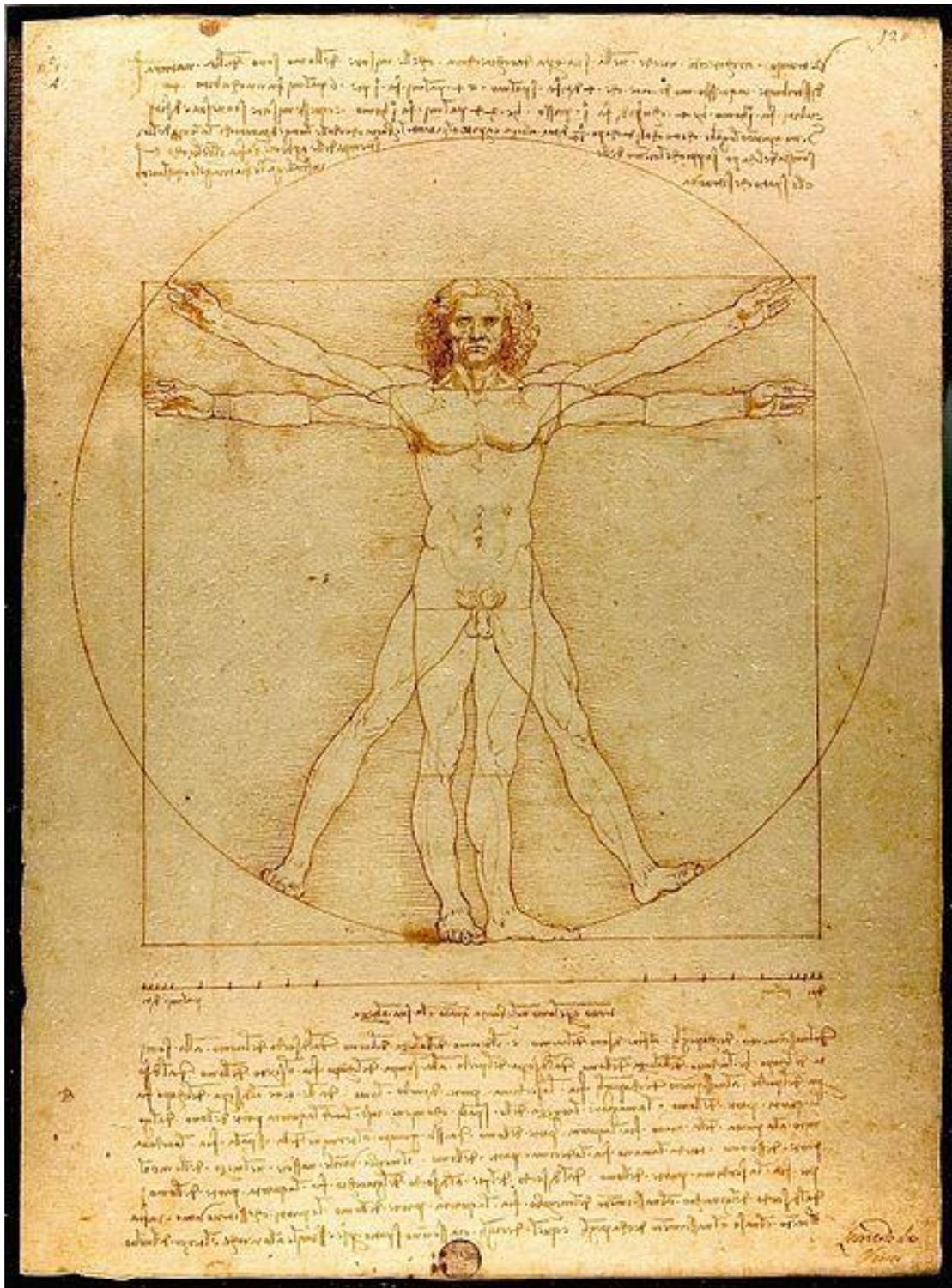
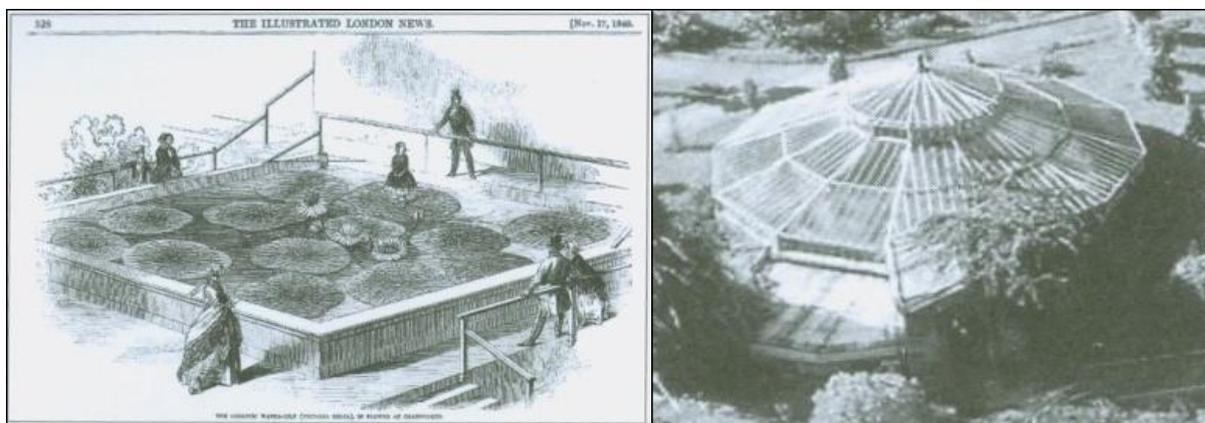


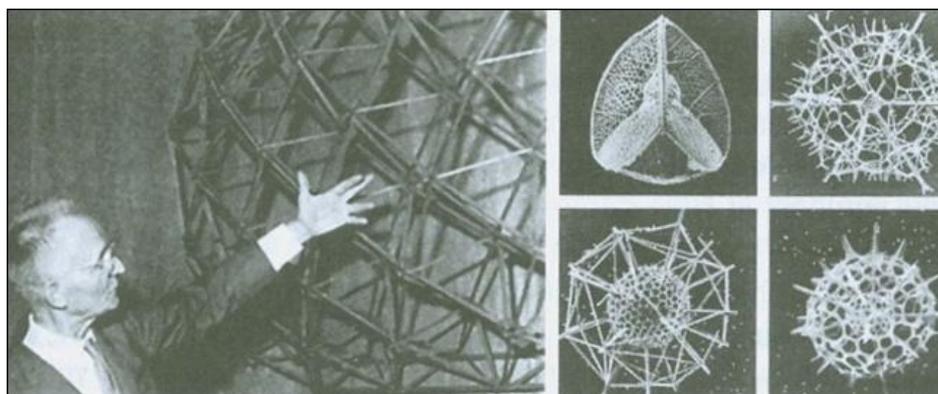
Figure 1.13 : L'homme vitruvien de Léonard de Vinci.

Il y a huit siècles en Chine, les populations rurales du village de Hongcun étaient considérées comme les premiers architectes bioniques. Ils ont conçu leur village en lui donnant la forme d'une vache, tout en créant un système de réseau hydrologique prenant la forme de son système digestif [Guillot et Meyer, 2008, p.7-8]. Les copies des formes et ses propositions ont continué jusqu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle comme la seule application du biomimétisme en architecture.

La révolution industrielle a ajouté une nouvelle dimension dans ce domaine qui est la copie des systèmes de construction trouvés dans les plantes et les animaux. Cette approche ouvre la voie à un grand nombre de nouvelles constructions. La maison de Lily à Strasbourg et le Crystal Palace à Londres conçu par Joseph Paxton sont des exemples pour de telles constructions inspirées (figure 1.14) [Guillot et Meyer, 2008, p.14]. Vers la moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, Robert Le Ricolais, professeur français à l'Université de Pennsylvanie, a développé de nouveaux modèles structurels en copiant les modèles de structure biologique établis par le biologiste allemand Haeckel pendant le XIX<sup>ème</sup> siècle (figure 1.15) [Guillot et Meyer, 2008, p.15].



**Figure 1.14:** (à gauche) Annie Paxton démontrant la solidité d'une feuille de nénuphar *Victoria amazonica*, et (à droite) la serre de Barry « maison de Lily » à Strasbourg dont l'armature est inspirée de la feuille de nénuphar *Victoria amazonica* [Guillot et Meyer, 2008, p.14].



**Figure 1.15:** Robert Le Ricolais devant ses structures architecturales inspirées des radiolaires [Guillot et Meyer, 2008, p.14, 15].

Durant la même période, de nombreux architectes et ingénieurs, comme Frei Otto, Frank Lloyd Wright et autres, ont conçu leurs bâtiments en copiant des formes naturelles dont les structures et les proportions sont impressionnantes en créant de nouvelles conceptions architecturales telles que le stade olympique de Munich (figure 1.16), le musée Guggenheim à New York, le siège de S.C. Johnson & Fils Inc. avec ses colonnes de champignons (figure 1.17) et la tour de *price* qui imite la structure de l'arbre, etc [Pawlyn, 2011, P.2-3].



*Figure 1.16: Le stade olympique de Munich conçu par Frei Otto qui inspire la structure de la toile d'araignée.*



*Figure 1.17: Le siège de S.C. Johnson & Fils Inc et ses colonnes qui s'inspirent sa forme de la forme de champignon.*



*Figure 1.18: La structure du nouveau stade olympique de Pékin qui ressemble le nid d'oiseau et qui laisse entrer la lumière, tout en filtrant le froid et le vent.*

« L'intention est de transcender l'imitation des formes naturelles et de tenter, de comprendre les principes qui sous-tendent ces formes et systèmes », [Pawlyn, 2011, p.15].

A la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, l'ère des technologies modernes, de la nanotechnologie, de l'intelligence artificielle et des télécommunications, le moment était propice pour ajouter de nouvelles valeurs au biomimétisme. Michael Pawlyn, dans son livre sur l'architecture et le biomimétique intitulé « Biomimicry in architecture » qui est publié en septembre 2011, divise les applications du biomimétique dans le domaine de l'architecture en six catégories. Il pose six questions en six chapitres, chacune représente un sujet différent [Pawlyn, 2011].

- Comment pourrions-nous construire des structures plus efficaces ?
- Comment allons-nous fabriquer des matériaux ?
- Comment allons-nous créer des systèmes zéro-déchets ?
- Comment gérer l'eau ?
- Comment allons-nous contrôler notre environnement thermique ?
- Comment allons-nous produire de l'énergie pour nos bâtiments ?

Ces questions concernant les structures, les matériaux, les traitements des déchets, la gestion de l'eau, les méthodes thermiques et la production de l'énergie visent à montrer que le biomimétique peut ajouter de nouvelles valeurs en différentes perspectives. L'intention de Michael Pawlyn dans son livre est de transcender l'imitation des formes naturelles et d'essayer de comprendre les principes qui sous-tendent ces formes. Le but est de traduire les systèmes naturels en solutions dans le domaine de l'architecture. Selon lui nous pouvons aller plus loin dans l'approche du biomimétique. Aujourd'hui, nous ne voulons pas seulement copier la forme, la structure ou utiliser les mêmes matériaux, mais nous pouvons chercher, étudier et imiter les systèmes naturels de gestion d'énergie, d'eau, de déchets ou bien le système thermique.

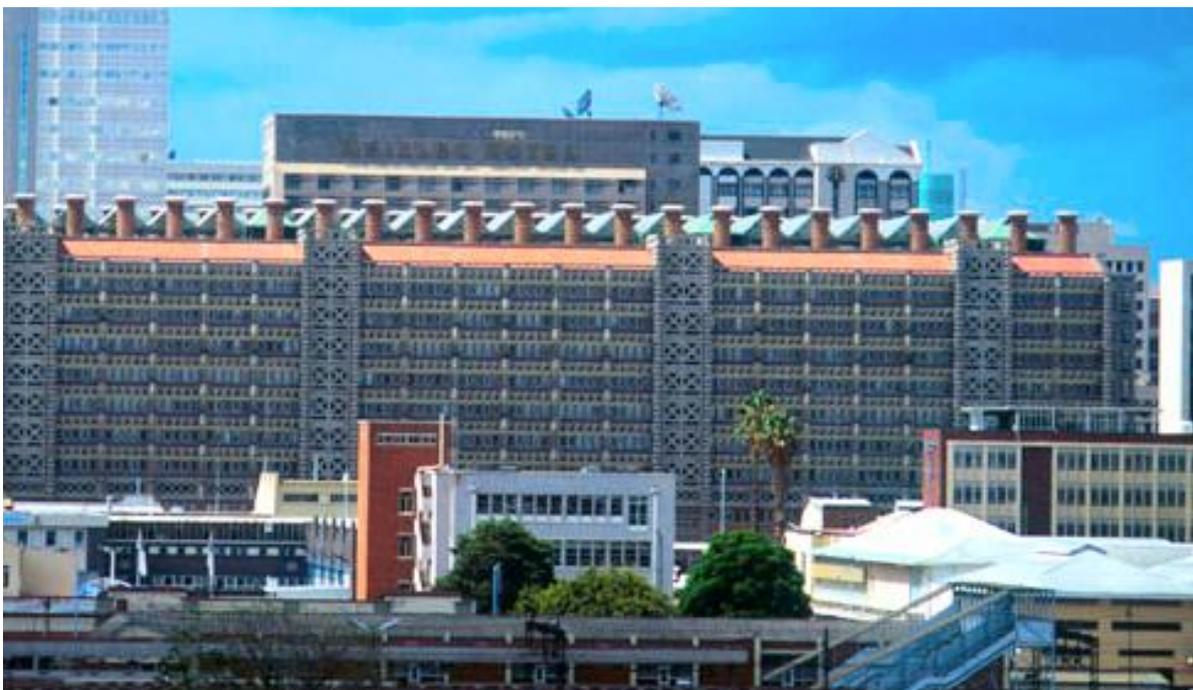
Cette approche approfondie intéresse aujourd'hui d'autres architectes comme Thomas Knittel, architecte-biomimétique, qui exprime cela en disant « *Nous ne voulons pas simplement imiter la façon dont quelque chose semble. Nous voulons comprendre **la logique de la nature**, et comment elle va s'effectuer dans nos bâtiments* »<sup>12</sup>. La nouvelle valeur ajoutée sur l'approche biomimétique, pendant les dernières années et qui nous intéresse dans cette recherche, *est d'imiter les systèmes et les processus naturels, de regarder au-delà de la forme et de la structure et de découvrir comment les organismes naturels fonctionnaient afin de créer des nouveaux systèmes.*

### 1.1.5. La biomimétique et l'approche bioclimatique

« À ce jour, le biomimétique a seulement été appliqué à la conception des bâtiments dans une mesure assez limitée, souvent en s'appuyant sur des exemples souvent cités comme des termitières pour la conception bioclimatique et des toiles d'araignées pour la structure des bâtiments. Ces dernières années la biomimétique s'est développé très rapidement dans d'autres domaines tels que la conception industrielle et de la médecine », [Pawlyn, 2011, p.5].

Cette recherche comme nous l'avons montré, s'intéresse aux systèmes thermiques et surtout aux systèmes d'adaptation au climat chaud. Elle partage le même point de vue présenté par Michael Pawlyn selon lequel il faut chercher au-delà des caractéristiques physiques afin de comprendre les principes des systèmes d'adaptation thermique et le processus de thermorégulation trouvés dans la nature.

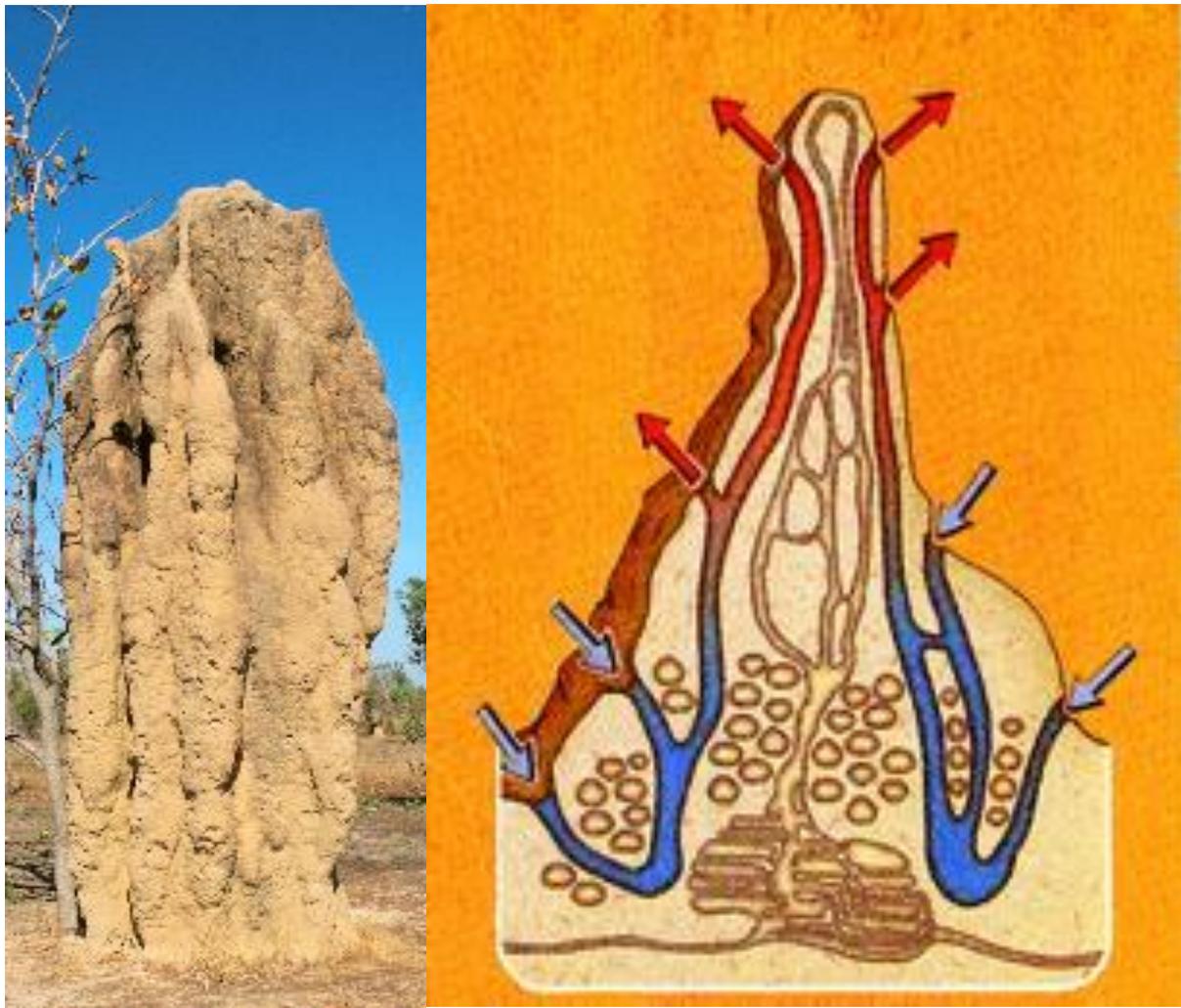
L'approche approfondie de la biomimétique-thermique a été appliqué dans des projets, mais ils ne sont pas nombreux. L'exemple biomimétique le plus célèbre réalisé dans le domaine de l'architecture bioclimatique est le bâtiment d'Eastgate au Zimbabwe (figure 1.19). Cet exemple qui est le centre commercial le plus grand du pays, utilise les mêmes principes de ventilation et de refroidissement que les principes d'une termitière locale.



*Figure 1.19 : Le bâtiment d'Eastgate à Zimbabwe [Turner et Soar, 2008, p.2].*

À l'intérieur de cette termitière, les insectes cultivent un champignon qui est leur seule nourriture. Il doit être conservé à 30°C maximum, tandis que les températures extérieures varient entre 5°C pendant la nuit et 37°C pendant la journée. Les termites, dans leurs monticules de terre, arrivent par un moyen de ventilation très efficace, à faire stagner la température interne de la termitière à environ 23°C (entre 21° et 25°) [Pawlyn M., 2011, P.84].

Cette construction haute, normalement de 4 à 5 m, crée un mouvement d'air par effet de cheminée à travers des petits trous de ventilation tout autour de la partie basse du nid et des sorties d'air au sommet chauffées par l'exposition directe au soleil. Ce flux d'air circule en passant sous terre où il est refroidi par la terre humide. Puis, il remonte dans la cheminée centrale où les termites résident (figure 1.20). Les termites peuvent réguler la température intérieure en obstruant ou en perçant des trous au sol. Pendant la nuit, elles bouchent ces trous afin de conserver la chaleur de la termitière.



**Figure 1.20 :** Une termitière et le schéma de la régulation de la température d'une termitière [Chekchak, 2010]<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> voir (<http://tpe-biomimetisme.1eres.over-blog.com/article-les-termitieres-62858101.html>).

Mick Pearce, l'architecte du bâtiment d'Eastgate, a pris cet excellent exemple naturel et l'applique dans son projet afin de concevoir un bâtiment sans climatisation énergétique. Le bâtiment est en fait deux parties reliées par des ponts à travers un atrium central ombragé et couvert par un toit ouvert en verre. Afin d'éviter la surchauffe des espaces internes, pas plus de 25% de la surface des façades est en verre, et toutes les fenêtres sont couvertes par une forme inhabituelle de parasol (figure 1.21).



*Figure 1.21 : La forme inhabituelle de parasol de l'Eastgate centre.*

L'air frais monte dans des 48 cheminées de briques dans l'atrium. Il entre dans les espaces par de petits creux sous les planchers et de là dans chaque bureau. Comme il se réchauffe et s'élève, il est tiré à travers des sorties d'air dans les plafonds vers l'atrium. Finalement, l'air chaud sort par l'effet de cheminée à travers le toit chauffé en verre (figure 1.22). Pendant les nuits fraîches d'été, des grands ventilateurs poussent l'air à travers la construction sept fois par heure pour refroidir les planchers creux. Cette technique inspirée de la nature réalisa 35% d'économie d'énergie par rapport aux bâtiments traditionnels. Cette stratégie de refroidissement a entraîné une réduction de 90% de l'énergie dédiée à un système énergétique de refroidissement [Isle et Leitch, 2009]<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> voir (<http://osbsustainablefuture.org/home/section-newsletter/20101spring6isleleitch/>)

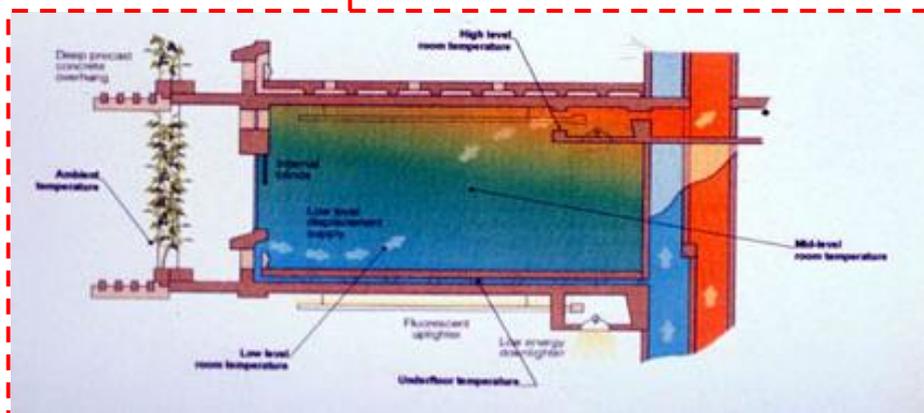
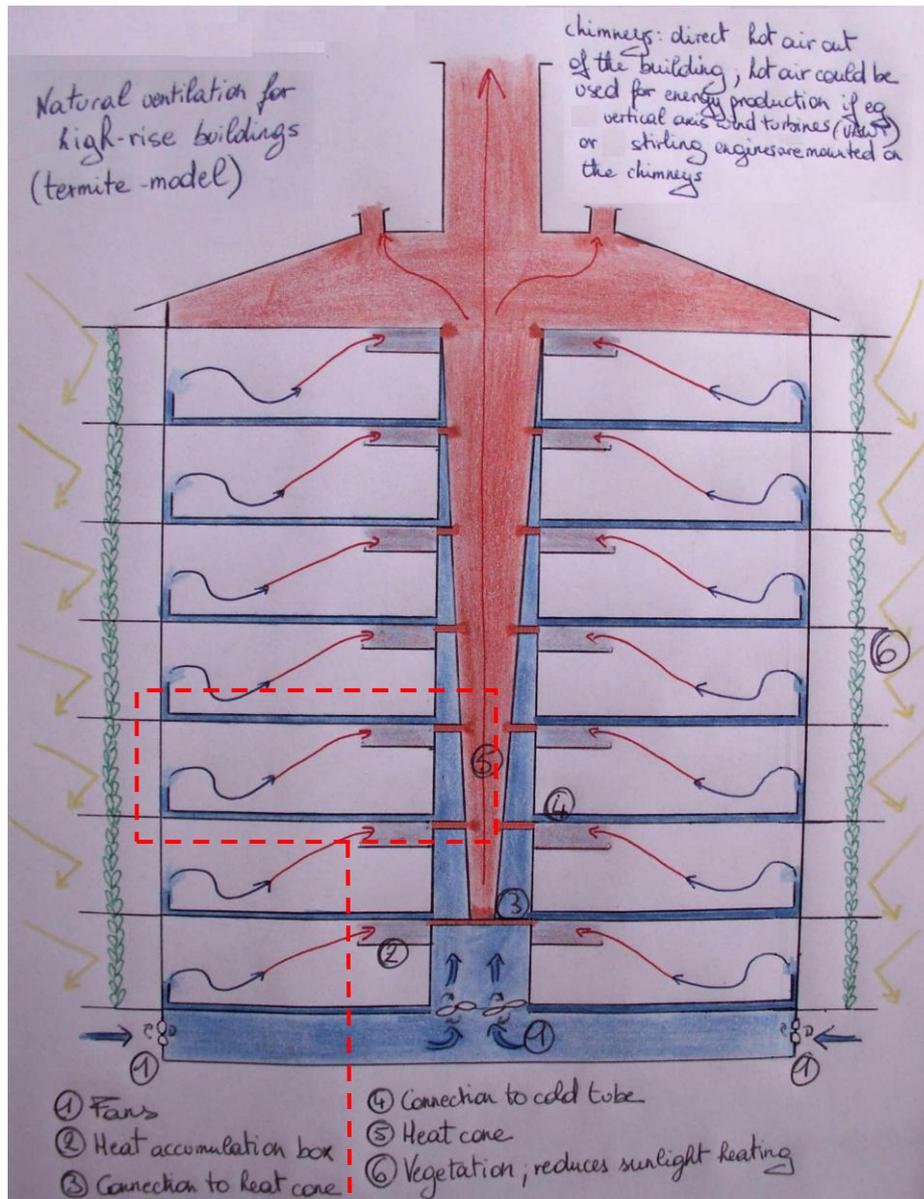
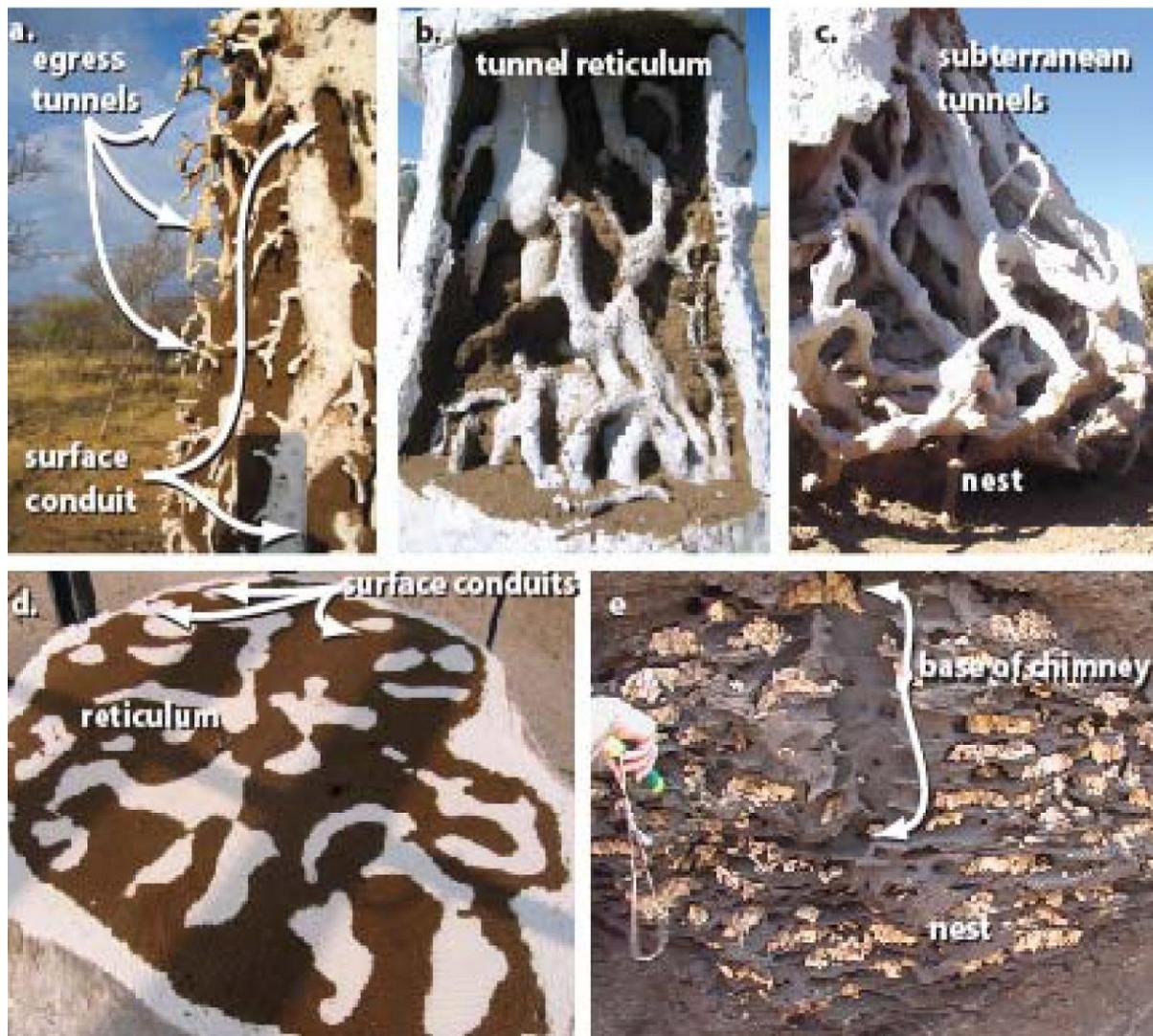


Figure 1.22: Le système de ventilation et de refroidissement le bâtiment d'Eastgate au Zimbabwe [Greenthinkers, 2008<sup>15</sup>].

<sup>15</sup> voir ([http://www.greenthinkers.org/blog/2008/01/termites\\_are\\_smart.html](http://www.greenthinkers.org/blog/2008/01/termites_are_smart.html))

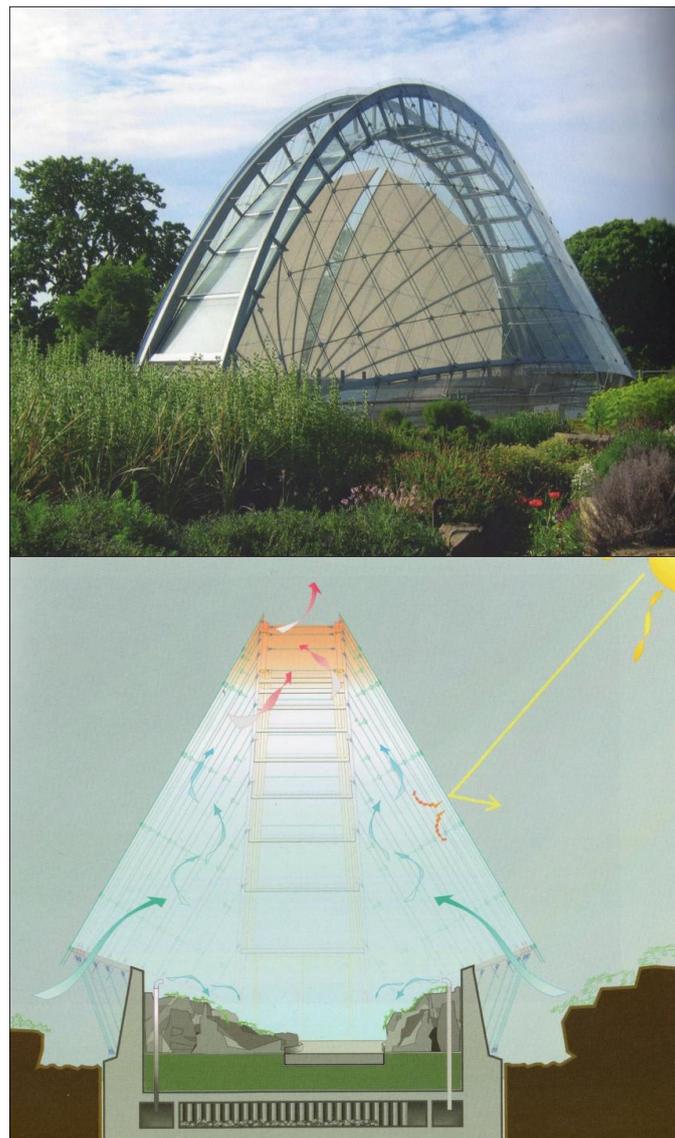
Une recherche récente sur les termitières est faite par J. Scott Turner et Rubert C. Soar [Turner et Soar, 2008]. Cette recherche se focalise sur comment exactement les termitières se fonctionnent. Turner et Soar ont montré que les températures internes sont loin d'être stables aussi que nous le pensions, et que la principale source de stabilisation thermique est le terrain plutôt que la ventilation naturelle ou le refroidissement par évaporation. Ces études ont suggéré que les termitières exploitent le vent d'une façon beaucoup plus complexe que l'effet de cheminée simple ou induites par le vent (figure 1.23). Ils affirment que le réseau de tuyaux fonctionne comme des poumons qui facilitent les échanges gazeux.



**Figure 1.23:** La structure intérieure des termitières en montrant les conduits de ventilation au cours de l'expérience de Turner et Soar [Turner et Soar, 2008].

L'exemple d'Eastgate ouvre un nouveau chemin vers l'architecture biomimétique concernant les solutions bioclimatiques. Suite aux leçons tirées des termites, Wilkinson Eyre (un architecte) avec Patrick Bellew, (un ingénieur en environnement et spécialiste des termites) ont conçu une maison de plantes alpines (figures 1.24). Il est commun que les collections de plantes alpines se conservent dans des lieux réfrigérés ou complètement

climatisés, mais le client demandait des concepteurs de proposer une solution plus créative pour ce projet. L'équipe a conçu un bâtiment pour y inclure un labyrinthe thermique, ce qui en termes simples est un sous-sol avec une grande surface de murs en pierre afin de créer une masse thermique très importante. Cette masse peut être ventilée pendant la nuit lorsque les températures sont basses. Le but est de créer une zone de transition thermique entre l'extérieur et l'intérieur qui peut être utilisé pendant la journée en faisant circuler l'air à travers cette espace froid. Ce processus permet un contrôle efficace à travers l'imitation du processus similaire trouvé chez les termites qui vise à contrôler la fermeture et l'ouverture des entrées et des sorties d'air. Le bâtiment avec son système de refroidissement a réussi à maintenir les conditions thermiques requises avec un minimum d'énergie pour les ventilateurs [Pawlyn M., 2011, P.87-88].



**Figure 1.24:** La maison de plantes alpines à Kew Gardens, conçu par Wilkinson Eyre et Patrick Bellew.

Dans un exemple différent, l'agence d'architecture « Jerry Tate » a exploré le potentiel de l'utilisation de la transpiration dans son schéma proposé pour le concoure IHUB. L'objectif

était de créer un bâtiment qui se refroidit avec de l'eau, mais sans pompe (figure 1.25). La proposition imite l'action capillaire existante dans les plantes pour transporter l'eau vers l'haut. Dans ce système, il y a aussi une relation entre la demande pour le refroidissement et la vitesse à laquelle l'eau est fournie. Les dessins montrent un réseau de tuyaux fins sur la façade sud à travers laquelle l'eau se monte et se vaporise, et l'air est refroidi par un processus d'évaporation. Les concepteurs ont proposé un système de très haute-technologie d'électro-osmose combinée avec des plantes qui fonctionnent comme des surfaces d'évaporation [Pawlyn M., 2011, P.82].

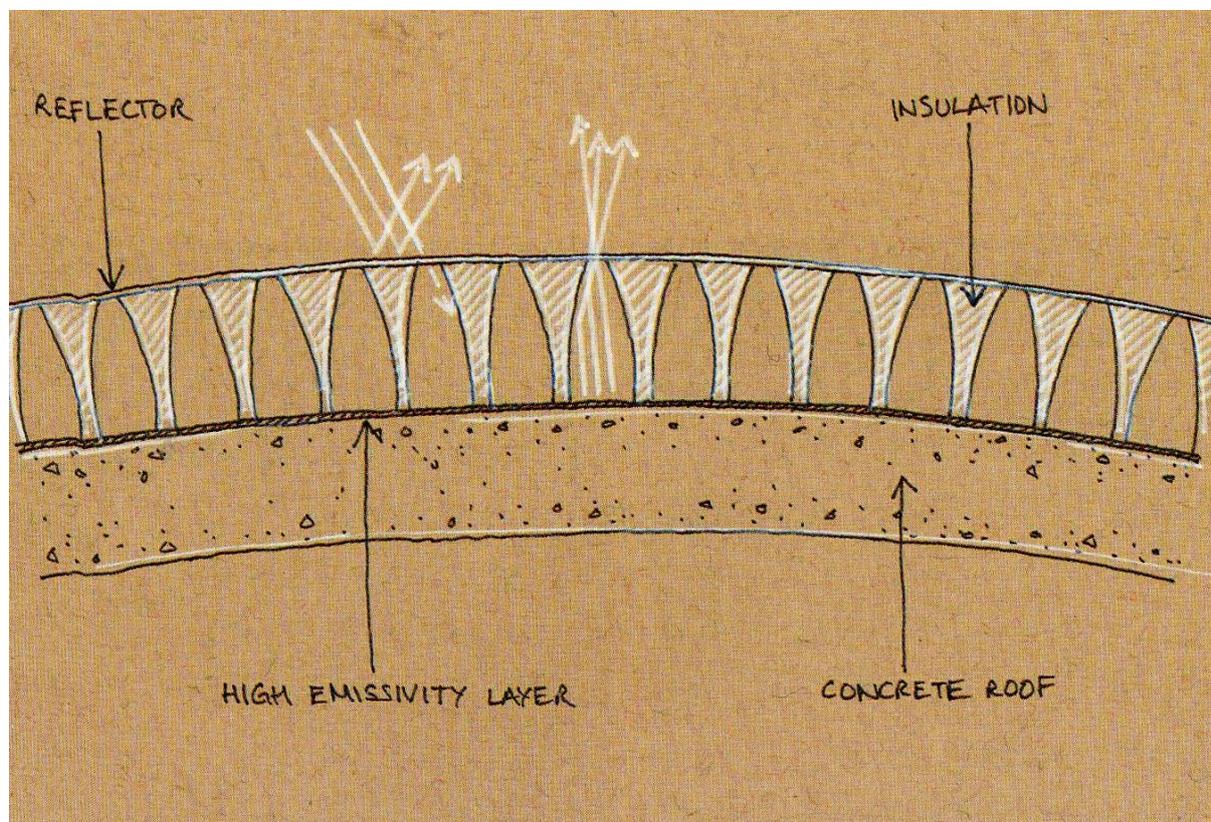


*Figure 1.25: Le projet proposé par Jerry Tate Architectes pour le concours d'IHUB, dont un système de refroidissement basé sur le concept de transpiration sur la façade sud.*

Malgré les exemples mentionnés au-dessus, nous pouvons dire que les projets réalisés en suivant l'approche biomimétique/bioclimate jusqu'à maintenant ne sont pas nombreux. Au niveau de recherche sur le biomimétisme et l'architecture bioclimatique, nous pouvons aussi assumer que ce type de recherches est rare. En général, Les articles scientifiques, dans ce domaine, se concentrent sur l'explication des phénomènes naturels d'une manière théorique ou l'analyse technique du comportement thermique des bâtiments existants tels que le bâtiment d'Eastgate.

Parfois, ces recherches théoriques conduisent à des expérimentations pratiques afin de confirmer leur efficacité. Une de ces recherches est la thèse introduit par Salman Craig dans lequel il a proposé un nouveau toit biomimétique qui est isolée contre le soleil, mais qui permet, dans le même temps, de se dégager de la chaleur infrarouge pendant la nuit. Cela a

conduit à une conception de toit (figure 1.26) en béton avec des réflecteurs transparents qui fonctionnent d'une part comme une couche d'isolation thermique qui bloque la plupart des rayons du soleil, et d'autre part comme de des sorties de chaleur vers l'haut. Craig estime que le toit biomimétique permettrait de maintenir le béton à une moyenne de 4,5 °C plus froide que les toits normaux dans un climat chaud comme celui de Riyad, Arabie Saoudite [Pawlyn M., 2011, P.83].



*Figure 1.26: Un toit biomimétique proposé par Salmann Craig qui reflète les rayonnements solaires pendant le jour et perd la chaleur pendant la nuit [Pawlyn M., 2011, P.83].*

Au cours de l'étude de cette thèse, nous n'avons pas trouvé de recherche ou article théorique ou pratique sur le biomimétique et ses applications architecturales en Égypte ou dans la région du Sinaï. Ce manque de données m'incite à étudier ce domaine et ses applications et surtout en Égypte afin d'enrichir les études sur l'approche biomimétique et voir qu'est ce que cette approche peut offrir pour l'architecture dans cette région.

L'objectif principal de cette thèse est donc de proposer des systèmes de refroidissement ou d'adaptation thermique au climat chaud basés sur les idées tirées de la nature en suivant l'approche biomimétique qui vise à comprendre, étudier et puis imiter les systèmes d'adaptation thermique trouvés dans la flore et la faune ainsi que le processus de thermorégulation existe dans notre corps.

## 1.2. Hypothèse

L'architecture biomimétique s'inspire des divers systèmes remarquables de la nature tels que les puissances thermorégulatrices de la peau humaine, les changements saisonniers de la peau de nombre d'animaux, l'ouverture et la fermeture des fleurs en réponse à la lumière du soleil. Cette recherche s'intéresse à l'architecture biomimétique en tant que démarche capable d'inspirer des solutions architecturales climatiques appropriées au climat chaud.

Dans une première approche, les animaux et les plantes qui vivent dans les zones chaudes sont pourvus de systèmes divers qui les aident à bien s'adapter au climat chaud. L'hypothèse se base sur le questionnement suivant :

*Les systèmes naturels, comme le système de thermorégulation de la peau de l'homme, les systèmes biologiques d'adaptation thermique dans les animaux et les plantes, peuvent-ils enrichir des concepts architecturaux existants dans leur capacité à s'adapter à l'environnement local ?*

L'analyse de la nature et de ses systèmes d'adaptation climatique permet de développer des idées architecturales appropriées aux climats locaux. La recherche considère ces systèmes naturels comme une source d'inspiration pour la réalisation de façades et de bâtiments biomimétiques. Ces concepts peuvent, à l'aide de technologies nouvelles, améliorer le comportement thermique de nos bâtiments pour atteindre le confort souhaité.

Dans une deuxième approche, il est nécessaire de décrire et d'étudier les logiques thermiques utilisées dans l'architecture locale. L'analyse porte sur l'architecture vernaculaire et l'architecture d'aujourd'hui qui va nous expliquer les points d'avantages et d'inconvénients de ces bâtiments du point de vue thermique. Par cette analyse, nous allons comprendre les logiques thermiques utilisées dans l'architecture vernaculaire telles que la tour à vent, le moucharabieh, le patio et la tente qui peuvent être difficiles à réaliser aujourd'hui, mais peuvent servir de base aux logiques thermiques à appliquer pour nos bâtiments contemporains.

D'un autre côté, l'analyse des bâtiments d'aujourd'hui et leur comportement thermique va expliquer les points négatifs de ce type de constructions. Ce sera donc une référence dans ma recherche afin de voir ce que nous pouvons changer dans le comportement thermique des constructions en appliquant les logiques thermiques appropriées et en suivant l'approche de l'architecture biomimétique.

## 1.3. Périmètre et limites de l'étude

### Limitation de l'approche du biomimétique

Dans cette thèse, nous allons étudier l'approche biomimétique et voir d'une part comment celle-ci peut nous aider à développer des systèmes de refroidissement plutôt passifs, et d'autre part à quel point elle ressemble à la logique d'adaptation thermique existant dans la nature. Cet objectif reste très large et difficile à atteindre sans proposer des limitations pour notre étude. C'est la raison pour laquelle nous proposons de nous concentrer sur l'imitation des systèmes d'adaptation thermique trouvés dans la nature sans focaliser sur l'imitation des formes ou bien des caractéristiques physiques qui ont été bien analysées dans d'autres études. Nous allons donc analyser les systèmes d'adaptation thermique existant dans les animaux, les plantes et l'homme, en nous concentrant sur le processus de thermorégulation.

### Limitation du climat

Comme nous l'avons précisé, c'est le terrain d'étude - « la région du Sinaï » - qui illustre la problématique de la thèse, avec d'un côté une région ayant un climat chaud, des bâtiments qui ne prennent pas en compte des approches passives de refroidissement, et de l'autre côté une nature qui s'adapte bien au climat local chaud depuis longtemps. Ces facteurs limitent notre étude pour la deuxième fois, mais cette fois-ci géographiquement. Nous allons nous focaliser sur la région du Sinaï et sa nature. Les animaux et les plantes de cette région seront analysés par leurs systèmes d'adaptation thermique au climat chaud. Nous postulons que les plantes et les animaux qui vivent dans cette région offrent des systèmes bien appropriés au climat local.

### Limitation d'exemple à développer

Dans un troisième temps, nous postulons que la nature offre un grand nombre d'exemples d'adaptation thermique. Ceux-ci ne peuvent pas être analysés et validés dans une seule étude. Cette recherche va présenter différents exemples au niveau théorique, mais dans la partie pratique, nous nous concentrerons sur un seul exemple que nous développerons, ce qui nous permettra d'expérimenter et de valider celui-ci par des expérimentations in situ et des simulations numériques.

### Limitation des outils numériques

L'utilisation des logiciels de simulation thermique pour valider l'exemple développé par la recherche est favorable, mais les rigidités de ces logiciels peuvent être un obstacle face à nous. Les logiciels de simulation thermique proposent certains systèmes de refroidissement, et il est probablement difficile de modifier ces derniers sans apprendre la langue de programmation. Dans le cas de proposer un système inspiré de la nature et qui n'existe pas dans ces logiciels, il sera impossible de le simuler. L'utilisation de ces logiciels de simulations dépend donc de l'exemple développé et de la possibilité de le simuler.

## 1.4. Méthodologie

La recherche appliquera plusieurs méthodes pour accomplir ses objectifs. Dans un premier temps, nous allons explorer plusieurs notions fondamentales pour notre recherche telles que la notion du confort thermique, la ventilation naturelle et son impact sur la sensation du confort. Cette exploration théorique sera suivie par une analyse des logiques thermiques utilisées dans l'architecture locale vernaculaire et contemporaine. L'analyse se concentrera sur les logiques thermiques qui bénéficient de la ventilation naturelle afin d'assurer un niveau de confort thermique accepté par les usagers. Cette analyse est essentielle afin de nous montrer comment l'architecture qui existe dans cette région, fonctionne sur le plan thermique et quels sont les avantages et les inconvénients de ces logiques. Celle-ci révélera aussi le problème du mauvais comportement thermique des édifices d'aujourd'hui, couramment construits en briques et en béton. Ce type de bâtiment sera donc une référence sur laquelle nous pourrons appliquer les idées biomimétiques.

Ensuite, une méthode analytique sera utilisée dans le deuxième chapitre. Dans un premier temps, la recherche observe et analyse les solutions d'adaptation thermique au climat chaud trouvées parmi la faune et la flore locale. Cette méthode d'analyse vise à proposer des logiques thermiques et des idées biomimétiques en essayant de les comparer avec les solutions architecturales existantes. Dans un deuxième temps, nous allons analyser le processus de thermorégulation humaine qui est responsable de la régulation de notre température interne de façon à ce que l'organisme soit toujours aux environs de 37,5°C. C'est important aussi, dans cette phase, de mentionner le rôle thermique de la peau naturelle qui participe et joue un rôle majeur dans ce processus.

Ces deux phases d'analyse de la nature nous aiderons à repenser notre approche thermique appliquée aux bâtiments et aux façades en visant à améliorer leurs comportements thermiques. Une phase intermédiaire entre la partie théorique et la partie pratique permet de proposer et de convertir les idées, tirées de la recherche, en concepts pratiques. Une de ces idées inspirée de la nature et m'intéressant dans cette thèse, est le concept du « mur respirant » qui sera présenté dans le troisième chapitre.

Dans la deuxième partie de cette thèse nous visons à valider ce concept du « mur respirant » tiré de la partie théorique. Pour commencer, nous allons proposer des versions différentes appropriées aux zones climatiques existantes dans le Sinaï. Cette phase est faite par l'analyse détaillée de chaque zone climatique. Ces analyses sont faites par des logiciels numériques d'analyse bioclimatique comme l'« Ecotech-analysis 2011 » et le « Climat-consultant 5,2 » et en utilisant des données climatiques numériques au cours des trente dernières années. Les résultats nous donneront une évaluation des systèmes de refroidissement appropriés pour chaque zone climatique dans la région étudiée.

Une méthode expérimentale sera utilisée afin de mettre à l'épreuve le concept du « mur respirant ». Une expérimentation in situ sera réalisée qui vise à comparer deux modèles réels miniatures : le premier suivant la conception et la logique thermique utilisée dans les bâtiments existants dans la région du Sinaï, le deuxième modèle suivant le concept du « mur respirant » développé par notre recherche. La comparaison entre les deux comportements thermiques est nécessaire pour quantifier l'efficacité des nouvelles techniques en vue d'une amélioration du confort thermique dans les bâtiments en zones chaudes. Finalement, une conclusion sur les résultats obtenus et les perspectives de l'application sera réalisée. Ces perspectives seront relatives aux problèmes techniques envisagés pour appliquer cette idée dans la réalité, tout en discutant des impacts attendus et des considérations à prendre en compte lorsque le concept développé sera mis en pratique.

## **1.5. Plan de recherche**

Le travail comprend deux parties principales : l'approche théorique et l'approche pratique. L'approche théorique contient deux chapitres qui ont deux objectifs principaux. Le premier « chapitre 2 », vise à clarifier quelques définitions utiles pour la recherche telles que le confort thermique, la ventilation naturelle et son rôle pour atteindre le confort thermique ainsi que les dispositifs architecturaux qui bénéficient de la ventilation naturelle dans l'architecture vernaculaire et dans l'architecture contemporaine.

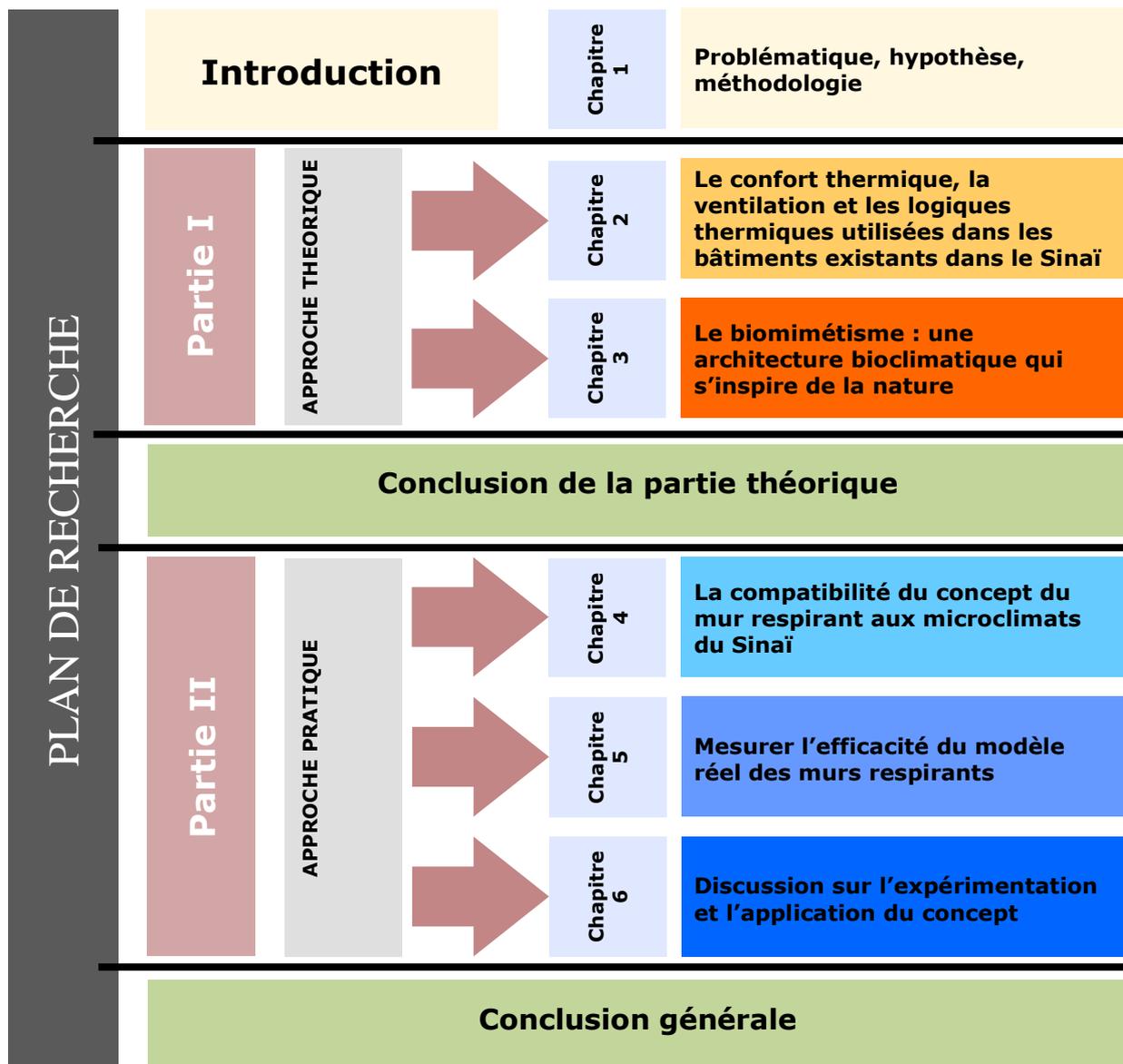
Le deuxième « chapitre 3 », étudie l'approche du biomimétisme et d'autre part des systèmes biologiques adaptés aux climats chauds trouvés dans la nature. Ces analyses ont été menées afin de développer des concepts architecturaux. À la fin de cette partie théorique, nous proposerons le concept du « mur respirant » qui est développé par la recherche.

Dans la deuxième partie de cette thèse, une approche pratique a été introduite afin de valider le concept biomimétique proposé dans la partie théorique. Elle vise à tester la validité des concepts théoriques dans la réalité par une expérimentation sur le site étudié. Dans le chapitre 4, nous analyserons les zones climatiques du site en proposant des versions du mur respirant. Chaque version applique des systèmes de refroidissement appropriés à la zone climatique.

Dans le chapitre 5, nous mesurerons l'efficacité de la technique en comparant deux modèles « traditionnel et respirant ». Cette expérimentation sera réalisée dans le Sinaï en utilisant la version du modèle respirant proposé et approprié à la zone climatique.

Cette phase expérimentale est suivie par un dernier chapitre « chapitre 6 » qui conclut et examine les résultats de ce concept. Cette discussion sur les résultats de l'expérimentation sera autour de quatre sujets :

- La logique thermique avec laquelle le modèle testé fonctionne,
- comment il bénéficie de la ventilation naturelle et quels sont les moyens par lesquels l'air se déplace en calculant le débit qui peut être capté par le modèle respirant,
- le type d'ambiance réalisé à l'intérieur du modèle,
- et finalement une comparaison entre le comportement thermique du modèle respirant par rapport à celui du modèle traditionnel, montrant l'efficacité de ce concept au niveau du confort thermique.





# **PARTIE I**

## **APPROCHE THEORIQUE**



## 2. Le confort thermique, la ventilation naturelle et les logiques thermiques utilisées dans les bâtiments existants dans le Sinäi

L'architecture cherche toujours à assurer les besoins physiques et intellectuels humains à travers la réalisation d'un environnement confortable. Mais, ce n'est pas facile de bien définir cet 'environnement confortable' ou le 'confort pour l'être humain'. Il est plus simple d'évaluer le manque de confort que le confort ou de se rendre compte à quel moment on se sent à l'aise sans savoir pourquoi ni dans quelle mesure. C'est parce que la notion de confort dépend de plusieurs critères. La plupart de ces critères sont variables et difficiles à mesurer. Ils dépendent de la situation physique, physiologique et psychologique, ainsi que du temps, de la culture et de la personnalité de chacun.

Pendant le XXème siècle, la notion de confort en général et de confort thermique en particulier a beaucoup évolué. De nombreux scientifiques ont travaillé sur cette notion en créant plusieurs théories qui visent à déterminer les conditions de confort thermique, sonore et lumineux et leurs limites, ce qui améliore certainement les niveaux de confort des usagers dans l'architecture moderne.

Ces théories ont été récemment critiquées à cause de l'homogénéité qu'ils ont fait naître dans tous les espaces contemporains. De nouvelles notions ont ainsi été proposées, telles que l'ambiance thermique et le paysage thermique. Ces notions incitent à concevoir les espaces non comme des espaces homogènes en fixant la température et l'humidité, mais comme des projets de paysage ayant des caractéristiques qui diffèrent d'un point à un autre. Il s'agit de penser à l'ensemble de l'espace comme une atmosphère générale ayant diverses caractéristiques et non comme une zone homogène.

Ce chapitre explore la notion de confort thermique de ces deux côtés, les définitions et les théories traditionnelles du XXème siècle et ses limites des températures et des taux d'humidité confortables, d'un autre côté, l'approche du paysage thermique en essayant d'appliquer ce concept dans nos bâtiments afin d'enrichir la sensation humaine en ajoutant une nouvelle valeur pour la notion du confort thermique.

Dans une deuxième phase, nous nous concentrerons sur la ventilation naturelle comme un élément important pour améliorer le confort des usagers. Elle a un impact direct sur la sensation du confort humain et un impact indirect à travers le refroidissement des constructions. Cette recherche présente ce facteur en précisant son impact sur la sensation du confort thermique. Elle s'intéresse aussi à comprendre comment l'air se déplace naturellement dans nos bâtiments et comment calculer le débit d'air.

Pour terminer, nous analyserons les logiques thermiques utilisées dans l'architecture existante dans le Sinaï. Cette analyse nous montre comment l'architecture de cette région agit avec le problème de l'inconfort thermique. L'architecture vernaculaire présente des exemples et des dispositifs architecturaux tels que la tour à vent et le patio qui bénéficient de la ventilation naturelle pour assurer un niveau de confort thermique acceptable. La tente aussi qui est l'habitat traditionnel des bédouins a sa logique thermique appropriée au climat chaud. Cette analyse vise à comprendre les meilleurs logiques thermiques qui sont appropriées à ce climat. Au contraire, l'architecture contemporaine ignore la conception bioclimatique et préfère les climatisations qui créent des espaces homogènes et mal ventilées. Ces bâtiments contemporains qui sont construit couramment en brique et béton sont pris comme références pour cette thèse. Dans les chapitres suivants, nous allons appliquer les concepts d'adaptation thermique tirés de la nature à ce type de bâtiments en observant le changement du comportement thermique du bâtiment et du niveau du confort thermique obtenus.

## 2.1 Le confort thermique : Définitions et théories

« L'homme manifeste pour son existence des besoins physiques et intellectuels. C'est en les réalisant, par un travail matériel, une satisfaction psychique et esthétique qu'il détermine, les modalités de son confort » [Etournay, 1996, p.7]. Cette satisfaction et ce confort ont toujours été un but à atteindre pour l'être humain. Mais il est toujours difficile de le déterminer en raison de la difficulté à définir précisément ce que recouvre la notion de confort.

Le confort thermique comme d'autres aspects du contrôle de l'environnement, est probablement plus facile à définir qu'à mettre en œuvre. Quand l'ASHREA<sup>1</sup> déclare que la satisfaction thermique est atteinte quand 80% des occupants sont satisfaits [BSR/ASHRAE Standard 55P, 2003, p.30], on comprend à quel point il est difficile d'atteindre le confort thermique pour tous les occupants.

Le confort n'est pas une notion absolue et s'apprécie différemment suivant la société et, pour une même société, suivant les individus. Selon S. Giedion chaque civilisation a sa propre conception du confort, car celui-ci est multiforme et correspond à ce que l'homme juge nécessaire pour se fortifier, se conforter [Etournay, 1996, p. 63]. C'est pourquoi W. Rybczynski affirme qu'il est plus facile d'évaluer le manque de confort que le confort lui-même [Etournay, 1996, p.7]. Selon Hoffmann, la définition la plus classique du confort thermique n'est autre qu'une absence d'inconfort : toute déviation par rapport à l'absence de sensation, à l'oubli des conditions ambiantes, est un élément d'inconfort. Ces difficultés à définir et mesurer le confort, nous conduisent à essayer de comprendre ce mot et son évolution à travers le temps, en commençant par la racine linguistique, l'évolution de sa signification pendant l'histoire et ce jusqu'à aujourd'hui.

Historiquement, la signification du mot « confort » a évolué plusieurs fois à travers le temps. Aujourd'hui, le mot « confort » signifie la satisfaction et le bien-être qu'il soit physique ou psychologique. Mais à l'origine, il n'avait pas ce sens là. Selon le petit Robert [Paul Robert et al, 2003], pendant des siècles et jusqu'au XI<sup>ème</sup> siècle, le mot « confort » a conservé la signification de sa racine latine, conforter, qui signifie renforcer, consolider ou reconforter. Cette signification perdure jusqu'au XV<sup>ème</sup> siècle, où il signifie assistance.

Au XVI<sup>ème</sup> siècle, le mot prend une connotation juridique et désigne un complice, et parallèlement la notion de soutien s'étend aux personnes et aux choses sources de satisfaction : « confortable » est alors synonyme d'acceptable, ou suffisant. Le mot a continué à évoluer, comme dans le cas de l'expression « un revenu confortable », c'est-à-dire substantiel, sans être excessif [Etournay, 1996, p.7].

---

<sup>1</sup> American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

Au XVIIIème siècle, on identifie confort et commodité, le cadre de vie est organisé pour tirer parti au maximum du bien-être physique et de sa satisfaction. Cette conception a conduit à utiliser tous les moyens apportés par l'industrie, les sciences et technologies nouvelles pour améliorer sans cesse nos conditions d'existence.

Aujourd'hui, dans le dictionnaire de l'académie française, le mot « confort » signifie tout ce qui contribue au bien-être, à la commodité de la vie matérielle ou morale, à l'ensemble des commodités qui rendent la vie plus agréable, plus facile mais également le bien-être matériel qui en résulte. Le confort moral devient même la tranquillité de l'esprit, débarrassé de ce qui peut être inquiétant ou pénible.

Le confort est défini comme une sensation de bien-être dans laquelle l'environnement extérieur intervient. Sur le plan visuel, avec les couleurs, les équipements peuvent être visuellement agressifs ou non. Sur le plan du confort thermique, la température ambiante de la pièce où l'individu vit ou travaille peut être plus ou moins agréable. Sur le plan auditif l'ambiance sonore peut être plus ou moins élevée voire agressive. Sur le plan olfactif enfin, où la présence d'odeurs plus ou moins agréables et d'éléments polluants fait partie intégrante de ce qu'on appelle la qualité d'air intérieure.

L'évolution du terme « confort » reflète l'évolution de cette notion à travers l'histoire. Le confort est une notion multiforme et non figée dans le temps. Il possède deux sens principaux, d'une part, la notion de consolider ou renforcer l'homme contre les conditions naturelles extrêmes, et d'autre part, la notion de bien-être par l'amélioration des conditions internes acceptables pour l'être humain.

Historiquement, le premier confort a certainement été la possibilité de disposer d'un endroit clos et couvert. Cela signifie la séparation entre intérieur et extérieur, comme une méthode avec pour vocation de créer une zone isolée et confortable. L'étape suivante a été le recours à une source de chaleur pour améliorer les conditions de vie à l'intérieur. Ensuite, ce fut la construction de murs épais et la création de l'isolation pour éviter la répercussion des variations extrêmes à l'extérieur. D'un autre côté, la création des ouvertures, des fenêtres et de la climatisation ont permis de contrôler le confort visuel et thermique en créant des zones aux caractéristiques confortables à l'intérieur. La recherche du confort s'est toujours effectuée par ces deux méthodes, soit par renforcer la protection contre l'instabilité de la nature, soit pour améliorer les conditions de vie à l'intérieur.

Durant le siècle dernier, l'architecture moderne a choisi une voie pour atteindre le confort : celle de la séparation du milieu naturel externe en créant un environnement artificiel intérieur ayant des caractéristiques confortables pour l'être humain. On s'isole le plus possible de la nature avec le secret espoir de pouvoir l'ignorer. L'homme s'est donc créé une micro-zone confortable avec des caractéristiques précises.

La grande différence entre le bâti ancien et le bâti moderne est que le premier vit avec son environnement selon un équilibre qu'il convient de comprendre et de protéger, alors que le second cherche à s'isoler de son environnement en causant la perte de la nature.

« Nous avons perdu le contact avec les forces organiques qui nous habitent et nous entourent, ce contact est de plus en plus menacé à mesure que s'effrite le lien avec les valeurs humaines fondamentales », [Giendion, 1983, p.24].

Cette tendance à s'isoler de la nature est très claire dans la notion de confort thermique pendant le XXème siècle. Les définitions du confort thermique, ses théories et ses applications dans l'architecture moderne posent un problème. Malgré le bon niveau de confort thermique atteint dans les espaces modernes, ils sont homogènes du point de vue thermique. La partie suivante présente la définition du confort thermique appliquée pendant le XXème siècle afin de prévoir dans quelle direction peut évoluer cette notion dorénavant.

### **2.1.1 Approche du confort thermique pendant le XXème siècle : Les zones du confort thermique**

Le confort thermique reflète la même signification que la notion de confort. L'histoire de l'architecture bioclimatique est une série de conceptions architecturales qui se positionnent quelquefois contre et souvent avec l'environnement. Jusqu'à un passé très récent, elle a répondu à l'idée qu'il faut vivre avec le climat, et parfois d'éviter les extrêmes en s'isolant de l'environnement.

L'architecture traditionnelle a utilisé un grand nombre de solutions d'adaptation climatique afin d'atteindre le confort thermique. Cependant, l'architecture moderne pendant le XXème siècle a développé un autre chemin pour régler les conditions climatiques. Elle cherche à s'isoler de la nature et de ses variations climatiques extrêmes en ignorant l'environnement externe.

Il est important de citer la définition de Givoni du confort thermique qui exprime les deux approches pour atteindre le confort thermique. Selon lui, le confort peut être défini dans un sens négatif, comme l'absence d'inconfort dû à la chaleur ou au froid, ou dans un sens positif comme un état engendrant le bien-être [Eugenie, 1979, p.18-19]. Cette définition a mené à la stabilisation de la notion de confort thermique dans les bâtiments pendant tout le XXème siècle.

D'un côté, le sens positif incite à développer la connaissance du corps humain, l'échange de chaleur entre le corps et l'air ambiant, et de nos besoins physiques, physiologiques et psychologiques, en déterminant des critères clairs pour le confort thermique. Pour B. Givoni, le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort. Cette vision a encouragé

l'amélioration des conditions du confort. D'un autre côté, le sens négatif encourage le développement de techniques d'isolation thermique pour éviter les variations extrêmes à l'extérieur qui causent la sensation d'inconfort.

Les études des échanges thermiques, de l'environnement et du métabolisme ont conduit différents scientifiques à définir des paramètres thermiques significatifs. Ces paramètres visent à créer une ambiance confortable à l'intérieur. Plusieurs théories définissant ces paramètres de confort thermique ont été introduites pendant le XXème siècle, telles que les méthodes des frères Lemaire, d'Olgyay, de Fanger, de Givoni et de Vogt & Miller-Chagas. Toutes ces théories déterminent des limites pour la température, le taux d'humidité, la pression et la vitesse d'air dans lesquelles l'homme se sent confortable.

Le premier diagramme bioclimatique a été mis au point par les frères Olgyay, deux architectes Hongrois, pour intégrer les conditions climatiques dans la conception des bâtiments. Ils se sont installés en 1948 aux Etats-Unis, où ils ont principalement travaillé sur la théorie de l'architecture, principalement dans le domaine de l'architecture bioclimatique.

Le dessin ci-dessous des frères Olgyay a été publié en 1963 dans leur livre « Design with climate » (figure 2.1), où ils montrent une zone où les gens se sentent à l'aise, dans le confort. Il s'agit d'une gamme de température, de taux d'humidité et de vitesse d'air. La méthode suppose que le confort thermique ne peut être estimé à partir du seul paramètre qu'est la température de l'air, mais fait au contraire intervenir plusieurs facteurs telles que l'humidité et la vitesse de l'air [Izard et Guyot, 1979, p.11].

La critique essentielle faite par B. Givoni sur cette méthode est que ses analyses des exigences physiologiques sont basées sur le climat extérieur et non sur l'ambiance attendue à l'intérieur des bâtiments [Izard et Guyot, 1979, p.14]. B. Givoni, dans son livre « L'homme, l'architecture et le climat », a étudié le confort thermique en proposant une méthode se basant sur des études concernant le métabolisme et diverses voies d'échanges thermiques entre le corps et l'environnement.

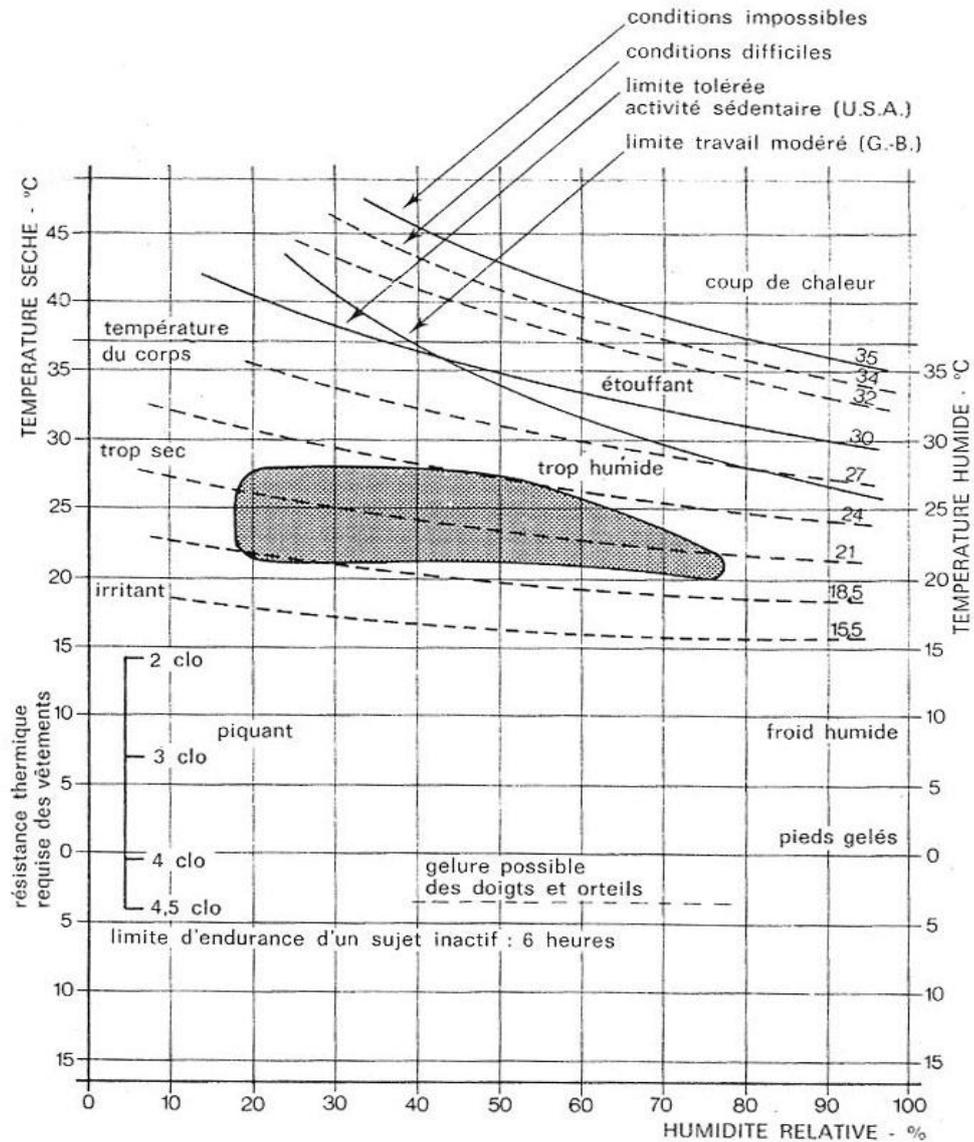


Figure 2.1: Zone de confort introduit par Olgay [Izard et Guyot, 1979, p.10].

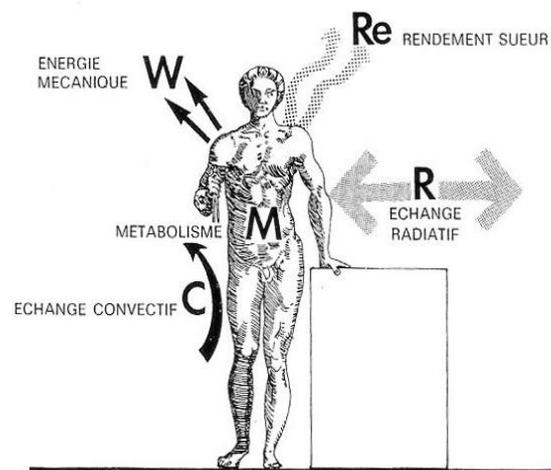


Figure 2.2: Le concept d'échange thermique de Givoni [Izard et Guyot, 1979, p.12].

Parmi les méthodes qui étudient le confort thermique, la méthode de Givoni permet le plus de possibilités (figure 2.2&2.3), en raison du grand nombre d'artifices architecturaux et techniques envisageables dès l'avant-projet. Il a inventé un diagramme enrichissant les limites d'ambiances confortables à travers la distinction entre :

- La zone de confort proprement dit,
- les zones de « conditions supportables » variant avec différents paramètres architecturaux (ventilation, forte inertie, refroidissement par évaporation).

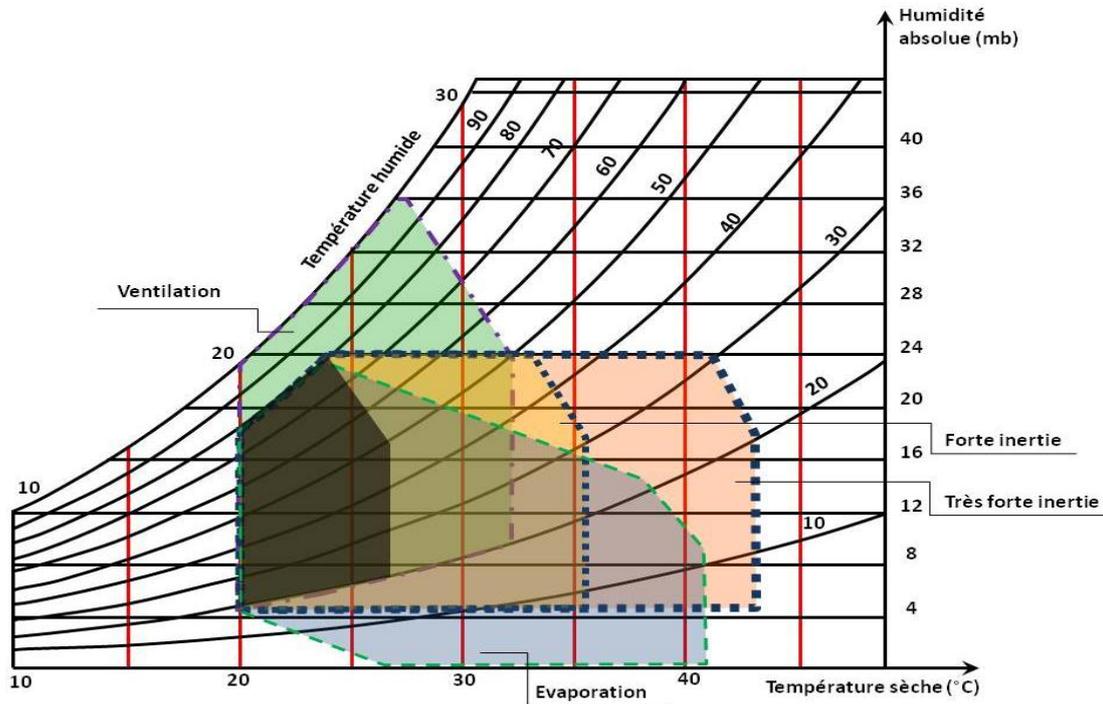


Figure 2.3: Le diagramme psychométrique de Givoni avec ses limites de confort [Izard et Guyot, 1979, p.48-50].

La méthode de Vogt & Miller-Chagas se base sur d'autres études (figure 2.4). A l'image de Givoni, ils donnent sept conditions de base à satisfaire. Ces conditions peuvent être traduites de manière graphique dans une zone de confort qui est circonscrite par cinq limites (polygone de confort).

Deux de ces limites sont fixes (tension de vapeur minimale supérieure à 10 mm Hg, et courbe d'humidité relative ne dépassant pas 80%) et les trois autres sont variables et dépendent du métabolisme, de la tenue vestimentaire et la vitesse d'air intérieur (T. opérative inférieure, T. opérative supérieure et taux d'humidité ambiant) [Izard et Guyot, 1979, p.13].

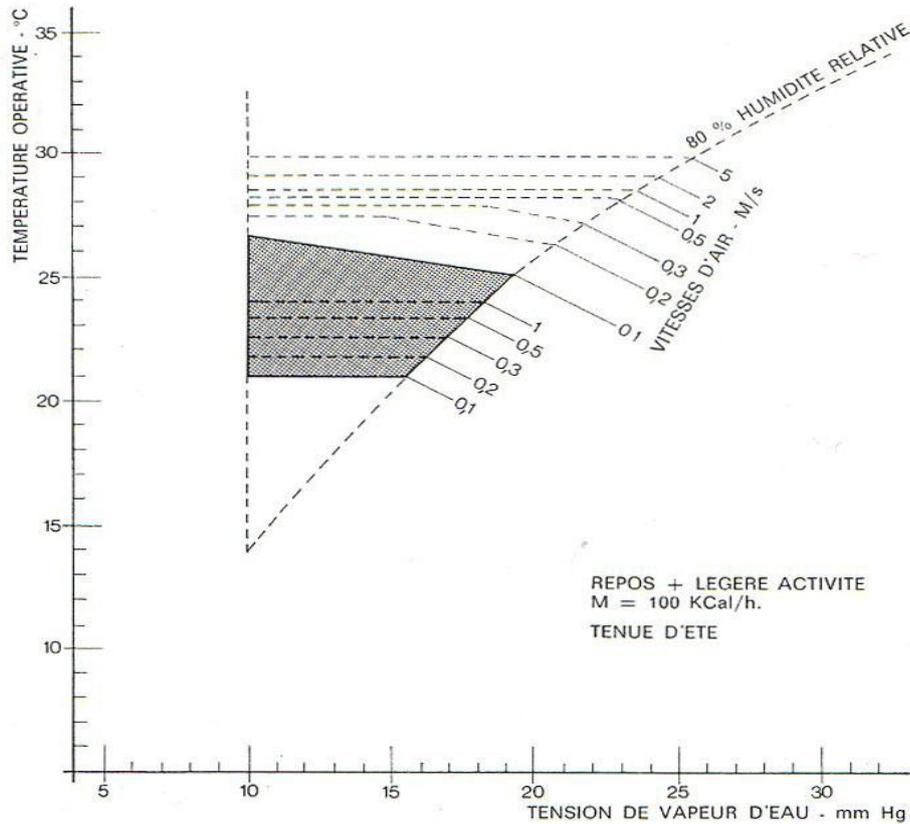


Figure 2.4: Zone de confort introduit par Vogt & Miller-Chagas [Izard et Guyot, 1979, p.14].

Mis à part les méthodes de Fanger, dont le mode de représentation diffère des autres, Olgay, Givoni et Vogt-Miller montre une concentration étroite sur une zone de synthèse. Cette zone s'étend aux températures comprises entre 18°C et 28°C, entre les courbes 20% et 80% d'humidité relative (figure 2.5).

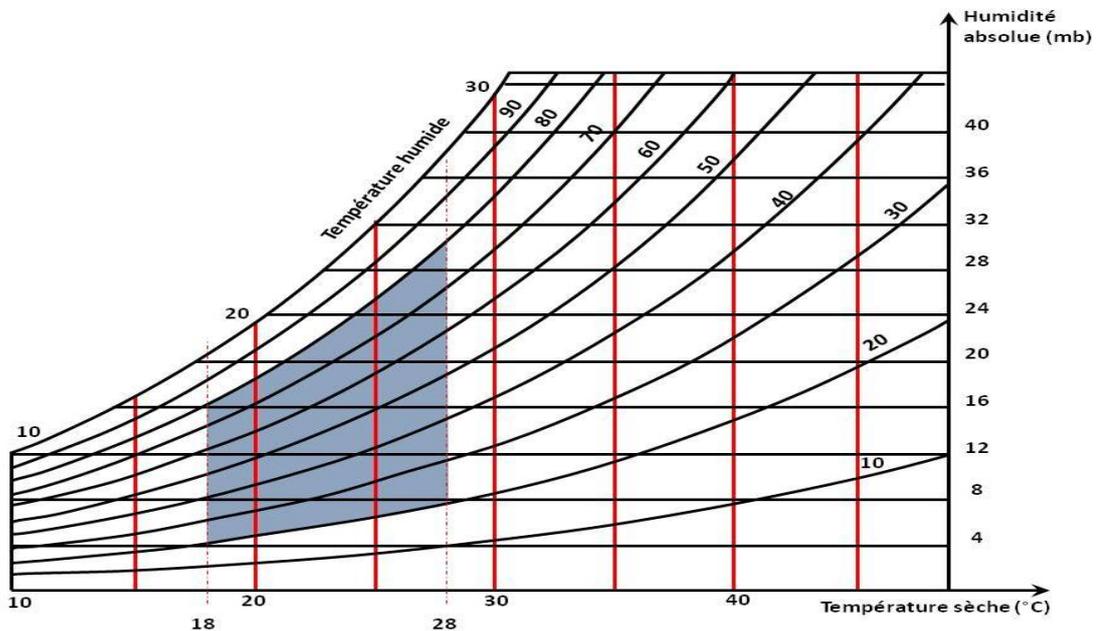


Figure 2.5: Zone de confort selon les méthodes d'Olgay, de Givoni et de Vogt-Miller.

La norme ISO 7730 relative au confort énonce des recommandations qui sont un peu différents de celles obtenues par les théories mentionnées ci-dessus. Ce tableau regroupe les principales recommandations données par la norme. Elle donne des limites plus étroites entre 20°C et 26°C pour la température et entre 30% et 70% pour l'humidité relative [Mansouri, 2003, p.110] [Millet, 1998, P.3].

**Tableau 2.1 :** *Recommandations donnés par la norme ISO 7730 pour les limites du confort thermique [Mansouri, 2003, p.110].*

Activité principalement sédentaire	Conditions hivernales	Conditions estivales
	20°C-24°C	20°C-26°C
Différence verticale de température de l'air entre 1,1 m et 0,1 m au-dessous du sol (niveau de la tête et pied)	<3°C	<3°C
La température de sol (sauf dans le cas de chauffage par le sol t=29°C)	19°C-26°C	
Asymétrie de température de rayonnement (surface verticale)	<10°C	
Asymétrie de température de rayonnement (surface horizontale)	<5°C	
Humidité relative	30-70%	30-70%

### 2.1.2 Réaliser le confort thermique pendant le XX siècle

L'amélioration des conditions de vie est rendue possible par l'évolution des techniques du XXème siècle, qui facilite la création d'applications comme la climatisation et l'isolation des bâtiments. D'autres concepts de l'architecture moderne reflètent la même tendance.

Le Corbusier, dans ses conceptions architecturales, cherche à homogénéiser le chauffage, à normaliser le climat intérieur en élaborant des concepts tels que le mur neutralisant, la respiration exacte. L'impossibilité à régler les températures internes suivant les saisons était un problème technique bien connu. Le Corbusier a cherché à le résoudre à travers ces nouveaux concepts.

La "respiration exacte" est ce qu'on appelle aujourd'hui "ventilation mécanique contrôlée". Le "mur neutralisant" est basé sur une technique de chauffage utilisée depuis la fin du XIXème siècle dans des bureaux et dans les maisons de maître avec de grandes baies vitrées. La technique est composée d'un radiateur placé entre les menuiseries d'une fenêtre double afin d'éviter la paroi froide et la condensation sur le verre. A l'époque, la technique est déjà développée pour les auditoriums, mais jamais pour des habitations [Rahm, 2009, p.12].

Le Corbusier voyait cette technique non seulement comme un système de chauffage mais également comme un système de climatisation : il fallait simplement envoyer de l'air chaud dans l'espace entre les deux parois de verre en hiver, et de l'air froid en été [Outilssolaires, 2010]<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Voir (<http://outilssolaires.blog.ca/2010/05/11/lvn6-le-corbusier-et-l-esprit-nouveau-8562445/>)

De son côté, Frank Lloyd Wright est le premier à mettre en œuvre des planchers chauffants qui génèrent un climat intérieur parfaitement équilibré, normalisé et silencieux. Le système vise à diriger et contrôler la chaleur et le rafraîchissement à l'intérieur du bâtiment pour atteindre une moyenne tempérée de confort. Il recherche aussi à homogénéiser la température, à normaliser le climat intérieur et élabore les concepts éloquents de « murs neutralisant » et de « respiration exacte » [Rahm, 2009, p.12].

Aujourd'hui, les bâtiments modernes et contemporains préfèrent les solutions mécaniques de refroidissement et de chauffage telles que les climatisations afin d'assurer le confort thermique demandé. Toutes les applications du confort thermique du XX<sup>ème</sup> siècle incitent à créer des zones homogènes ayant certaines caractéristiques fixes tels que la température, le taux d'humidité, la vitesse d'air, etc. A l'intérieur de ces limites, l'être humain ressent le confort thermique.

### 2.1.3 Vers une approche contemporaine du déséquilibre thermique

« Les qualités thermiques pourraient être également prises en compte par l'architecte lors de la phase initiale de conception et pourraient influencer toutes les étapes de conception. Au lieu de cela, les conditions thermiques sont généralement standardisées par l'utilisation de systèmes mécaniques modernes qui peuvent être prescrits, installés, et dont le fonctionnement est prévu indépendamment de la conception globale du projet » [Heschong, 1979, p.7].

Suivant l'approche du XX<sup>ème</sup> siècle qui dépend de la prédétermination des conditions thermiques afin d'avoir des espaces confortables, et de la volonté d'économiser les ressources énergétiques, l'exigence est d'installer, selon la fonction de la pièce, une puissance thermique précisément calculée afin de ne dépenser en énergie que ce qui est strictement nécessaire. Par conséquent, les normes de construction de quelques pays donnent des valeurs indicatives de la température ambiante pour chaque pièce de la maison (figure 2.6). Ces températures recommandées sont bien évidemment relatives à l'habillement et à l'activité, entre la nudité de la salle de bain, la protection thermique des couvertures, les vêtements légers que l'on porte dans le séjour.

Cette tendance a banalisé le climat de l'espace intérieur produisant des espaces homogènes où la température est normalisée autour de 22 °C avec un taux d'humidité relatif de l'air autour de 50%. Cette approche qui suppose un environnement thermique stable admet que tous les niveaux de stress thermique sont indésirables. Malgré l'effort physiologique supplémentaire que requiert l'adaptation aux stimuli thermiques, les gens semblent encore nettement apprécier les différences de température [Heschong, 1979, p.40]. Philippe Rahm, un architecte suisse qui travaille sur l'architecture météorologique, a critiqué la tendance de normaliser la température en portraiturant l'espace intérieur comme une sorte de bain d'air

chaud autour de notre corps, contre notre corps et à l'intérieur du corps à chaque respiration [Rahm, 2009, p.16].



Figure 2.6: L'approche moderne du confort thermique est de créer des espaces homogènes, chaque espace à une température fixe.

Température de l'air	22°C
Humidité relative	50%
Intensité lumineuse	2000 lux

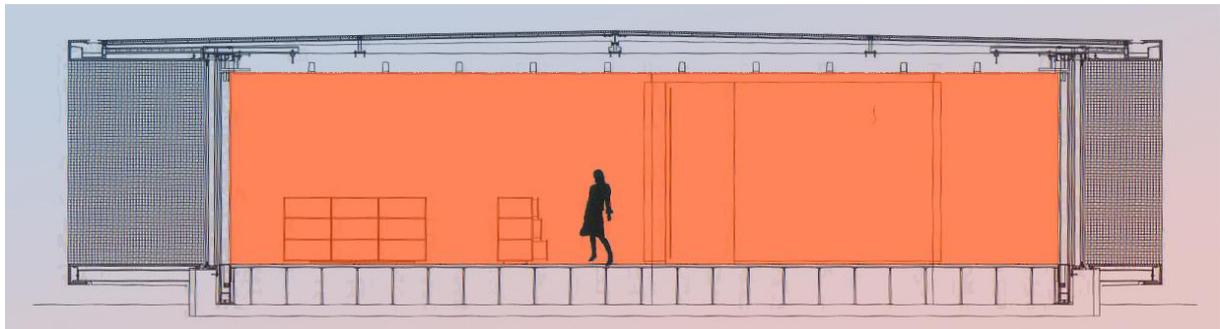


Figure 2.7: L'espace intérieur devient une sorte de bain d'air chaud autour de notre corps, contre notre corps et à l'intérieur du corps à chaque respiration.

« L'équilibre ne permet pas la production d'énergie, il annihile irrémédiablement toute possibilité de mouvement et conduit à la mort. L'équilibre équivaut à la mort, tandis que le déséquilibre ouvre à la vie. Sans asymétrie, il n'y aurait rien excepté la mort et le vide », [Rahm, 2009, p.13]

Rahm affirme que, à la fin du XXème siècle, l'asymétrie dans l'architecture visible se développe et se théorise jusqu'à se substituer dans l'esthétique à la place autrefois réservée à

la symétrie. Nous pouvons facilement voir l'émergence de bâtiments extraordinairement déséquilibrés visuellement, c'est au contraire un appauvrissement de la diversité climatique qui s'est développé vers l'équilibre thermique et la normalisation. Il voit que les nouvelles techniques de chauffage, de ventilation, l'isolation extérieure ou l'air conditionné, ont banalisé les températures et les climats intérieurs. La symétrie, pour lui, n'est pas un signe de l'ordre sous-jacent, mais une indication d'un manque d'ordre en raison d'une absence d'interaction avec des forces plus importantes et l'environnement extérieur, tandis que l'asymétrie est une règle de beauté. Il affirme que l'asymétrie de l'environnement thermique rend les expériences plus riches et enrichi la sensation humaine [Rahm, 2009, p.14-15]. Ses projets d'architecture, présentés plus loin, se fondent sur un déséquilibre thermique et une asymétrie climatique. Il propose de transformer l'intérieur de la maison en une atmosphère vivante avec des variations climatiques où l'architecture devient météorologie.

### 2.1.3.1 Diversité de température : Paysage thermique ou « Gulf stream »

Plusieurs projets architecturaux montrent ces nouvelles idées en créant des variations climatiques dans l'espace intérieur. Le phénomène thermodynamique du Gulf Stream est l'un des modèles les plus fascinants aujourd'hui pour penser l'architecture. Il permet d'échapper à la normalisation et à l'homogénéisation de l'espace moderne. Ce phénomène climatique est généré par la polarisation dans l'espace de deux sources thermiques différentes : une source froide et une source chaude. Cette polarisation thermique provoque dans l'espace un mouvement convectif de l'air qui dessine un paysage thermique invisible [Rahm, 2009, p.18].

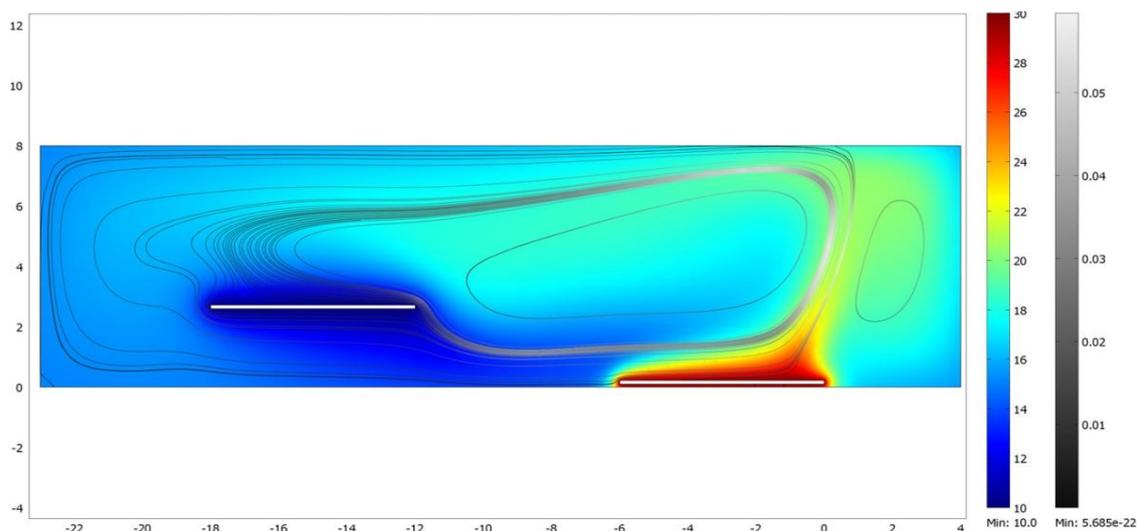


Figure 2.8: Le concept de Gulf Stream [Rahm, En ligne]<sup>3</sup>

Au lieu de séparer spatialement chaque pièce et de les chauffer chacune spécifiquement à une température précise, Rahm a proposé de penser l'ensemble de la maison comme une atmosphère globale (figure 2.9).

<sup>3</sup> voir (<http://www.philipperahm.com/data/projects/digestiblegulfstream/index.html>)

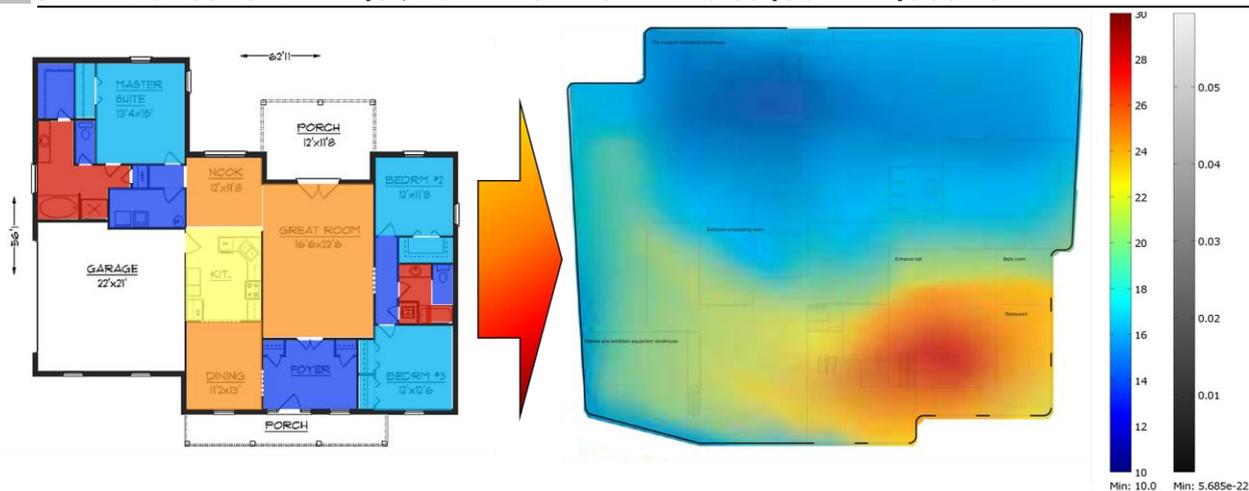


Figure 2.9: Concevoir l'espace comme une atmosphère globale, un déséquilibre de l'invisible, et un paysage thermique au lieu de la zone de confort Stream<sup>4</sup>

Dans le processus du projet d'architecture « maison et atelier de Dominique Gonzalez-Foerster », Rahm a disposé dans le volume de la maison deux sources de chaleur différentes, l'une à 15 °C en partie haute et l'autre à 22°C en partie basse (figure 2.10). Ces deux pôles thermiques produisent une tension thermodynamique dans l'ensemble de la maison. À la manière d'un Gulf Stream miniature, leur position asymétrique génère un mouvement d'air créant un flux thermique continu dessinant un paysage invisible [Rahm, En ligne]<sup>5</sup>.

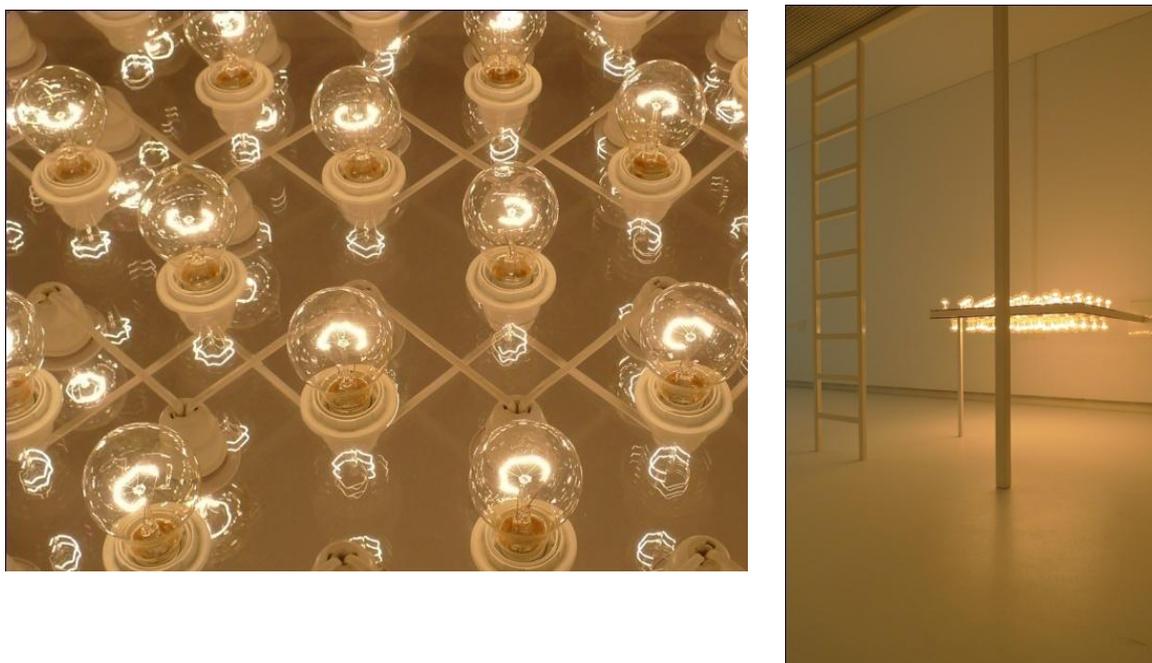


Figure 2.10: La source chaude à 22°C, la maison et atelier de Dominique Gonzalez-Foerster, conçu par Philippe Rahm [Rahm, En ligne]<sup>6</sup>.

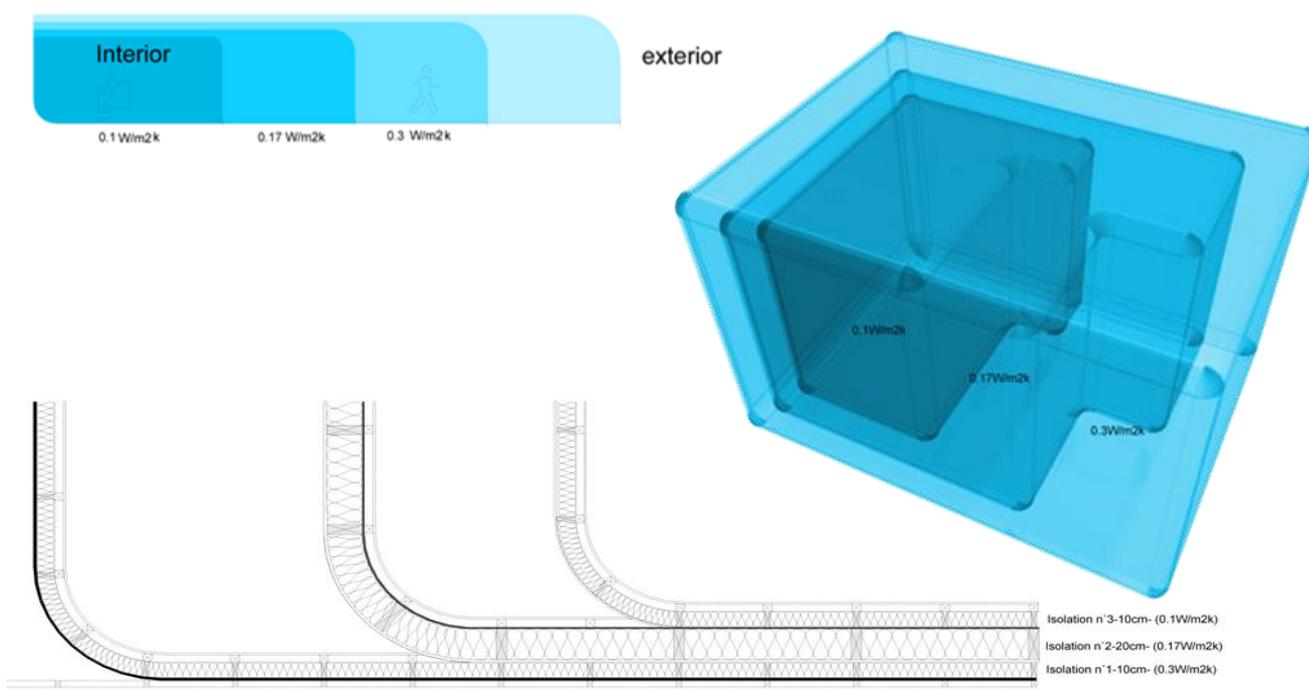
<sup>4</sup> voir (<http://www.philipperahm.com/data/projects/convectivemuseum/index.html>)

<sup>5</sup> voir (<http://www.philipperahm.com/data/projects/interiorgulfstream/index.html>)

<sup>6</sup> voir (<http://www.philipperahm.com/data/projects/domesticastronomy/index.html>)

### 2.1.3.2 Diversité de résistance thermique

Dans un autre projet, une école primaire en Suisse, l'isolation thermique se stratifie comme un oignon en fonction des températures exigées en relation avec l'activité que l'on y a. Il rend visibles et sensibles les différentes couches d'isolation thermique dans lesquels on pénètre physiquement, on s'infiltrer littéralement, se faufile, se glisse et que l'on élargit ensuite, que l'on dilate, évase pour y placer des pièces en fonction des températures. Les couches fonctionnent réellement comme des tampons thermiques participant à l'isolation du bâtiment. Il s'agit d'une succession de couches lesquelles, l'une après l'autre, filtrent progressivement une certaine quantité de température et de lumière et font passer de l'extérieur à l'intérieur sans que l'on sache exactement quand.



**Figure 2.11:** Différents couches d'isolation thermique créent des espaces avec une diversité des températures [Rahm, En ligne]<sup>7</sup>.

Ce projet se définit ainsi en une série de couches d'isolation (figure 2.11) qui réduisent progressivement le coefficient de transmission thermique U, passant de 0,3w/m<sup>2</sup>.k dans la première strate à 0,1 dans la troisième strate. Plus sensible aux variations extérieures, la première strate, en périphérie du bâtiment est celle où l'on passe le moins de temps. Elle contient les WC et les locaux techniques. La seconde couche, un peu plus à l'intérieur, et plus isolée, accueille les espaces intermédiaires, comme les circulations. Dans la dernière strate, la plus intérieure, protégée par 40 cm d'isolation, logent les salles de classe et offre un confort maximum pour les enfants avec un coefficient thermique de 0,1.

<sup>7</sup> voir (<http://www.philipperahm.com/data/projects/thermalconductivity2/index.html>)

### 2.1.3.3 Diversité de taux d'humidité

Un autre projet, appelé « appartement de vapeur », vise à composer le plan de l'appartement selon la cartographie de l'humidité à l'intérieur afin de créer une relation plus sensorielle de l'espace avec l'utilisateur. Cette solution spatiale réintroduit une diversité de zones climatiques dans l'appartement moderne, car il sera sec dans une zone et plus humide dans une autre. Au lieu de simplement répondre avec une solution technique au problème de l'humidité de l'air, l'architecte transforme ce problème en un avantage et crée un paysage sensoriel. L'appartement sera plus proche d'un paysage naturel, avec une sorte de variation des latitudes de l'humidité relative. L'appartement devient une géographie intérieure entre un endroit sec à 30% d'humidité relative et une zone humide à 90% d'humidité relative où les habitants peuvent se promener librement (figure 2.12).

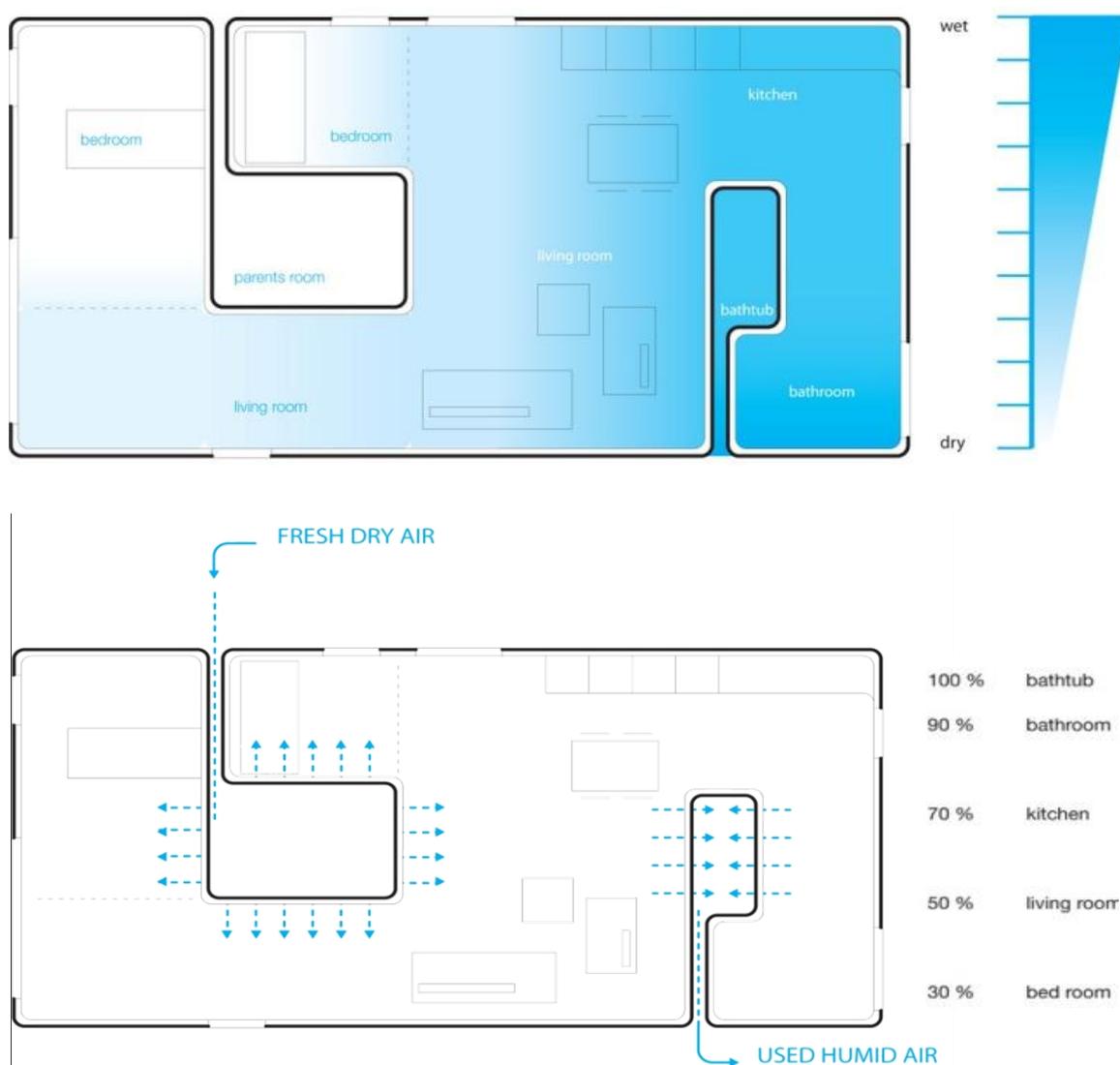


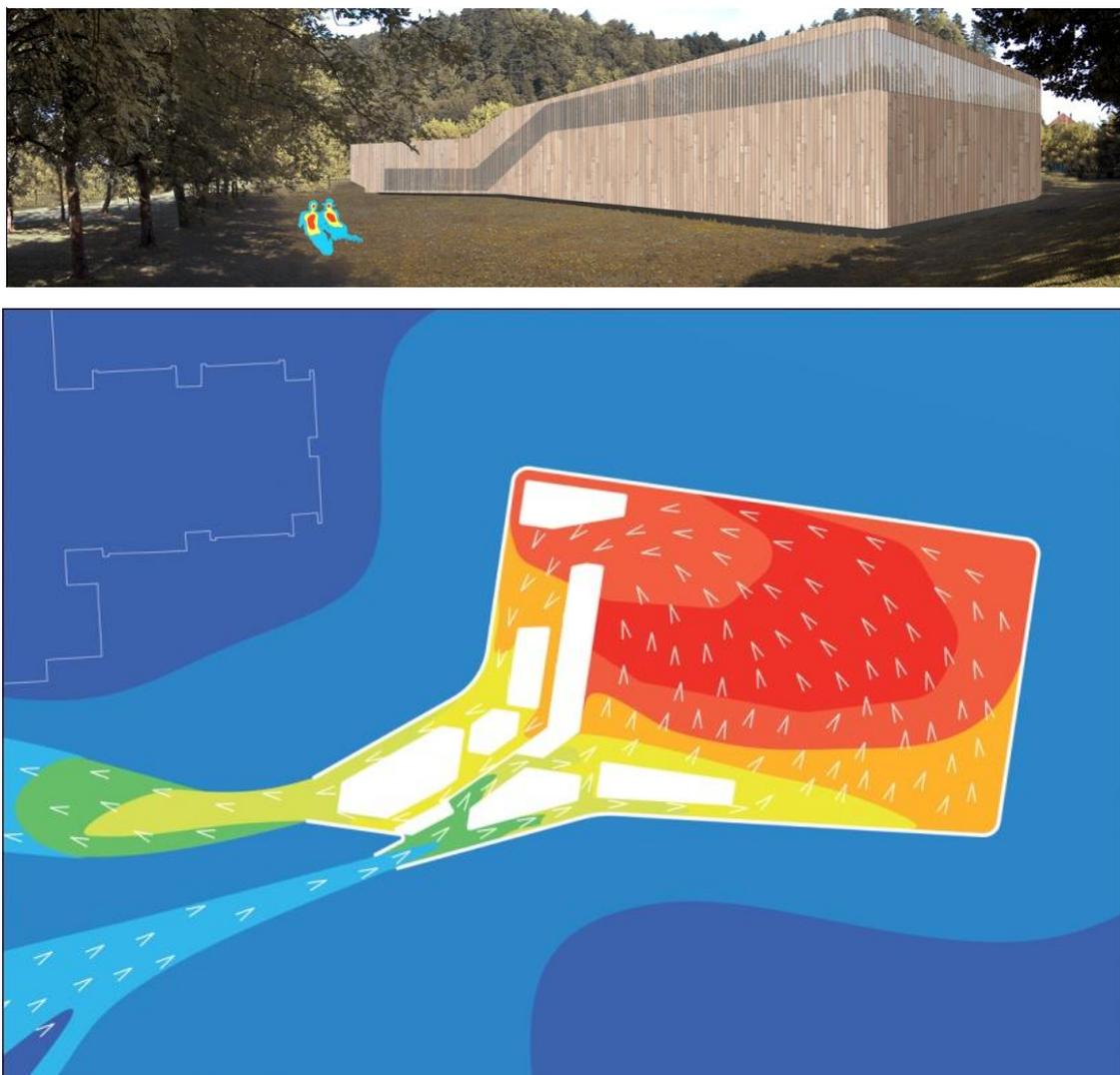
Figure 2.12: Diversité de taux d'humidité, IBA, Hambourg, Allemagne [Rahm, En ligne]<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> voir (<http://www.philipperahm.com/data/projects/vaporapartments/index.html>)

La conception de ce bâtiment est basée sur le flux de vapeur dans toute la maison. Un léger courant d'air s'écoule dans l'ensemble du bâtiment, à partir de la zone la plus sèche, la chambre, et devient toujours plus humide jusqu'à la salle de bains. Cet itinéraire est déterminé par l'utilisation de l'espace et la vapeur produite par le corps en relation avec l'activité physique qui y est pratiquée.

#### 2.1.3.4 Diversité de vitesse de l'air : Vent intérieur

Pour un concours en Slovénie en 2009, un projet de salle de sports est placé dans le site comme un objet en bois qui permet de capter les vents dominants. Il saisit le flux d'air chaud d'un côté et le rejette de l'autre. La salle de sport force le mouvement naturel du vent à une légère inflexion. Techniquement, ce bâtiment parfaitement isolé utilise un système de ventilation double flux, qui réchauffe l'air entrant avec la chaleur de l'air d'échappement, par un échange entre les grandes surfaces de métal conducteur (figure 2.13).



**Figure 2.13:** Un système de ventilation double flux en créant de variation de vitesse d'air dans une salle de sports, Slovénie en 2009 Rahm, En ligne]<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> voir (<http://www.philipperahm.com/data/projects/windtrap/index.html>)

Le projet élargit la surface d'échanges du double flux pour augmenter le rendement du système, qui passe ainsi de la taille d'une machine à la taille de l'ensemble du bâtiment. Ainsi, toutes les chambres du bâtiment participent à l'échange de chaleur, selon les températures recommandées pour les fonctions : de la plus chaude à 22°C pour les douches et les vestiaires, à la plus froide à 12°C pour la salle de stockage. Les toilettes et les corridors forment une frontière étanche entre l'air frais entrant et l'air chaud. L'échange de chaleur sur les parois métalliques a lieu entre la partie plus chaude au nord de l'édifice et celle plus froide au sud. Ce système d'échange de chaleur permet de créer une variation de température et de vitesse de l'air à l'intérieur selon les besoins des usagers.

Les projets précédents introduisent une nouvelle dimension par la variation des caractères climatiques dans un même espace et enrichit ainsi les sensations des usagers. Cette variation peut toucher toutes les caractéristiques climatiques telles que la température, le taux d'humidité, la vitesse, la direction et la vitesse de l'air, etc.

Contrairement à l'espace du XXème siècle qui est homogène et constant au point de vue thermique, l'espace dans cette nouvelle approche est complexe, variable et diversifié, ayant différentes zones et différents moments climatiques. Ces variations offrent une grande richesse de phénomènes et de sensations à l'intérieur, avec d'intéressants renversements d'échelle et de dissociations des sens dans les réponses apportées aux problèmes de rafraîchissement ou de chauffage.

En appliquant cette approche pour la ventilation, nous créons une nouvelle dimension pour le confort humain. L'air est normalement quasi immobile dans les maisons modernes. Pas de vents, pas de tornades à l'intérieur des immeubles, mais des masses d'air qui stagnent, se déplacent à peine mollement d'une pièce à l'autre. Lourdemment, lentement, elles se chargent peu à peu du CO<sub>2</sub>, de l'humidité, des exhalaisons que notre organisme rejette en habitant. Dehors, l'air est en mouvement, s'agite irrégulièrement, se déchaîne et se calme.

Cette variation peut être considérée comme un nouvel élément du confort thermique dans l'espace d'aujourd'hui. Ce déséquilibre thermique et cette asymétrie climatique enrichissent le spectre des sensations à l'intérieur du bâtiment contemporain. L'objectif de l'architecture météorologique est d'avoir des variations des conditions climatiques dans les limites proposées par les théories du XXème siècle.

## 2.2 Ventilation naturelle et son rôle pour atteindre le confort thermique

Dans la partie précédente, nous avons présenté la notion du confort thermique et comment elle a été introduite par les théories du siècle dernier. Ces théories varient entre l'approche traditionnelle du XX<sup>ème</sup> siècle et l'approche contemporaine du « déséquilibre ou paysage thermique ». Dans ces deux approches, la ventilation joue un rôle majeur pour améliorer la sensation du confort thermique. Dans les théories du XX<sup>ème</sup> siècle, la ventilation a été introduite comme un facteur qui a un impact sur la sensation du confort thermique. Dans l'approche contemporaine du déséquilibre dans l'invisible, la ventilation est devenue un élément météorologique qui peut créer des ambiances dynamiques ayant des variations de vitesse d'air. Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur la ventilation et son rôle pour atteindre le confort thermique, ainsi que les moyens par lesquels l'air se déplace naturellement dans nos bâtiments.

Dans la littérature, la ventilation est l'action qui consiste à créer un renouvellement de l'air, par déplacement dans un lieu clos. Elle peut améliorer la qualité de l'air intérieur en évitant des créer des espaces mal ventilées. Par la ventilation, nous pouvons aussi économiser des quantités substantielles d'énergie en diminuant ou en éliminant le besoin de refroidissement mécanique. Les bâtiments ayant des systèmes de ventilation naturelle bien conçus fournissent très souvent un environnement confortable et agréable pour les occupants.

En été, la ventilation n'est pas un problème de renouvellement d'air comme en hiver, mais c'est aussi un moyen pour améliorer le niveau de confort. La ventilation a un impact direct sur la sensation du confort thermique des occupants et un impact indirect par le refroidissement. D'un côté, mettre l'air en mouvement donne une sensation de fraîcheur parce que la vitesse de l'air intérieur permet de tolérer une température plus élevée. D'un autre côté, la ventilation accélère le refroidissement des parois intérieures des constructions et simultanément, tend à diminuer la température radiante moyenne intérieure.

### 2.2.1 Impact de la ventilation sur la zone de confort thermique

La ventilation a un impact direct sur la sensation du confort thermique. Le mouvement d'air donne pour l'être vivant à sang chaud une sensation d'une température inférieure que la température actuelle. Elle est toujours inférieure à la température de l'air au cas où la température de l'air est inférieure à la température de notre corps. Cette sensation qui désigne la sensation de froid induite par le vent sur un organisme est nommée « le refroidissement éolien », parfois aussi appelé « facteur vent » dans le langage populaire (*windchill temperature* or *windchill concept* dans la langue anglo-saxonne) [Heidorn, 2002]<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> voir (<http://www.islandnet.com/~see/weather/history/siple.htm>)

Le métabolisme interne d'un homme ou d'un animal produit une chaleur qui chauffe l'air autour la surface de sa peau. En temps normal, seule la convection enlève cet air réchauffé. Cependant, exposé au vent, le corps perd cette couche protectrice et amène en permanence l'air à température ambiante au contact de la peau alors que le corps essaie de remplacer la couche chaude. Ce mécanisme intervient lorsque la température de l'air est inférieure à la température d'équilibre thermique. De plus, lorsque la température est suffisamment élevée, l'eau, notamment la transpiration, s'évapore et crée une zone d'air humide autour de la personne. Le mouvement d'air chasse également cet air humidifié et apporte de l'air plus sec, favorisant ainsi l'évaporation donc le refroidissement.

L'étude de la ventilation naturelle et son influence sur la sensation de confort thermique nous montre que l'augmentation de la vitesse d'air permet pour l'être humain de tolérer une température et un taux d'humidité plus élevés. Aucun mouvement d'air minimum n'est nécessaire pour assurer le confort thermique lorsque les températures se situent dans la zone de confort. La température opératoire peut, par contre, être augmentée jusqu'à 3°C au-dessus de la zone de confort si la vitesse de l'air est accrue au-dessus de 0,2 m/s [Charbonneau et al, 2004, p.10]<sup>11</sup>. Selon une étude plus détaillée de l'influence de la ventilation sur la zone de confort, elle a précisé une température maximale de 32,5°C jusqu'à une humidité de 24 m bars. Ensuite, elle décroît jusqu'à 28°C pour une humidité de 36 m bars. Aux époques d'inconfort maximum, plus la vitesse de l'air intérieur sera élevée, meilleures seront les conditions d'habitabilité [Dreyfus, 1960, p. 150]. Selon J.L.Izard, une vitesse d'air de 1m/s peut-être traduit par un gain en température ressentie de 3 à 4°C par rapport à un air calme [Etournay, 1996, p. 85], tandis que pour des températures supérieures à 37°C, une vitesse élevée de l'air serait défavorable [Dreyfus, 1960, p. 38].

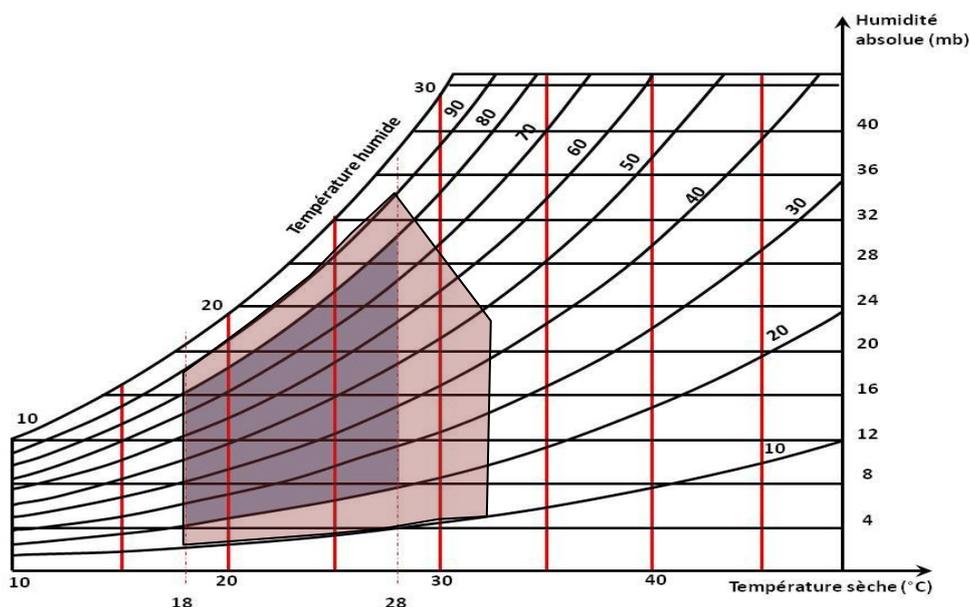


Figure 2.14: Zone d'influence de la ventilation sur la sensation de confort thermique

## 2.2.2 Refroidissement de la structure par la ventilation

Par la ventilation, nous pouvons aussi refroidir les parois de la construction. Il faut que l'air traversant la construction soit le plus froid possible. Nous savons, en effet, que les échanges par convection entre une paroi et l'air ambiant sont pratiquement proportionnels à l'écart de température entre la surface de la paroi et l'air. Si la température extérieure est supérieure à la température intérieure, il ne sert à rien d'ouvrir des fenêtres. En effet, il vaut mieux empêcher l'entrée de l'air extérieur pendant la journée et créer des conditions nécessaires pour renforcer la ventilation naturelle nocturne.

La ventilation pour le confort d'été est d'autant plus efficace quand la masse du bâtiment est importante. Et seule une approche thermique dynamique peut rendre compte de l'effet de la ventilation sur la température intérieure. L'inertie thermique est complémentaire de la ventilation, et indispensable pour que celle-ci soit efficace, mais encore faut-il rafraîchir cette masse. Il faut pour cela réunir trois conditions [Molle, 2006, p.2]<sup>12</sup>:

1. Un écart de température élevé entre  $T_{int}$  et  $T_{ext}$ . Le potentiel de la ventilation nocturne est plus important quand les nuits sont fraîches. C'est le cas des climats continentaux, par opposition aux climats maritimes.
2. Une surface d'échange importante entre l'air et la masse à rafraîchir. Il vaut mieux plusieurs murs moyennement épais qu'un seul mur très épais.
3. Une vitesse d'air élevée au contact des masses. C'est difficile en pratique, mais il faut au moins permettre à l'air de lécher les parois. C'est l'intérêt des structures creuses dans lesquelles l'air peut circuler, ou plus simplement des faux plafonds « ouverts » au dessus desquels l'air peut circuler.

<sup>12</sup> voir (<http://www.etamine.coop/upload/18377115034abb34e7bbb7a.pdf>)

Afin de baisser la température intérieure pendant la nuit, il faut renouveler la totalité de l'air de 4 à 8 fois par heure. Un taux de renouvellement aussi élevé ne peut être obtenu que si la vitesse de l'air intérieur est de l'ordre de 0,50 m/s ou plus, au moins dans certains points du local [Dreyfus, 1960, p. 152].

Un calcul en régime permanent montre qu'il faut une ventilation de l'ordre de 30 vol/h pour maintenir la température intérieure 2°C au dessus de la température extérieure lorsque les apports thermiques sont de 60 W/m<sup>2</sup>. C'est un renouvellement d'air très important qu'on ne peut obtenir que toutes fenêtres grandes ouvertes et avec du vent. De fait, un rafraîchissement significatif peut être obtenu avec des débits largement plus faibles de l'ordre de 2 vol/h dans un très grand volume (atrium, halle...), de l'ordre de 4 à 6 vol/h dans des espaces intermédiaires (classe, restaurant...), et de 4 à 8 vol/h dans des pièces ou des logements [Molle, 2006, p.2].

### 2.2.3 Mouvement de l'air

Lorsque la ventilation se fait en l'absence de tout dispositif mécanique, nous parlons de ventilation naturelle. Les systèmes de ventilation naturelle s'appuient sur les forces motrices naturelles, telles que le vent et la différence de température ou de pression entre deux zones. Il y a deux types de ventilation naturelle pour ventiler les bâtiments: la ventilation transversale par le vent et la ventilation sous l'effet de cheminée.

#### 2.2.3.1 Effet du vent (ventilation transversale)

Pour qu'une construction soit ventilée, il ne suffit pas qu'elle soit exposée au vent, il faut que le vent puisse la traverser. C'est pourquoi nous parlons de ventilation transversale.

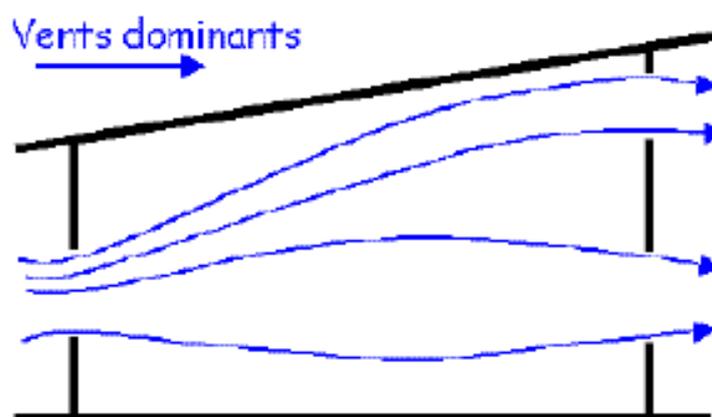


Figure 2.15: L'effet du vent (Ventilation transversale) [Dreyfus, 1960, p. 164].

Ce type de ventilation dépend de deux facteurs: la disponibilité du vent et la direction du vent. Par conséquent, il est une source peu fiable pour fournir un flux d'air et ainsi un confort thermique. La ventilation sous l'effet du vent est due essentiellement à l'existence d'une zone de hautes pressions et d'une zone de basses pressions, en avant et en arrière des constructions.

Les principaux facteurs influant la ventilation par le vent comprennent:

- la vitesse moyenne du vent,
- la direction des vents dominants,
- les variations saisonnières et quotidiennes de la vitesse et de la direction du vent,
- les objets obstructifs tels que les bâtiments voisins et les arbres,
- la position et les caractéristiques des ouvertures par lesquelles l'air circule.

Les systèmes de ventilation naturelle sont souvent conçus pour des vitesses de vent de la moitié de la vitesse moyenne saisonnière, car à partir de l'analyse climatique, il y a très peu d'endroits où la vitesse du vent est inférieure à la moitié de la vitesse moyenne pendant de nombreuses heures dans une année.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer le débit d'air qui circule à cause de cet effet telles que la méthode ASHRAE, la méthode ANSLEY, la méthode GIDDS ET PHAFF, et la méthode anglaise. Cette dernière qui est la méthode la plus simplifiée permet de calculer les débits d'air pour une zone avec une ventilation unilatérale ou une ventilation transversale. L'équation suivante montre le débit d'air par l'ouverture d'entrée de la ventilation forcée par le vent: [Mansouri, 2003, p.146] [Hui, En ligne]<sup>13</sup> [ASHRAE, 2009].

Où :

$$Q = C_v \cdot A \cdot v$$

Q = débit d'air (m<sup>3</sup> / s)

A = surface des ouvertures d'entrée (m<sup>2</sup>)

v = vitesse du vent (m / s)

C<sub>v</sub> = efficacité des ouvertures (supposé être de 0,5 à 0,6 pour les vents perpendiculaires et de 0,25 à 0,36 pour les vents de diagonale).

L'air a une certaine inertie. Il en résulte que les filets d'air entrant dans une construction ont tendance à garder la direction qui leur est donnée par la répartition des pressions et par la forme des orifices d'entrée. La direction des filets d'air entrant dans la construction dépend à la fois de la répartition des pressions sur la façade antérieure et de la forme de l'orifice d'entrée. En même temps, la vitesse de l'air sera à son maximum si l'air peut traverser la construction sans qu'il y ait un changement brusque de la direction des filets d'air. La vitesse sera également plus élevée si les orifices de sortie ont une surface totale égale à une fois et demie celle des orifices d'entrée [Dreyfus, 1960, p. 157-161].

<sup>13</sup> voir (<http://www.arch.hku.hk/teaching/lectures/airvent/sect03.htm>)

### 2.2.3.2 Effet de cheminée

L'effet de cheminée ou le tirage thermique a lieu lorsqu'une différence de température engendre une différence de densité de l'air entre l'air chaud et l'air froid ou entre l'entrée et la sortie du conduit. Quand il y a une différence de température entre deux volumes voisins, l'air chaud aura une faible densité, sera plus dynamique, s'élèvera au-dessus de l'air froid et créera un flux d'air vers le haut. Cet effet est accentué par une plus grande hauteur de cheminée.

Pour ventiler un bâtiment de façon adéquate par l'effet de cheminée, la température à l'intérieur et à l'extérieur doivent être différentes de sorte que l'air chaud monte et s'échappe par le haut, tandis que l'air froid, le plus dense de l'extérieur, pénètre dans le bâtiment par les ouvertures de niveau inférieur. L'effet de cheminée augmente avec une plus grande différence de température et une différence de hauteur entre les ouvertures supérieures et inférieures. L'effet de cheminée a plusieurs avantages importants:

- il ne compte pas s'il y a du vent et peut avoir lieu pendant les journées calmes et chaudes.
- il fournit un débit d'air stable (par rapport au vent)
- il fournit plus de contrôle pour l'entrée d'air
- il constitue une méthode durable

Pour les bâtiments à un ou deux niveaux,  $h$  est la hauteur du bâtiment. Pour les bâtiments de grande hauteur à plusieurs niveaux,  $h$  est la distance des ouvertures situées au niveau de pression neutre (neutral pressure level, NPL) à une extrémité (soit le sommet, soit la base).

Le débit d'air déplacé par tirage thermique s'exprime par l'équation suivante: [Hui, En ligne]<sup>14</sup> [ASHRAE, 2009].

$$Q = C S \sqrt{2 g h \frac{T_i - T_o}{T_i}}$$

Où :

$Q$  = débit d'air déplacé par tirage thermique,  $m^3/s$

$S$  = surface du flux,  $m^2$

$C$  = coefficient de décharge (ordinairement de 0.65 à 0.70)

$g$  = accélération de la pesanteur,  $9.81 m/s^2$

$h$  = hauteur ou distance,  $m$

$T_o$  = température extérieure, en  $K$

$T_i$  = température intérieure, en  $K$

Pendant le calme, l'effet de cheminée peut contribuer efficacement au renouvellement d'air dans une construction. Pour une chambre de surface de  $20 m^2$  avec une hauteur moyenne sous plafond de  $3 m$  et une surface des ouvertures de  $4 m^2$ , on aura  $1500 m^3/h$ , c'est-à-dire que l'air dans le local se renouvellera 25 fois par heure. Au contraire, l'effet de cheminée est négligeable par rapport au vent fort [Dreyfus, 1960, p. 171].

### 2.2.3.3 Effet combiné du vent et de cheminée

Dans la plupart des cas, la ventilation naturelle dépend d'une force combinée des effets du vent et de l'effet de cheminée. La figure suivante 2.16 montre l'effet combiné du vent et des forces thermiques. Les pressions en raison de chaque effet sont additionnées pour déterminer la différence de pression totale à travers l'enveloppe du bâtiment [Hui, En ligne]<sup>15</sup>.

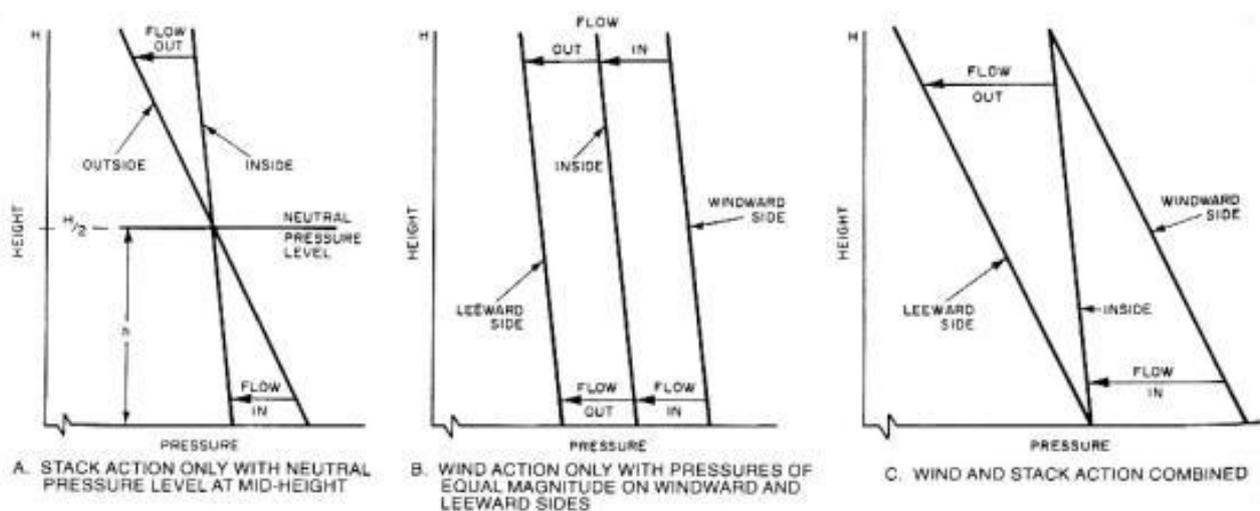


Figure 2.16: Effet combiné du vent et des forces thermiques [Hui, En ligne].

L'importance relative des pressions de vent et des forces thermiques dans un bâtiment dépend de la hauteur du bâtiment, de la résistance interne au flux d'air, de l'emplacement et des caractéristiques des ouvertures et du site local. Les deux types de ventilation naturelle fonctionnent sur le principe que l'air passe d'une zone de pression élevée à une zone de pression faible. Les pressions générées par l'effet de cheminée sont assez faibles (0,3 Pa à 3 Pa) tandis que les pressions du vent sont généralement beaucoup plus grandes (1 Pa à 35 Pa).

L'architecture qui existe dans les régions chaudes introduit des dispositifs architecturaux qui bénéficient de la ventilation naturelle afin d'améliorer le confort thermique des espaces intérieures. La majorité des bâtiments employant la ventilation naturelle reposent essentiellement sur la ventilation transversale en ignorant l'effet de cheminée. La conception la plus efficace doit mettre en œuvre ces deux types de ventilation. Dans la partie suivante, nous allons présenter et analyser les logiques thermiques utilisées dans les bâtiments existants dans la région du Sinaï en se focalisant sur les systèmes de ventilation naturelle appliqués. Par cette analyse, nous pouvons comprendre les logiques thermiques déjà utilisées en précisant les causes du problème d'inconfort thermique.

<sup>15</sup> voir (<http://www.arch.hku.hk/teaching/lectures/airvent/sect03.htm>)

## 2.3 Culture architecturale et logiques thermiques utilisées dans le Sinaï.

« Il n'existe aucun autre problème plus crucial pour l'architecte que celui de résoudre le problème dialectique entre l'intérieur et l'extérieur », [Arnheim R., 1978].

Afin de surmonter le problème de l'inconfort, l'homme invente des solutions architecturales pour assurer un niveau de confort à l'intérieur de bâtiments. L'expérience des constructeurs du passé, qui étaient responsables de "l'architecture sans architecte", a permis d'utiliser ce que l'environnement local offrait pour l'approvisionnement du chauffage, du refroidissement, d'éclairage et d'eau.

Dans le climat chaud et aride, les maisons ont été construites avec des matériaux locaux et des murs épais extérieurs. Des constructions en pierre ou argile ont été établies et partiellement creusées dans la terre afin de se défendre de la chaleur. L'espace extérieur couvert, les chemins étroits et les ruelles entre les hauts édifices ont créé, non seulement des espaces externes confortables, mais ont également offert un abri contre les tempêtes de sable. Des tours à vent ont été construites pour ventiler les bâtiments. Ils font face à la direction de vents favorables afin d'optimiser la ventilation puis guider l'air frais dans le bâtiment.

Dans le désert où il y a une chaleur extrême et le manque d'eau, les humains survivent à ces conditions en grande partie grâce à leur mode de vie nomade et ont donc développé une préférence pour les tentes qui leur permettent de créer leur propre microclimat. Des tentes légères et des poils de chèvre tissés ont été utilisés comme abri au soleil pendant le jour et fermés la nuit pour maintenir la chaleur et pour protéger du froid.

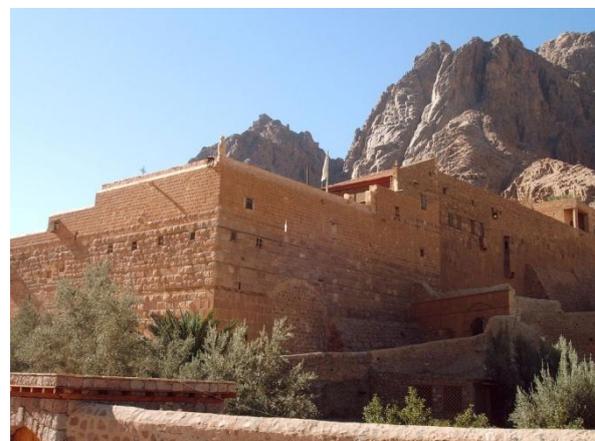
Dans la région du Sinaï comme région désertique ayant un climat chaud, nous pouvons observer des bâtiments qui ont suivis ces solutions traditionnelles afin d'assurer le confort thermique des usagers ainsi que des bâtiments qui cherchent à surmonter le même problème à travers des systèmes mécaniques en ignorant ces approches bioclimatiques. D'une côté, il existe des bâtiments ayant des masses thermiques importantes, des constructions légères en roseaux et des tentes qui sont les constructions traditionnelles de la région. De l'autre côté, des bâtiments en béton qui est le matériel le plus courant et le moins cher dans la région du Sinaï. C'est important de comprendre comment ces bâtiments agissent envers les conditions climatiques de cette région, et comment ces logiques bénéficient de la ventilation naturelle afin d'améliorer le confort thermique dans les bâtiments existants. De point de vue thermique, nous pouvons classer ou grouper les bâtiments existants dans le Sinaï en trois groupes :

### 2.3.1 La logique de la masse thermique intégrant des dispositifs architecturaux de ventilation naturelle

Dans ce groupe, la logique thermique utilisée est d'avoir une masse thermique élevée par des murs épais et des matériaux ayant une inertie thermique importante. Cette logique est utilisée dans l'architecture traditionnelle quand la stabilité de la température intérieure est essentielle et quand les températures extérieures varient fréquemment. Nous pouvons voir cette logique dans le monastère de Sainte Catherine qui a été construit entre les années 527 et 565. Le monastère et ses annexes sont construits en pierre de granit rose local avec des murs épais qui varient entre 40cm et 80cm (figure 2.17&2.18).



*Figure 2.17 : Le monastère de Sainte Catherine, Sinäi.*



*Figure 2.18 : Les constructions en pierre et la logique de masse thermique au monastère de Sainte Catherine, Sinäi.*

Cette logique thermique est utilisée aussi dans l'architecture contemporaine touristique. Dans le village touristique de « City Sharm » (figure 2.19), des murs en pierre de granit ont été utilisés dans certaines parties afin d'augmenter la masse thermique de la construction. Grâce à l'inertie du granit, il s'écoule un temps long pour transférer la chaleur de l'extérieur à l'intérieur. Il conserve la chaleur pendant le jour, puis il transmet cette chaleur vers les espaces internes pendant la nuit froide.



*Figure 2.19 : Des murs ayant des masses thermiques importantes, Village touristique de « City Sharm », Charm El Cheikh, Sinäi.*

Le village touristique de « Basata » est un autre exemple de cette logique thermique (figure 2.20). Ce village qui a été construit en 1986 en suivant le style architectural d'Hassan Fathy et en utilisant les matériaux locaux, applique la même logique avec des murs de 40cm à 50cm en briques de terre cuite et en pierre de granit.

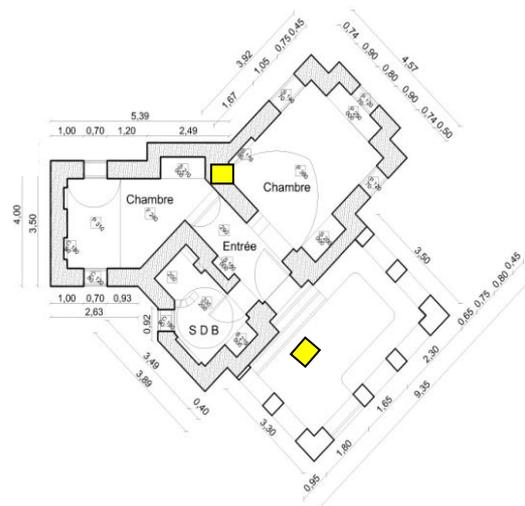
Dans une mesure pour un chalet dans ce village<sup>16</sup>, l'observation la plus claire est la stabilisé de la température intérieure des bâtiments pendant 48h entre 32,2 et 34,0 degrés, tandis que la température extérieure a varié entre 36,7 et 27,5 degrés, ce qui est interprétée par l'inertie thermique et la capacité élevée des matériaux de construction à conserver la chaleur même pendant la nuit.



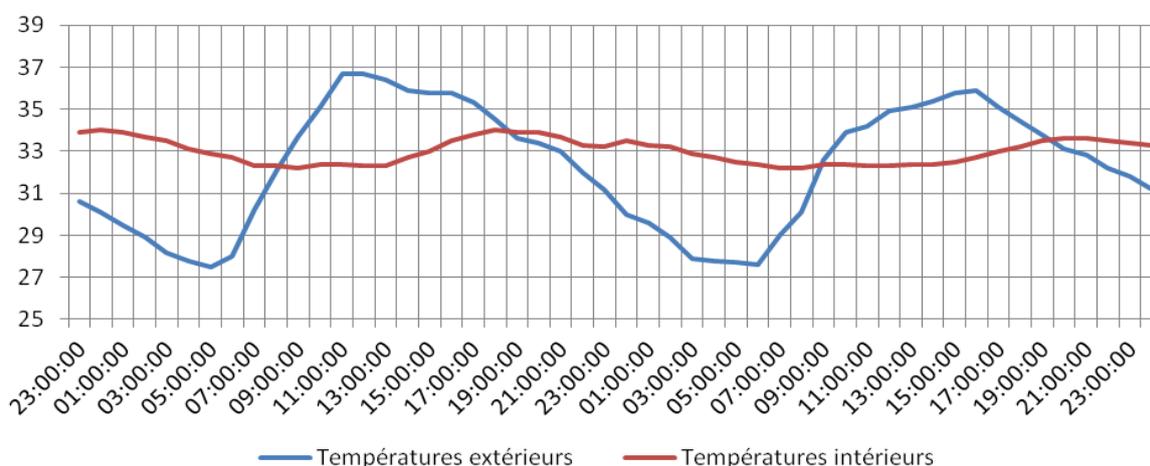
*Figure 2.20 : La logique de la masse thermique qui a été utilisée en utilisant de la pierre de granit avec des briques en terre cuite dans les bâtiments du village touristique de « Basata », Taba route de Nuweiba, Sinai.*

<sup>16</sup> Cette mesure a été faite le 19 et le 20 juillet 2010 voir Annexe.

■ Emplacement des appareils de mesure



**Figure 2.21 :** Les emplacements des appareils de mesure au village touristique de « Basata », Taba, Sinaï.



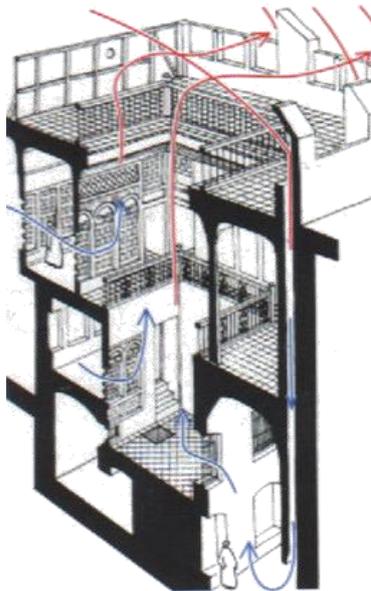
**Figure 2.22 :** Les températures mesurées à l'intérieur et à l'extérieur d'une villa ayant masse thermique importante, le village touristique de « Basata », Taba, Sinaï.

Le point négatif dans cette approche architecturale est que pendant les nuits d'été, nous avons des températures plus chaudes à l'intérieur qu'à l'extérieur. Dans l'exemple précédent, la température à l'intérieur du bâtiment a été plus élevée qu'à l'extérieur tout la nuit et la différence arrive jusqu'à 5,2 degrés vers 5h00 (figure 2.22).

Afin de surmonter ce problème, l'architecture vernaculaire applique des systèmes de ventilation naturelle très efficace qui permet d'enlever la chaleur de l'intérieur pendant la nuit, ce qui n'est pas appliqué dans les exemples existants dans la région. Dans l'exemple précédent de « Basata », des fenêtres avec des moucharabiehs ou des persiennes ont été utilisés, mais ils ne sont pas suffisants pour une ventilation efficace. L'architecture vernaculaire en Égypte utilise des dispositifs architecturaux pour améliorer la ventilation des locaux tels que la tour à vent, le patio et le moucharabieh. Ils aident à remplacer rapidement l'air chaud à l'intérieur par l'air frais quand la température extérieure est inférieure à la température intérieure.

## Tour à vent

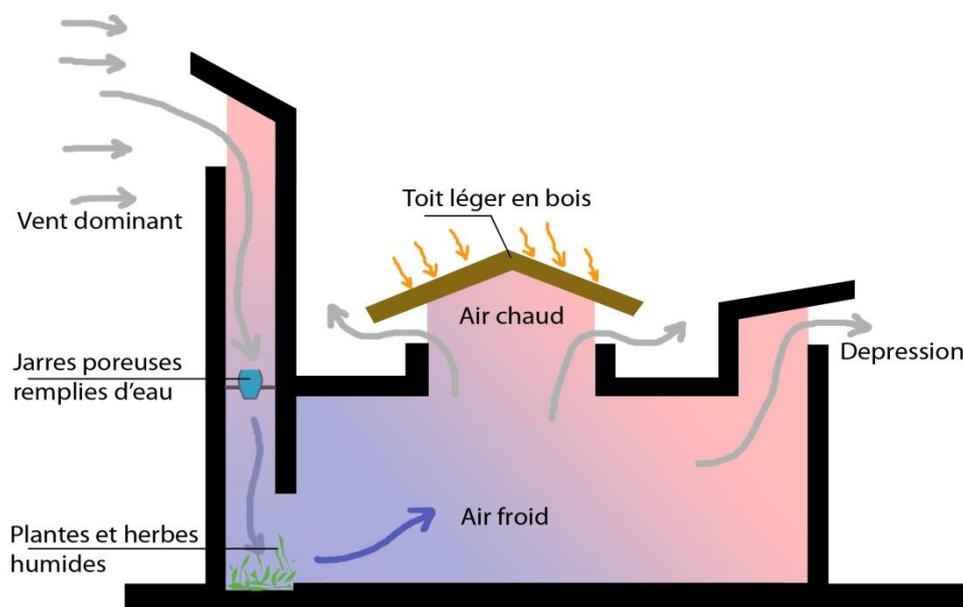
Les capteurs de vent, ou les ‘tours à vent’, sont un des éléments de l’habitat traditionnel en Égypte. Ses formes varient d’une région à l’autre en fonction des conditions climatiques. Les capteurs de vent égyptiens ‘Malkaf’ font en général face au nord pour intercepter les brises dominantes. Il apparaît que le fonctionnement d’un capteur de vent ne repose pas seulement sur la capacité du vent à pénétrer à l’intérieur de l’habitation. En fait, pendant la période la plus chaude de la journée, une brise n’aura aucune tendance à entrer dans l’habitation, même si le capteur est ouvert, car l’air à l’intérieur est déjà plus frais qu’à l’extérieur et en conséquence, l’air intérieur est plus dense et possède une pression plus élevée que l’air chaud. Les murs maintiennent la température intérieure constante à la valeur de la moyenne journalière, si bien qu’en fin d’après-midi ou en soirée, lorsque l’air extérieur descend à une température inférieure à cette moyenne, les différences de température et de pression s’inversent et l’air pénètre librement dans l’habitation [Izard, 1979, p.103].



*Figure 2.23 : Coupe de principe du capteur de vent traditionnel [Klaus, 1998, p.48].*

La conception du capteur de vent n’est pas la seule considération : la sortie de l’air est aussi très importante. Lorsque le vent souffle d’une seule direction, il exerce une pression positive sur la façade du bâtiment qui lui fait face, mais il crée également une dépression sur le toit et sur la façade opposée au bâtiment. Si les ouvertures de sortie sont placées dans ces zones, l’air est aspiré et évacué du bâtiment.

La coupe des maisons du Caire montre que la partie supérieure du toit est utilisée comme sortie d’air. Le toit est constitué de matériaux légers qui s’échauffent rapidement, chauffant ainsi l’air qui se trouve en contact immédiat en dessous (figure 2.24). L’air chaud s’élève et s’échappe créant une dépression dans la zone située en dessous, ce qui accélère le mouvement de l’air vers le haut et vers l’extérieur.



*Figure 2.24 : Coupe pour une maison traditionnelle au Caire montre le mouvement de l'air par l'effet combiné du vent et de cheminée.*

Cet exemple pris dans le vieux Caire nous indique donc que la conception d'un capteur de vent ne dépend pas seulement de la considération du vent dominant, mais aussi du microclimat régnant à l'intérieur du bâtiment, influencé par l'effet de cheminée, pour créer un système d'évacuation de l'air.

Ces capteurs de vent sont capables de refroidir l'air avant que celui-ci entre dans le bâtiment. L'air doit traverser un sous-sol frais ou passer à travers un lit de plantes, avant de pénétrer dans la partie habitée. Le refroidissement par évaporation peut être ajouté aux effets du capteur de vent en y adjoignant des nattes d'herbe humide. Lors de la conception d'un capteur de vent dans le village de Gourna-Egypte, Hassan Fathy a utilisé des lits de charbon de bois humide sur lequel l'air devait passer avant d'entrer dans les salles, et il affirme avoir mesuré une chute de 10 °C de la température de l'air.

## **Patio**

Depuis l'Antiquité le patio apparaît dans toutes les grandes civilisations méditerranéennes dont l'Égypte. La maison avec cour intérieure est une typologie dans laquelle tous les espaces de vie sont distribués autour du patio intérieur. Le patio constitue le principal intermédiaire entre l'intérieur et l'extérieur. Les pièces de la maison sont tournées sur celui-ci. Les performances thermiques de la maison à patio reposent sur le processus d'échanges thermiques engendrés entre les différents espaces : l'espace intérieur, la cour intérieure et l'espace extérieur [Mansouri, 2003, p.48].

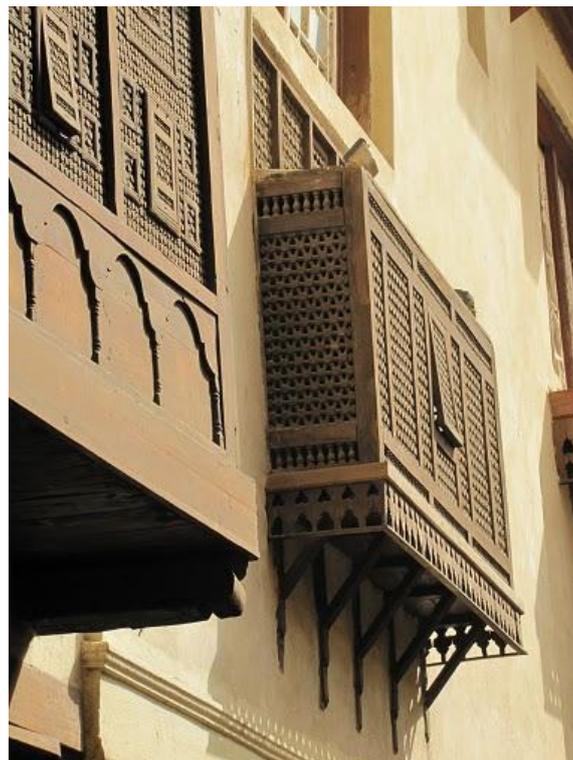
Thermiquement, le patio fonctionne comme un puits de fraîcheur car l'air frais ne peut s'échapper et stagne en rafraîchissant ainsi les pièces qui sont ouvertes sur lui. Cet espace intermédiaire garde l'air frais en abaissant la température par l'utilisation de végétation ou par

l'existence d'une fontaine qui permet de refroidir l'air par évaporation avant d'entrer dans les espaces intérieurs [Izard, 1979, p.101]. Les ouvertures tournées vers l'extérieur sont en nombre restreint et sont souvent équipées de pare-soleil. Néanmoins, ces derniers permettent un éclairage naturel minimum en permettant à la ventilation de passer à l'intérieur. La végétation, souvent très présente, peut aussi jouer le rôle de pare-soleil en même temps que d'humidificateur permettant un rafraîchissement par évaporation.

### **Moucharabieh**

Le moucharabieh est un treillage aux combinaisons géométriques variées (figure 2.25). Ce dispositif d'ouverture poreux, constitué généralement de petits éléments en bois tourné, servait de masque pour les ouvertures à la fois pour des besoins d'intimité (voir sans être vu) et aussi pour des raisons climatiques afin d'accélérer le passage du vent. Il laisse circuler l'air en interceptant la vue de dehors en dedans, de façon que les personnes qui sont à l'intérieur de l'appartement puissent voir au dehors sans être aperçues. L'écran en bois avec des fenêtres ouvrantes donne de l'ombre et de la protection contre les rayonnements solaires chauds d'été tout en permettant à l'air de passer.

L'extrusion du Moucharabieh permet à l'air d'entrer de trois côtés, tandis que la réduction de la surface produite par le maillage du moucharabieh accélère le passage du vent. Le flux d'air est mis en contact avec des surfaces humides, des bassins ou des plats remplis d'eau qui diffusent leur fraîcheur à l'intérieur de la maison grâce à l'évaporation de l'eau. Le bois lui-même absorbe l'humidité de l'air.



*Figure 2.25: L'extrusion du Moucharabieh qui permet à l'air de trois côtés d'entrer.*

L'air extérieur pénètre l'ouverture par le bas. En se réchauffant, celui-ci est évacué par le haut de cette même ouverture [Mansouri, 2003, p.50]. Les Moucharabiehs sont habituellement avec petite ouverture dans la partie inférieure et des ouvertures plus grandes dans les parties supérieures afin d'augmenter la vitesse de l'air au-dessus de la tête et de la ralentir dans les parties inférieures (figure 2.26).



*Figure 2.26: Des petites ouvertures en bas et des ouvertures plus grandes en hauts pour faciliter la circulation d'air.*

Tous ces dispositifs mentionnés au-dessus aident les bâtiments ayant des masses thermiques à ventiler les locaux intérieurs. Les exemples trouvés dans le Sinaï qui appliquent la logique de la masse thermique utilisent couramment ces dispositifs de ventilation. C'est pour cela, que ces dispositifs n'assurent pas un confort thermique aux espaces intérieurs pendant les périodes chaudes de l'année.

### **2.3.2 La logique de constructions légères et la ventilation à travers les façades**

Au contraire de la logique de masse thermique accompagnant des dispositifs de ventilation naturelle, les constructions légères appliquent une autre logique thermique. Cette logique vise à concevoir un espace ombré et bien protégé du gain solaire en maximisant la ventilation naturelle à travers toute la surface de la façade. Dans ce cas-là, les façades poreuses captent le vent de n'importe quelle direction.

Dans le Sinaï, nous pouvons observer cette logique dans deux types de constructions. Le premier exemple est la hutte en roseaux qui est très connue dans la région Sud-est du Sinaï et le deuxième exemple est la tente traditionnelle qui est l'habitat des bédouins.

Sur la route de Taba- Nuweiba, des villages touristiques ont été complètement construits avec cette logique (figure 2.27&28). Les murs en roseaux permettent de bénéficier du vent qui circule dans cette forme urbaine dispersée et d'avoir une protection contre les rayonnements solaires directs au cours de la journée (figure 2.29).



Figure 2.27: Des bungalows en roseaux, Taba route de Nuweiba, Sinai.



Figure 2.28: La construction en roseaux pendant l'exécution, le village touristique de « Basata », Taba route de Nuweiba, Sinai.

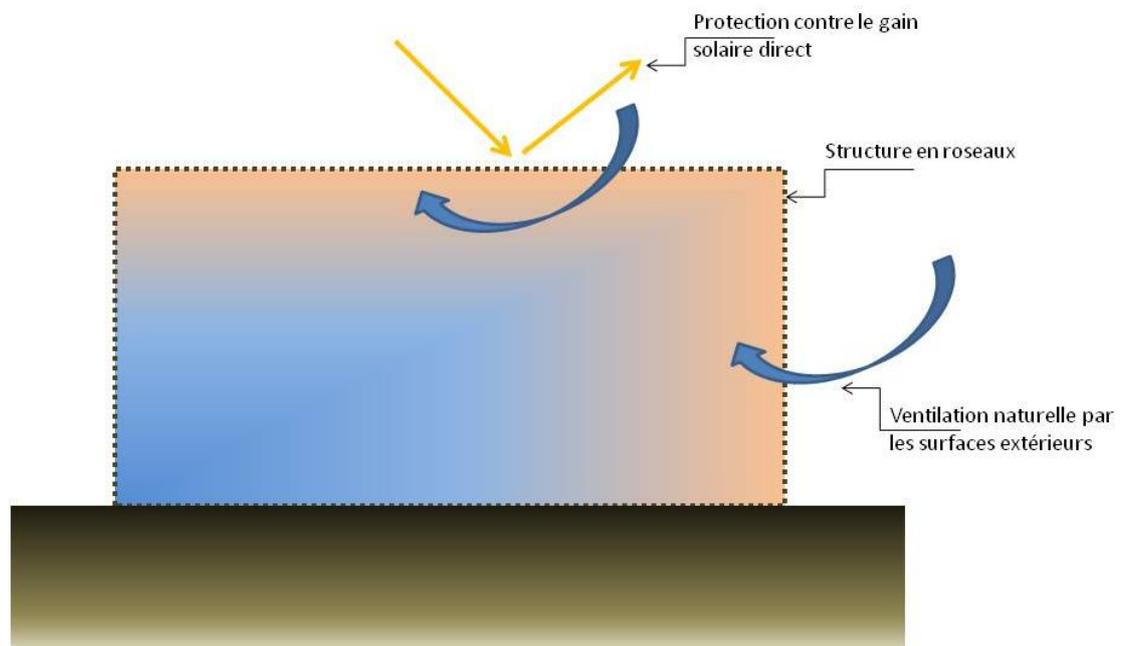


Figure 2.29: La logique thermique des bungalows en roseaux.

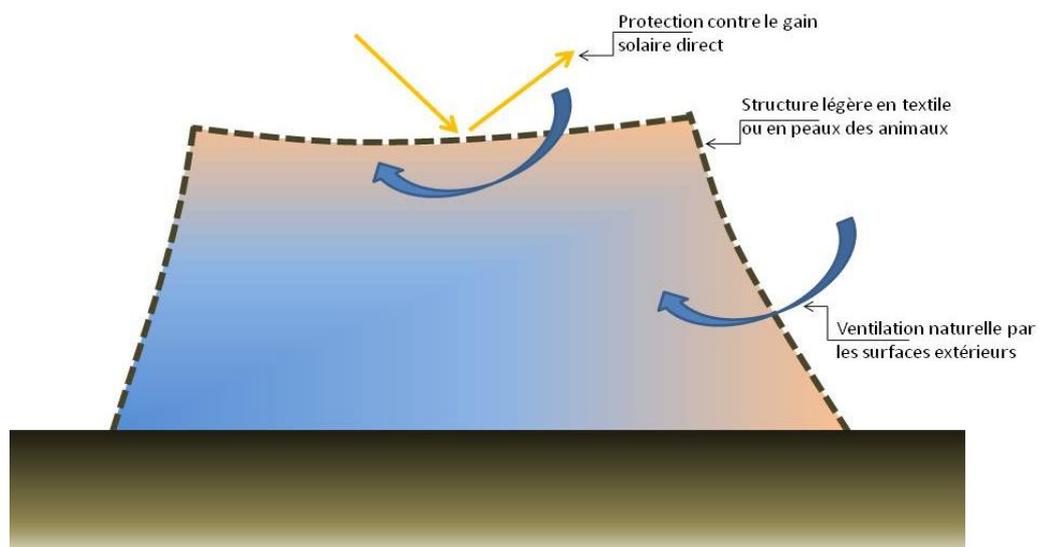
La tente qui est considérée l'habitat traditionnel de la région applique la même logique thermique celle de la construction légère (figure 2.30). Cette construction traditionnelle est développée grâce au mode de vie nomade des bédouins. Elles permettent de fournir un habitat mobile pour répondre au besoin de se déplacer et en même temps répondre au climat local chaud.



**Figures 2.30 :** Les tentes, les habitats traditionnels bioclimatiques appropriés au climat du Sinäi.

La tente traditionnelle de cette région est noire ou d'une couleur sombre. Elle est faite généralement des matériaux naturels (tissus de lin ou coton) ou de la peau d'animaux (poils de chèvre tissés ou peau de chameau).

Ces constructions ont été utilisées comme abris du soleil pendant le jour et sont fermées la nuit pour maintenir la chaleur et pour protéger du froid. En même temps, elles permettent de laisser passer le vent par toutes ses façades pour ventiler et refroidir l'intérieur. Elles sont aussi résistantes aux vents sahariens qui portent des poussières. Cette fonction garde une température intérieure plus basse et plus confortable que la température à l'extérieur pendant la journée. Le point négatif de cette logique thermique est l'instabilité de la température intérieure qui n'est pas du tout contrôlable et varie selon les températures externes. Ce type de bâtiment peut être adapté à l'utilisation temporaire et récréative.



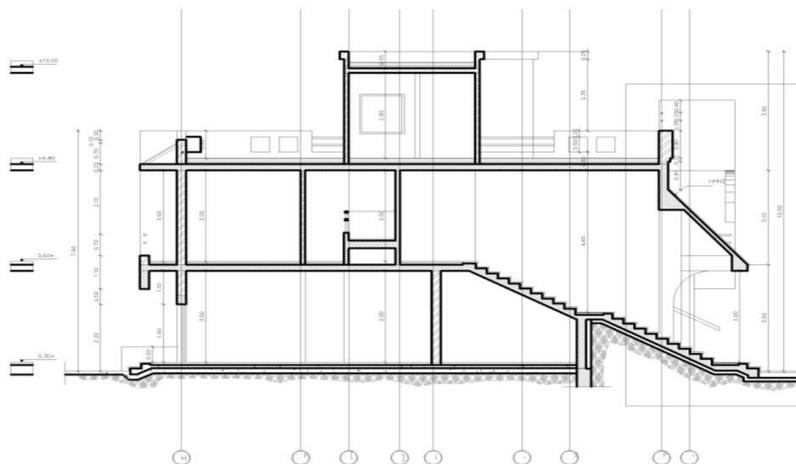
**Figure 2.31 :** La logique thermique de la tente traditionnelle des bédouins.

### 2.3.3 La logique de l'ignorance

Au contraire des deux logiques thermiques mentionnées précédemment, les constructions contemporaines dans la région de Sinaï favorisent l'ignorance totale des conditions climatiques. Ils n'appliquent pas des conceptions bioclimatiques et préfèrent les matériaux les moins chers, c'est pourquoi le béton armé et la brique sont les matériaux les plus courants. Du même concept, des murs à faible épaisseur qui varient normalement de 12cm et 25cm et sans isolation thermique sont utilisés (figure 2.33). Malgré la facilité et la flexibilité de ces matériaux, cette technique a accru le problème de l'inconfort thermique. Ces matériaux qui ne résistent pas à la chaleur, produisent des espaces chauds et incontrôlables de point de vue thermique. Les murs qui ne sont pas épais et la conception de la maison qui n'applique pas des systèmes de ventilation naturelle amplifient le problème de l'inconfort thermique à l'intérieur de ces bâtiments. La fluctuation journalière de la température intérieure dans ce type de bâtiment est très grande ce qui crée une ambiance thermique interne inconfortable.



*Figure 2.32 : Constructions en béton armé et en briques rouges qui favorisent l'ignorance des conditions climatiques- projets touristiques en constructions à Charm El-Cheikh à gauche et à Nuweiba à droite.*



*Figure 2.33 : Coupe dans un bâtiment montre les murs et le toit à faible épaisseur, Charm El-Cheikh, Sinaï.*

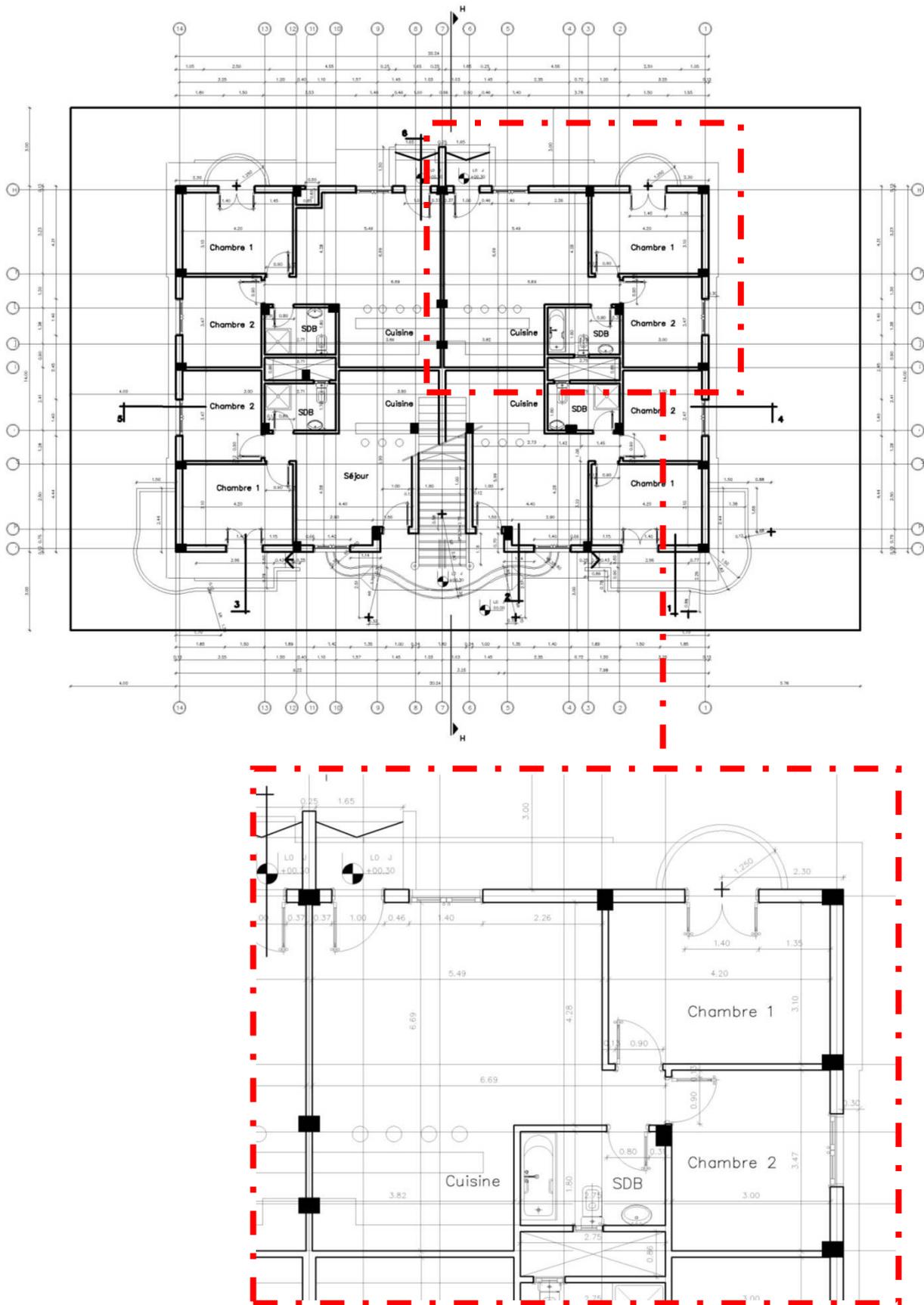


Figure 2.34 : Plan RDC, exemple d'un bâtiment en béton armée et murs en briques à Charm El-Cheikh, Sinai.

Afin de résoudre le problème de l'inconfort, les concepteurs ont choisi la solution la plus facile à travers l'utilisation de petites installations de climatisation. Par conséquence, cette approche d'un côté, coût très cher à cause de la consommation d'énergie élevée en polluant l'environnement, d'un autre côté, cela crée des façades faussées ce qui n'est pas agréable et acceptable du point de vue architectural (figure 2.35).



*Figure 2.35 : Des façades faussées en raison de l'utilisation intense des unités d'air conditionné, un bâtiment résidentiel à gauche et l'hôtel d'Oriental Rivoli à droite, Charm El-Cheikh, Sinäi.*

Bien que les climatisations créent un confort thermique acceptable, elles sont critiquées par les usagers et surtout les usagers des projets touristiques. Dans la pratique quotidienne, les touristes qui sont attachés à la nature, ne préfèrent pas utiliser ces systèmes de climatisations sauf cas extrême du climat très chaud. Malgré la zone de confort créée par ces systèmes mécaniques, les changements d'ambiances entre une zone artificielle climatisée et les conditions climatiques naturelles à l'extérieur causent un problème d'inconfort. Ils préfèrent éteindre le système de climatisation et avoir un climat un peu chaud mais naturel.

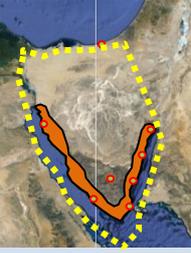
Selon un entretien avec le directeur d'un village touristique <sup>17</sup>, il a mentionné que « les touristes préfèrent rester dans des bungalows en roseaux où ils ont des contacts directs avec l'environnement. Les touristes préfèrent bien sûr entrer, sortir, dormir, jouer sous le ciel et rester en contact tous le temps avec la mer et la nature. Ils viennent ici pour ça et c'est pourquoi ils n'aiment pas les villas climatisées, même si elles sont plus confortables ».

Dans les projets touristiques, les bâtiments en brique et béton ayant des murs à faible épaisseur, sans couches d'isolation thermique et climatisés par des systèmes énergétiques représentent la majorité des bâtiments existants dans le Sinäi. Ce type de construction compte plus de 90% des bâtiments existants dans la région et surtout dans les projets touristiques. Il est largement utilisé à cause de la facilité d'utiliser ces matériaux de construction et ses prix bas.

<sup>17</sup> Entretien fait en Juillet 2010 avec Sherif El Ghamrawy, le propriétaire du village touristique de « Basata ».

Ce type de bâtiment cause des problèmes au niveau énergétique, du confort humain et architectural. Au niveau énergétique, il augmente la consommation d'énergie dédiée pour les systèmes de refroidissement. Au niveau du confort humain, les climats artificiels produits par les climatisations ne sont pas acceptés par les utilisateurs. Au niveau architectural, les unités externes d'air conditionné dénaturent les façades. Notre but est de voir comment la nature et ses idées biomimétiques peuvent résoudre le problème de l'inconfort thermique et ses impacts aux différents niveaux. La recherche postule que les idées biomimétiques sont capables de surmonter ce problème dans ce type de bâtiments d'une manière originale. Dans le chapitre suivant, nous allons voir comment la nature résout le même problème de l'inconfort thermique en essayant d'appliquer ces idées sur ce type de bâtiments.

*Tableau 2.2 : Type de projets et bâtiments de référence*

<b>Contexte</b>		
Localisation	Sinaï en général et la zone de développement touristique en particulière	
Climat	Climat désertique chaud et aride ou semi-aride (le Sinaï)	
<b>Urbain</b>		
Type de projet	Projet touristique préurbain (village touristique)	
Forme	Dispersée - bâtiments individuels ou mitoyens	
	Une ou deux étages	

Architecture

Conception Chambres ou chalets hôteliers et résidentiels



Une ou deux chambres

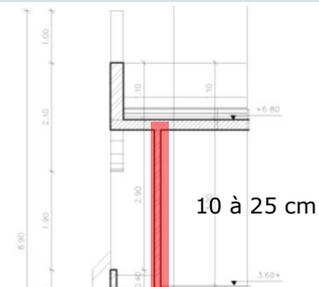


Éléments technique

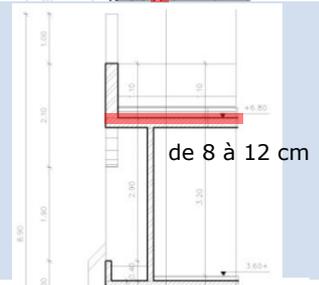
Matériaux de construction Structure en béton armée et des murs en briques rouges



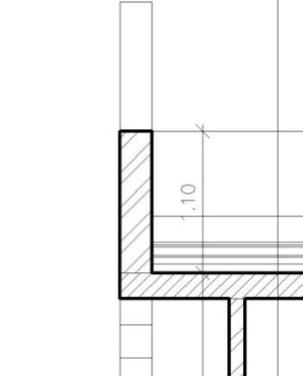
Épaisseur des murs De 10 cm à 25 cm



Plancher De 8 à 12 cm de plancher solide en béton armée



Isolation thermique Murs et toits sans couches d'isolation thermique



Nous distinguerons ce type de bâtiments par plusieurs caractères mentionnés au-dessous au tableau 2.2. Dans cette thèse, nous allons prendre ce type de bâtiment comme référence sur laquelle nous voulons appliquer nos idées tirées de l'approche biomimétique. Notre but est de voir qu'est-ce que cette approche peut ajouter sur ces bâtiments afin d'améliorer son comportement thermique.

## 2.4 Conclusion

Ce chapitre a énoncé trois questions principales autour notre recherche. La première est la notion de confort thermique entre les théories de XX siècle qui définissent des limites de confort et la nouvelle approche du paysage thermique. La deuxième question est la ventilation et son rôle pour atteindre le confort thermique. Troisièmement, c'est la question des applications architecturales et des logiques thermiques utilisées dans les bâtiments existants dans le Sinaï. Cette dernière vise à découvrir comment l'architecture qui existe réagit avec le problème de l'inconfort thermique dans ce climat chaud.

La question du confort thermique montre, d'un côté, les limites thermiques et hygrométriques qui construisent la zone de confort humain. Ces limites qui sont proposées par les théories afin d'assurer une ambiance thermique confortable. De l'autre côté, elle met l'accent sur la nouvelle approche du déséquilibre dans l'invisible qui se concentre sur la configuration et le type d'ambiance créée à l'intérieur de nos bâtiments afin d'enrichir la sensation humaine. Dans cette thèse nous ne recherchons pas seulement à créer des limites thermiques et hygrométriques, mais aussi nous voulons créer une ambiance dynamique et changeable ayant une variation dans les facteurs climatiques tels que la température, l'humidité et la vitesse d'air.

Dans la deuxième question, nous avons présenté le rôle de la ventilation naturelle afin d'atteindre le confort thermique, comment l'air se déplace naturellement et comment pouvons-nous calculer les débits d'air déplacés sur l'effet de vent et l'effet de cheminée. Cette question autour la ventilation nous aidera à comprendre comment les dispositifs architecturaux de ventilation bénéficient des phénomènes naturels pour ventiler les bâtiments ? Ces dispositifs de ventilation ont été utilisés dans l'architecture existante dans la région du Sinaï. C'est pourquoi nous avons analysé, dans la troisième question, les logiques thermiques utilisées dans les bâtiments existants.

Dans le Sinaï, nous pouvons observer trois groupes principaux des logiques thermiques utilisées. La première logique appliquée est la logique de « masse thermique avec des dispositifs de ventilation naturelle ». Cette logique cherche à construire des bâtiments ayant des murs épais qui ont la capacité de stocker de l'énergie thermique. Dans cette approche, des systèmes de ventilation naturelle efficaces sont essentiels. Ces dispositifs de ventilation tels que la tour à vent, le patio et le moucharabieh sont utilisés afin de refroidir les masses de

constructions quand l'air est froid en rendant les espaces intérieurs plus frais pendant la période chaude. L'inertie thermique de masse des bâtiments et la pression de vent contribuent ensemble au processus de refroidissement.

La deuxième logique thermique utilisée dans les constructions existantes dans la région est la logique des constructions légères. Cette logique vise à protéger les espaces intérieurs de l'exposition directe au soleil en permettant une ventilation naturelle tous le temps par les façades. Cette logique est utilisée depuis longtemps dans les tentes des bédouins. Des projets touristiques ont utilisé la même logique en créant des chalets en roseaux.

Outre des logiques traditionnelles bioclimatiques, les bâtiments récents utilisent une logique d'ignorance. Ils favorisent la résolution du problème de l'inconfort thermique par des moyens énergétiques qui causent des problèmes architecturaux et environnementaux. Cette approche couramment utilisée dans les projets urbains et architecturaux dans la région de Sinaï nous incite à voir comment pouvons-nous résoudre ce problème en cherchant dans la nature et en suivant l'approche de la biomimétique.

## 3. Le biomimétisme : une architecture bioclimatique qui s'inspire de la nature

La tendance des organismes vivants pour maintenir des conditions de vie stables, est l'une des caractéristiques qui lie les bâtiments que nous créons avec la biologie. Les organismes vivants ont une tendance à constamment modifier leurs structures ou leurs comportements dans le but d'utiliser de l'énergie libre, comme le vent ou la température constante du sol, alors que nous consommons de grandes quantités d'énergie afin de chauffer ou de refroidir nos bâtiments.

Dans ce chapitre, nous allons nous concentrer sur les systèmes d'adaptation thermique au climat chaud trouvés dans les organismes vivants et surtout dans les régions chaudes telles que dans le Sinaï. Cette région désertique qui est caractérisée par des températures très variées entre le matin et la nuit, et entre l'hiver et l'été. C'est important aussi de comprendre le processus humain de thermorégulation qui est responsable du maintien de la température interne de notre corps autour de 37°C.

Cette approche biomimétique peut changer la façon dont nous traitons l'architecture d'aujourd'hui. Elle peut nous donner des idées naturelles pour améliorer le comportement thermique de nos bâtiments en ajoutant des nouvelles valeurs pour l'approche de l'architecture bioclimatique.

## 3.1 Le Sinaï : adaptation biologique au climat chaud

Le désert est l'élément prédominant dans le Sinaï, couvrant presque toute la surface de la péninsule. Les déserts sont généralement caractérisés par des contraintes environnementales telles que l'humidité relativement faible, l'irrégularité et l'imprévisibilité des précipitations et la température diurne élevée, surtout pendant les mois d'été. Le plus souvent de longues périodes avec une moyenne maximale dépassant 35°C sont enregistrées [Costa, 1995, p.13].

Ces caractéristiques environnementales créent des conditions difficiles pour les organismes vivants : les plantes, les animaux et les êtres humains. En dépit de ces conditions climatiques difficiles, de nombreux moyens et différentes méthodes d'adaptation aux climats chauds sont élaborés et utilisés par la plupart des organismes vivants du désert. La plupart d'entre eux développent des moyens différents et des systèmes qui répondent aux deux facteurs principaux : le quasi indisponibilité de l'eau ou la rareté de l'eau.

### 3.1.1 Adaptation des animaux au climat chaud

Le Sinaï possède un bon nombre de la faune terrestre, composé principalement de renards, gazelles, bouquetins, chameaux, petits rongeurs, et certains genres de reptiles [Siliotti, 2000, p.8-9] [Zalat, 2008, p.115-162]. En général, les animaux du désert ont la capacité de modifier leur environnement interne et possèdent un grand nombre de stratégies d'adaptation possibles répondant au climat chaud. Ces stratégies varient entre les stratégies d'adaptation comportementale, morphologiques et physiologiques. Elles visent à éviter le gain de chaleur, perdre la chaleur interne. Nous allons explorer ces méthodes utilisées par les animaux qui vivent dans les régions ayant des climats chauds.

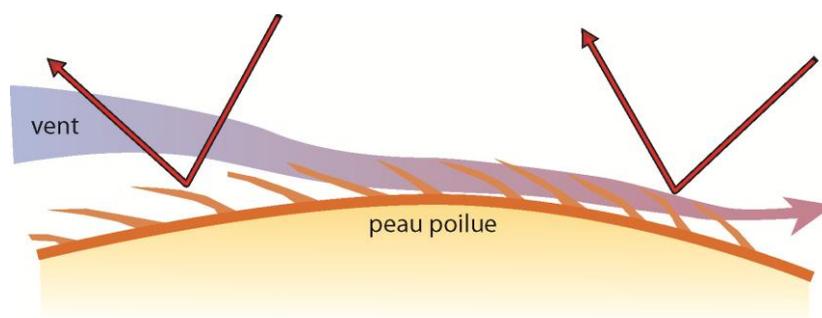
#### 3.1.1.1 Éviter le gain de chaleur

Certains animaux vivant dans le dessert ont des manteaux épais avec des poils denses. La fonction des peaux poilues la plus communément admise est celle d'isolant thermique (figure 3.1). Ces couches fonctionnent comme une couche d'isolation thermique contre la chaleur estivale, en même temps elles protègent les animaux du froid le soir et en hiver. [Shenbrot et al, 1999, p.89] [Costa, 1995, P49].



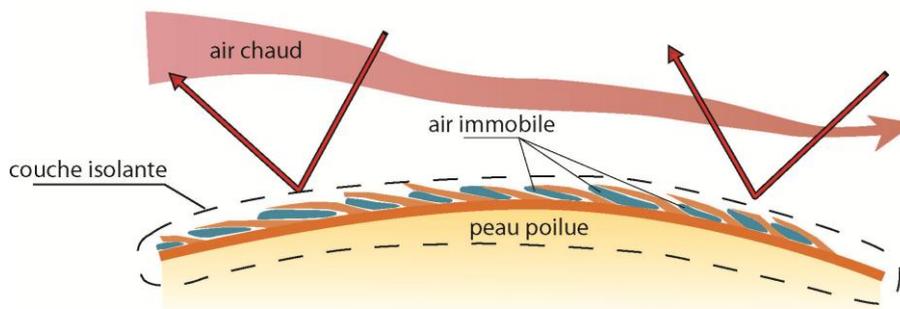
**Figure 3.1:** La peau poilue (Renards et chameaux) fonctionne comme une couche d'isolation thermique contre la chaleur externe.

En fait, ces manteaux poiles ont un double rôle thermique, d'un côté ils isolent le corps, d'autre côté ils permettent la ventilation de passer jusqu'aux peaux augmentant le taux de perte de chaleur (figure 3.2).



**Figure 3.2:** La peau poilue augmente l'isolation thermique en permettant le perdre de chaleur par ventilation (le chercheur).

Dans des conditions extrêmes chaudes, quand la température de l'air à l'extérieure est assez élevée, les poiles ou les cheveux sur la peau restent à plat, empêchant la chaleur d'être piégée par la couche d'air immobile qui forment avec les poils une couche d'isolation thermique. D'autre part, ces poils plats augmentent le flux d'air près de la peau ce qui augmente la perte de chaleur par convection (figure 3.3) [P.W., En ligne]<sup>1</sup>.



**Figure 3.3:** Dans les conditions chaudes, les poils restent à plat en créant des poches d'air immobile. Ces poiles avec les poches d'air forment une couche d'isolation thermique plus efficace (le chercheur).

<sup>1</sup> voir ([http://psychology.wikia.com/wiki/Thermoregulation\\_%28body%29](http://psychology.wikia.com/wiki/Thermoregulation_%28body%29))

La coloration est aussi un facteur important pour réduire l'absorption de chaleur. Des couleurs claires et pâles sont donc plus familières chez les animaux vivant en zones désertiques [Earlham Collage, 2006].



*Figure 3.4: La couleur claire et pâle des animaux qui vivent dans les régions chaudes.*

Les caractéristiques physiques des peaux ne sont pas les seules stratégies pour éviter le gain de chaleur, mais il existe aussi des autres stratégies comportementales. La plupart des rongeurs, par exemple, sont des animaux nocturnes, ils dorment dans des caves fraîches ou dans un terrier pendant le jour et sont actifs pendant la nuit. Ils sont actifs pour quelques heures pendant la journée pour réduire l'exposition au soleil. D'autres animaux se déplacent rapidement tels que les serpents qui soulèvent leur corps loin du sable chauffé comme beaucoup d'autres reptiles (figure 3.1) [Earlham Collage, 2006].



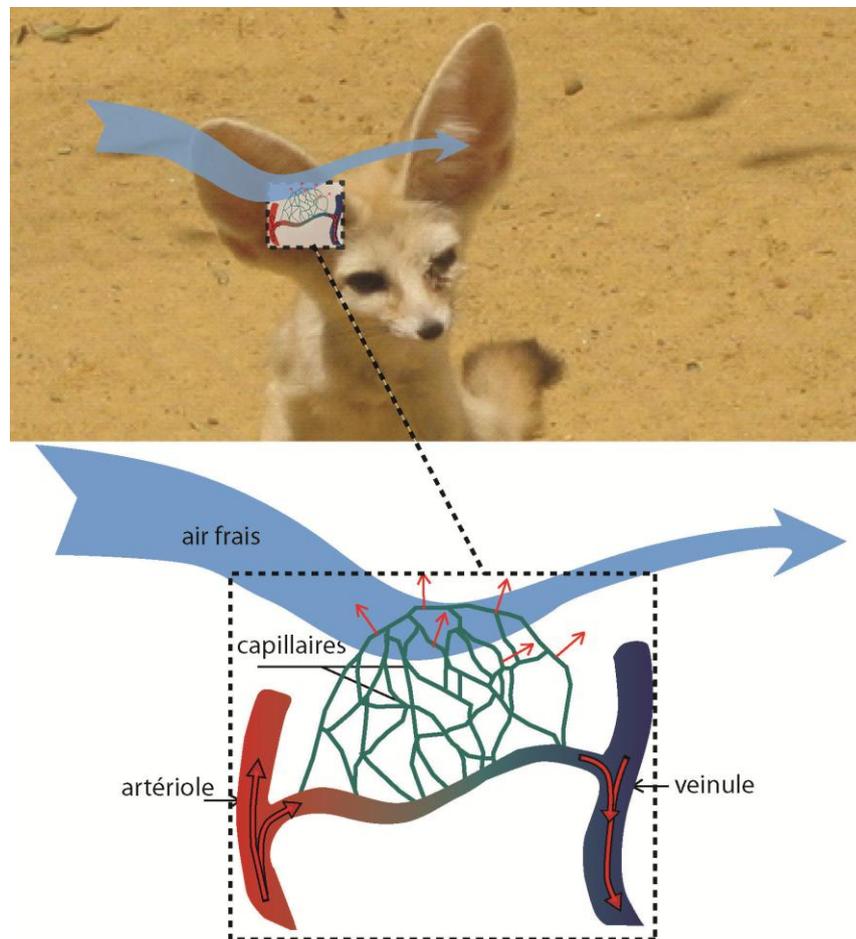
*Figure 3.5: Des animaux restent aux caves fraîches ou se déplacent rapidement pour éviter le gain de chaleur*

### 3.1.1.2 Perdre la chaleur interne

Dans les zones chaudes, les animaux utilisent différentes méthodes pour perdre la chaleur interne. Ce processus conserve leur stabilité thermique.

Au contraire avec la fonction de l'isolation thermique des peaux poilues, ils peuvent agir inversement comme des moyens de perdre de la chaleur. Les poils des éléphants, par exemple, agissent comme des ailettes qui augmentent la surface d'échange et donc les transferts thermiques du corps vers l'extérieur.

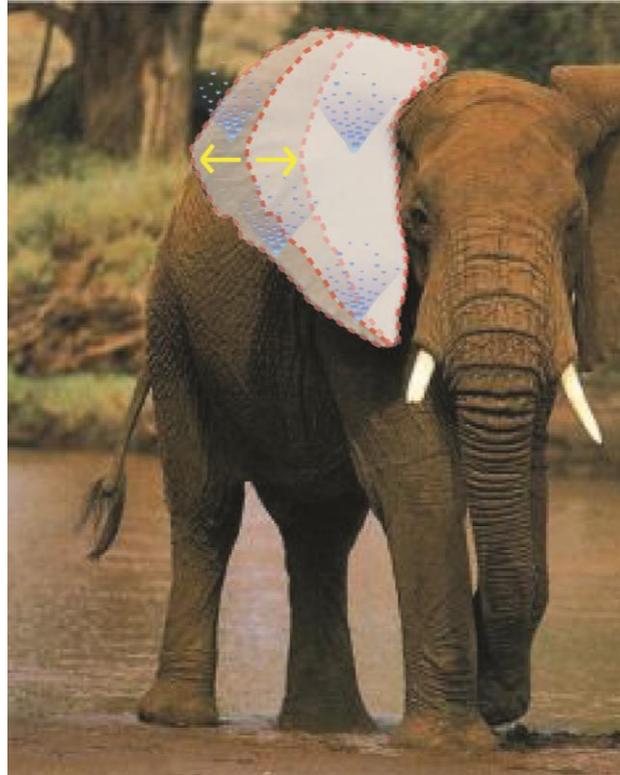
L'augmentation de la surface d'échange thermique est une méthode utilisée aussi par plusieurs animaux qui vivent dans les zones chaudes comme les renards de sable, les fennecs, les éléphants et les lièvres. Ces animaux ont des oreilles évoluées de grande taille pour servir de radiateurs de chaleur [Costa, 1995, P50] [BI, En ligne]<sup>2</sup>. Cette oreille élargie contient normalement grand nombre de capillaires (figure 3.6). Dans ce cas là, le sang transfère la chaleur interne du corps vers ces radiateurs qui perdent la chaleur par convection.



**Figure 3.6:** Le renard des sables et le fennec ont des grandes oreilles qui fonctionnent comme des radiateurs de chaleur (le chercheur).

<sup>2</sup> The Biomimicry Institute, "Large ears used to cool off: Jackrabbit", voir (<http://www.asknature.org/strategy/a250478ba7f69e68c71405d931c91d62>)

Dans certains animaux le mouvement régulier de leurs oreilles accélèrent le processus d'évaporation qui par conséquent régule la température corporelle (figure 3.7).



*Figure 3.7: L'éléphant régule sa température corporelle grâce à une vascularisation très importante existante dans ses grandes oreilles et le mouvement régulier de ces oreilles qui incite le processus d'évaporation (le chercheur).*

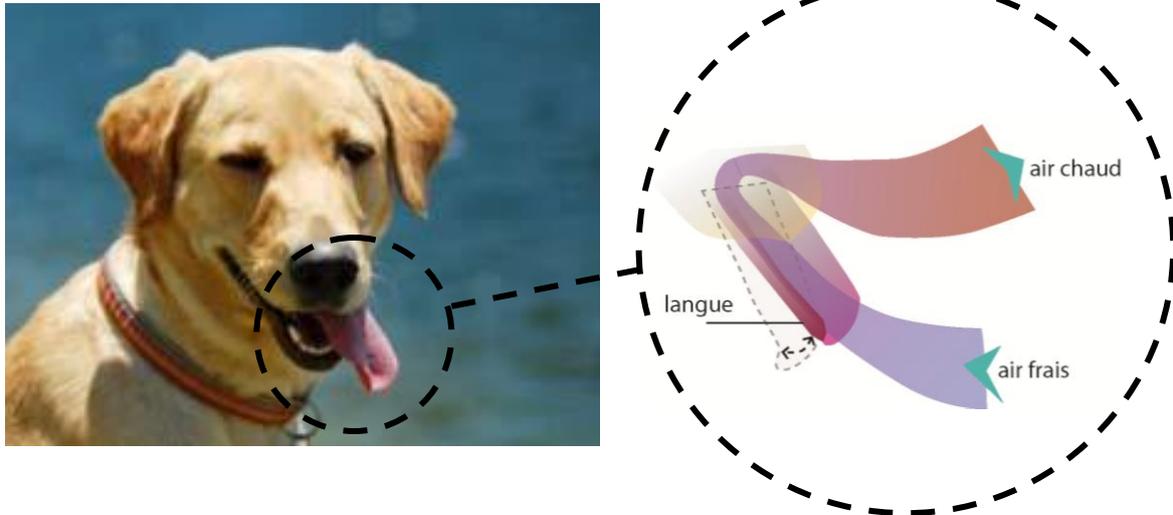
La transpiration ou la sudation est la production et l'évacuation de la sueur par les pores de la peau ou au travers de certaines muqueuses. L'existence d'une transpiration par la peau et les poumons a été démontrée expérimentalement pour la première fois en 1614, par Santorio, médecin italien. Les glandes sudoripares de nombreux mammifères aident à la thermorégulation du corps grâce à un refroidissement par évaporation [BI, En ligne]<sup>3</sup>.



*Figure 3.8: La sudation comme une façon de refroidissement par évaporation pour certains animaux.*

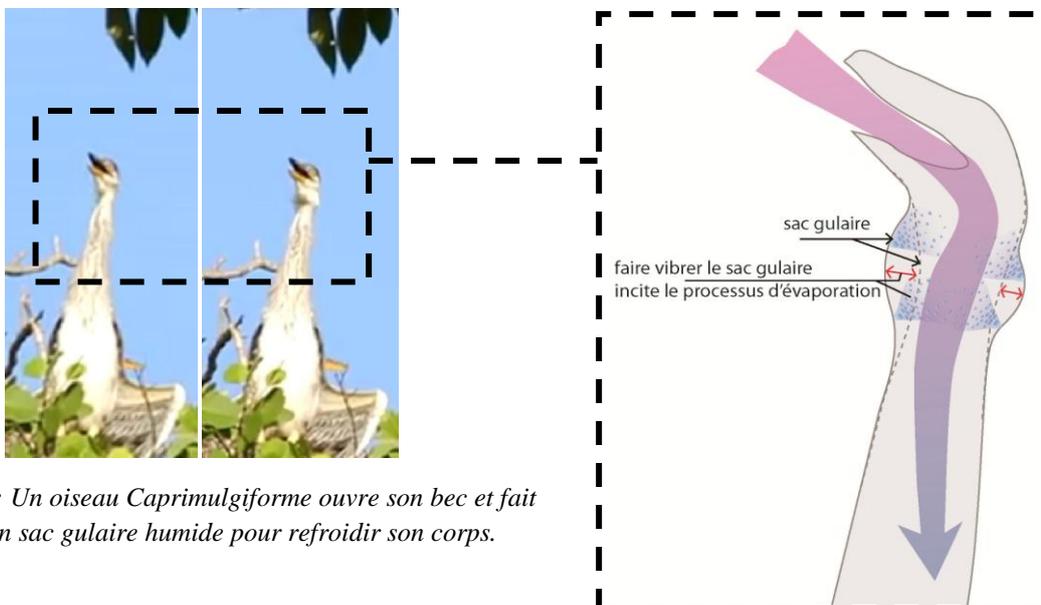
<sup>3</sup> The Biomimicry Institute, "Sweating aids thermoregulation: mammals", voir (<http://www.asknature.org/strategy/e427ca4215ca4bc83ab647869c2643c9>)

Les animaux qui ne peuvent pas transpirer efficacement ou avoir de la sueur, halètent. Leur langue, ainsi que les nombreux vaisseaux sanguins qu'elle contient, se refroidit par évaporation de l'eau. Le sang est donc lui aussi refroidi, et comme il y a des veines partout, il va refroidir à son tour l'ensemble du corps de l'animal. [Costa, 1995, P50] [W. F., En ligne]<sup>4</sup>.



**Figure 3.9:** Les chiens halètent pour refroidir leurs langues et réguler leurs températures (le chercheur).

Beaucoup de Caprimulgiformes, comme l'Engoulevent du désert, ont la capacité de résister aux hautes températures. Les oiseaux de ce genre sont plus fréquents dans les climats chauds. Bien qu'ils soient nocturnes ou crépusculaires, ils peuvent être longuement exposés au soleil. Dans ces circonstances, ils évitent l'hyperthermie en utilisant des stratégies de refroidissement par évaporation à travers l'ouverture de leurs becs, tout en augmentant le débit sanguin, et en faisant vibrer rapidement le sac gulaire humide (figure 3.10) [BI, En ligne]<sup>5</sup> [Fowler et Miller, 2003, p 225] [Lasiewski, 1969, p1504]



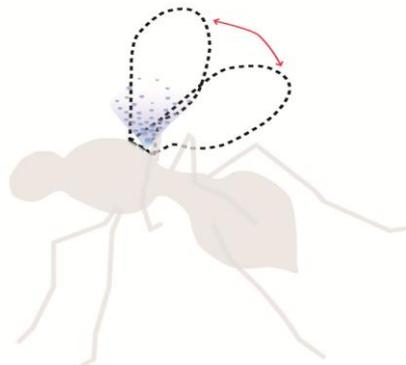
**Figure 3.10:** Un oiseau Caprimulgiforme ouvre son bec et fait vibrer son sac gulaire humide pour refroidir son corps.

<sup>4</sup> Wikipedia foundation, "thermoregulation", voir (<http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoregulation>) )

<sup>5</sup> The Biomimicry Institute, "Gular fluttering dissipates heat: nightjars", voir (<http://www.asknature.org/strategy/df479edb10713dec0097de25edf20b80>)

Chez les vertébrés, les vaisseaux sanguins régulent la température en permettant plus de flux sanguin à proximité de la peau lorsque le refroidissement est nécessaire et en limitant le flux sanguin vers la peau lorsque la chaleur doit être conservée [BI, En ligne]<sup>6</sup>. Le climat chaud produit une action vasodilatation artériole, ce qui est du processus de relaxation des muscles lisses dans les parois des artéioles permettant l'écoulement accru de sang dans l'artère. Cela redirige le sang dans les capillaires superficiels de la peau afin d'augmenter la perte de la chaleur par convection et conduction [P. W., En ligne]<sup>7</sup>.

Les fourmis ont leurs moyens pour réguler leurs températures internes. Lorsqu'une fourmi vient de l'ombre et rentre dans une zone ensoleillée, des petits organes « air scoops » sur son côté vibrent en sortant une quantité de vapeur d'eau. Ce processus diminue la température interne de la fourmi par un processus de refroidissement par évaporation (figure 3.11) [Bodanis, 1992, p39] [BI, En ligne]<sup>8</sup>.



*Un système de refroidissement par évaporation se fonctionne automatiquement quand un fourmi rentre dans une zone ensoleillé. Des petits organes vibrent en accélérant un processus d'évaporation.*

**Figure 3.11:** Les fourmis utilisent aussi un système de vibration pour accélérer le processus d'évaporation.

<sup>6</sup> The Biomimicry Institute, "Blood vessels regulate temperature: vertebrates", voir (<http://www.asknature.org/strategy/3e94c418c44b28c8ebc4d1695a48471b>)

<sup>7</sup> The psychology wiki, "Thermoregulation (body)", voir ([http://psychology.wikia.com/wiki/Thermoregulation\\_%28body%29](http://psychology.wikia.com/wiki/Thermoregulation_%28body%29))

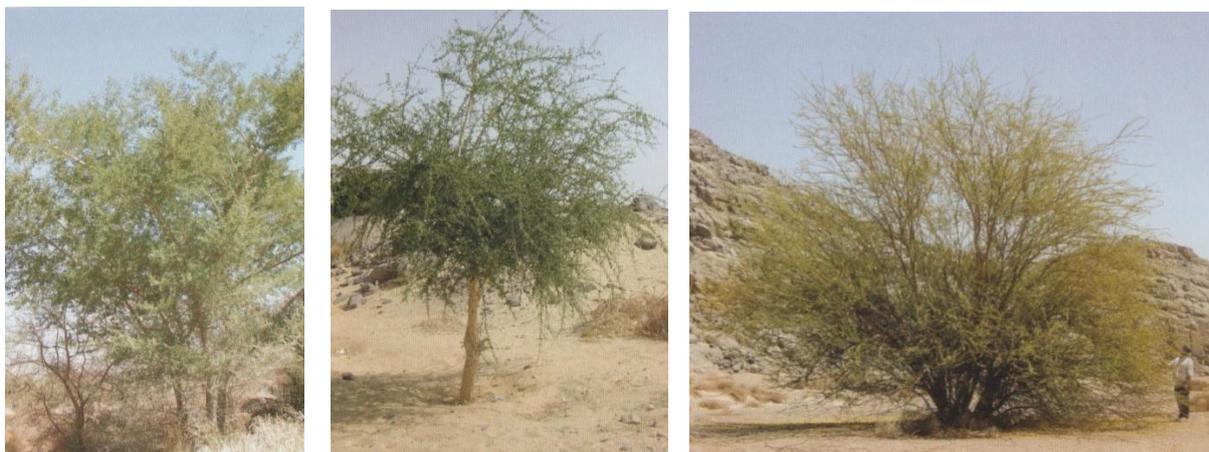
<sup>8</sup> The Biomimicry Institute, "Air scoops provide cooling: Ants", voir (<http://www.asknature.org/strategy/679517306e815ab19b4b04ba75a543eb>)

### 3.1.2 Adaptation des plantes au climat chaud

Au Sinaï, la flore se compose essentiellement d'acacias, de saules, d'oliviers, de figuiers, de palmiers et d'arbustes tels que le Capparis vert (câprier), l'Artemisia judaica (armoïse), la menthe, etc [Siliotti, 2000, p.12-13, 18] [Zalat, 2008, p.57-113] [Springuel, 2006, p.64-138]. Il peut sembler étrange que les plantes, les arbres et les arbustes puissent grandir dans de telles conditions climatiques dures, mais leur capacité d'adaptation au climat est vraiment incroyable. Ces conditions climatiques difficiles de cette région aride ont déclenché une série de transformations dans la structure des organes des plantes et des arbustes, ajoutant de nouvelles fonctions pour leur permettre de rester en vie, en suivant de nombreuses méthodes d'adaptations au climat chaud.

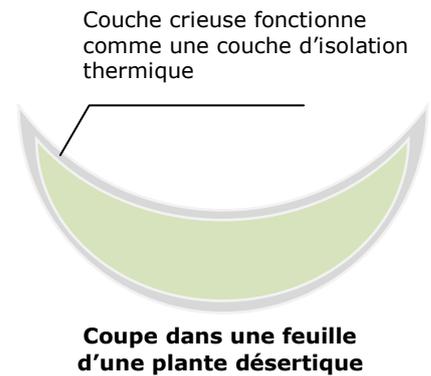
#### 3.1.2.1 Éviter le gain de chaleur

Les plantes qui existent dans ces zones chaudes telles que le Sinaï ont des feuilles denses et petites ou des épines et des poils au lieu des grandes feuilles afin de diminuer la surface exposée au soleil (figure 3.12). Ces petites feuilles et épines créent une couche d'isolation contre le gain de chaleur, tout en permettant à l'air frais de passer entre elles [Gibson, 1996, p.26-29] [Springuel, 2006, p.23] [Batanouny, 2001, p.119].



**Figure 3.12:** Petites feuilles de *Faidherbia albiada*, *Balanties aegyptiaca* et *Acacia ehrenbergiana*, Vallée d'Allaqi, Sinaï.

Les plupart des plantes désertiques ont des couches externes épaisses. Ces couches sont couvertes par des matériaux cireux qui réduisent la perte de l'eau, en même temps elles évitent le gain de chaleur de l'extérieur [Earlham Collage, 2006].



**Figure 3.13:** Des feuillets couverts par des matériaux cireux formant une couche d'isolation thermique.

D'autres plantes ont des cellules qui peuvent absorber l'humidité et la stocker, en créant une couche isolante contre la chaleur (figure 3.14) [Batanouny, 2001, p.116].



**Figure 3.14:** Feuilles de plantes de la côte Est du Sinaï. Elles stockent l'eau en créant d'une couche d'isolation thermique.

La photosynthèse se déroule plus rapidement chez les Rhizophora (type de mangrove) (figure 3.15) à une température de 25°C, se réduit nettement au-dessus de 35°C. Toutefois, pour maximiser la photosynthèse d'une feuille, le Rhizophora doit se positionner en face du soleil afin de maximiser la lumière incidente. Cette position des feuilles a le désavantage de maximiser également le gain de chaleur, ainsi la température d'une feuille augmente rapidement de 10-11°C au-delà de la température de l'air.



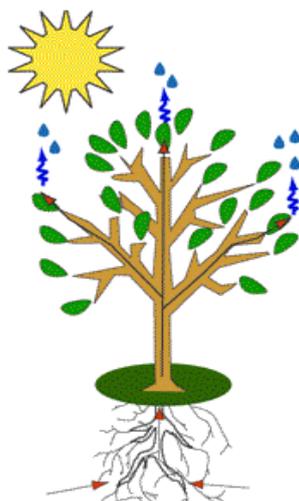
*Figure 3.15: Mangrove, Sud du Sinäi.*

Une solution à laquelle la plante a recours pour réduire la température c'est d'augmenter le taux de transpiration en perdant la chaleur par évaporation. Or, les mangroves ne peuvent pas le faire. Par contre, ces plantes peuvent tenir leurs feuilles suivant un certain angle afin de minimiser le gain de chaleur. Cet angle varie entre  $75^\circ$  si la plante est bien exposée au soleil et  $0^\circ$  si l'ombre est complète.

Le refroidissement est également renforcé par la forme des feuilles. Ces petites feuilles perdent plus de chaleur par convection que les grandes feuilles. Les feuilles exposées en plein soleil et soumises à la chaleur sont plus petites que celles qui sont ombragées [Ball et al, 1988] [Hogarth, 1999, p17].

### 3.1.2.2 Perdre la chaleur interne

Les plantes désertiques améliorent l'ambiance thermique qui les entoure par la perte de chaleur à travers le processus de la transpiration, dans lequel la plante transporte l'eau du sol autour de ses racines aux feuilles, puis s'évapore par des ouvertures spécialisées appelées stomates (figure 3.16) [Gibson, 1996, p.30] [Batanouny, 2001, p.116]. Ce processus ressemble au processus de transpiration ou de sudation existant chez l'être humain et les animaux. Ce processus de transpiration crée aussi un circuit d'eau dans toutes les branches et les feuilles ce qui aide à réguler la température interne en évitant la mort des plantes.



*Figure 3.16: Le processus de transpiration.*

## 3.2 Analyser les systèmes biologiques d'adaptation climatique aux climats chauds

Malgré les conditions climatiques dures dans le Sinaï, de nombreux moyens et différentes méthodes d'adaptation aux climats chauds et arides sont élaborés et utilisés par la plupart des organismes vivants. Ces méthodes d'adaptation concernent essentiellement des caractéristiques physiques, des comportements ou des processus de refroidissement.

Les caractéristiques physiques aident à réduire le gain de chaleur par plusieurs moyens : des petites surfaces exposées au soleil, de grande proportion de volume interne par rapport à la surface, des couleurs claires ou pâles, ou par l'utilisation d'une isolation thermique à travers la présence d'une couche externe cireuse et épaisse ou avec des épines et des feuilles petites et denses.

### Réduire le gain de chaleur

- Couleur claire
- Petite surface exposée
- Couche d'isolation (épaisse, cireuse, peau)

Outre ces considérations physiques, des comportements remarquables sont adoptés par les vivants. Certaines plantes, comme celles des mangroves dans le sud du Sinaï, évitent l'exposition directe au soleil. Elles tournent leurs feuilles afin de réduire le gain de chaleur, tandis que certains animaux, comme les lézards, restent dans des terriers ou dans des zones ombragées. D'autres se déplacent rapidement ou soulèvent leur corps loin du sable chaud.

### Réduire le gain de chaleur

- Feuilles tournants
- Rester dans des terriers / zones ombragées
- Déplacer rapidement

Le troisième groupe des méthodes d'adaptation au climat chaud est la création de systèmes de refroidissement passifs. Ces méthodes dépendent généralement de la géothermie, du refroidissement par évaporation ou de la ventilation naturelle pour libérer la chaleur interne par convection.

En cas de disponibilité de l'eau, des plantes, des animaux ainsi que les êtres humains réduisent leur température interne par évaporation à travers le processus de transpiration ou de sudation. Certains animaux induisent l'évaporation par la vibration rapide de quelques organes humides, tandis qu'autres animaux et les êtres humains induisent la sudation en augmentant le flux sanguin vers leur peau.

La ventilation naturelle est également utilisée comme moyen important de refroidissement des corps vivants. Certains animaux ouvrent leur bouche et halètent rapidement afin de faire sortir la chaleur interne. D'autres utilisent de grandes oreilles qui fonctionnent comme des radiateurs de chaleur en bénéficiant de la ventilation naturelle, tandis que le troisième groupe augmente le flux sanguin pour transférer la chaleur vers leurs surfaces externes qui agissent avec l'aide de la ventilation naturelle comme des libérateurs de chaleur.

### Méthodes de refroidissement

- Rester sous terre (géothermie)
- Transpiration/sudation (évaporation)
- Indicer l'évaporation par vibration
- Ventiler certains organes humides (ventilation naturelle)
- Ventiler certains organes radiants (ventilation naturelle)

### 3.2.1 Concepts architecturaux s'inspirant de la nature

Dans la partie précédente, des nombreux exemples biologiques d'adaptation au climat chaud et aride ont été présentés. Ils sont basés sur différentes méthodes pour surmonter les défis climatiques des températures élevées et de la rareté de l'eau. Ces méthodes visent :

- à éviter l'exposition au soleil en gagnant moins de chaleur,
- à éliminer la chaleur par plusieurs moyens ou
- à réaliser des systèmes de refroidissement passif surtout par évaporation.

Ces concepts naturels d'adaptation pourraient être considérés comme une base conceptuelle pour une gamme de solutions architecturales adaptée au climat du Sinaï. Le tableau suivant montre les exemples trouvés dans la nature en expliquant leurs méthodes d'adaptation thermique. Ces idées peuvent être transformées en concepts architecturaux, ce qui peut aider à améliorer le comportement thermique de nos bâtiments existants dans le Sinaï. Le tableau suivant résume ces systèmes d'adaptation au climat chaud et les idées tirées et peuvent-être appliquer dans l'architecture.

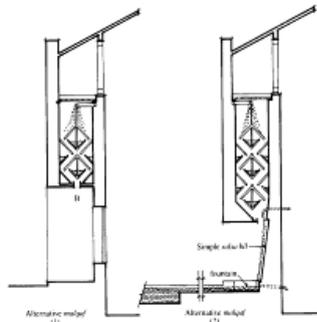
Table 3.1 : Concepts architecturaux inspirés par les méthodes d'adaptation climatique de la flore et la faune du Sinaï

Nature du Sinaï	Système d'adaptation climatique appliqué	Méthode de refroidissement utilisée	Idée d'application dans le domaine de l'architecture
<b>ANIMAUX</b>			
<b>La plupart des animaux</b>	La sudation	Refroidir la surface de la peau par évaporation à l'aide de la ventilation naturelle	Refroidir les façades par évaporation.
<b>Les renards des sables (les fennecs)</b>	Grands oreilles pour fonctionner comme des radiateurs de chaleur	Utiliser la ventilation naturelle pour éliminer la chaleur à travers quelques organes	Créer quelques dispositifs architecturaux comme la tour à vent pour perdre la chaleur interne d'un bâtiment.
<b>Les chiens</b>	Le halètement	Refroidir certains éléments par évaporation à l'aide de la ventilation naturelle pour refroidir le sang qui circule partout dans le corps	Créer des circuits d'eau ou de gaz pour porter la chaleur à certains dispositifs. Refroidir ces dispositifs par évaporation.
<b>Les Caprimulgiformes (Oiseaux)</b>	L'ouverture de leurs becs, tout en augmentant le débit sanguin, et vibrant rapidement le sac gulaire	Refroidir leurs becs par évaporation en utilisant la vibration d'un élément	Utiliser un élément vibrant pour aider à l'évaporation rapide de l'eau
<b>Les fourmis</b>	De petits organes « air-scoops » sur son côté vibrent en dégageant une quantité de vapeur d'eau.	Refroidir certains éléments par évaporation en les faisant vibrer	Utiliser un élément vibrant pour aider à l'évaporation rapide de l'eau
<b>Les rongeurs</b>	Animaux nocturnes qui se couchent dans des caves fraîches pendant le jour et qui sont actifs pendant la nuit.	Éviter l'exposition au soleil	Construire des espaces sous-sol ou créer des protections contre les rayonnements directs du soleil
<b>Les reptiles</b>	Déplacement rapide Se soulever leurs corps loin du sable chauffé.	Diminuer la récupération de chaleur. Diffuser la ventilation naturelle autour du corps	Éliminer la chaleur des murs et des plafonds à travers la ventilation naturelle autour de ces éléments.
<b>Les animaux aux peaux velues</b>	Dans des conditions chaudes, les cheveux sur la peau restent à plat en formant une couche d'isolation. D'autre côté, ces poils laisse le flux d'air de passer et refroidir la peau.	Créer une couche d'isolation thermiquement active. Augmenter le flux d'air afin d'accroître la perte de chaleur par convection.	Créer une couche d'isolation active selon les conditions climatiques. Contrôler le flux d'air sur les façades selon les conditions climatiques.

<b>Nature du Sinaï</b>	<b>Système d'adaptation climatique appliqué</b>	<b>Méthode de refroidissement utilisée</b>	<b>Idée d'application dans le domaine de l'architecture</b>
<b>PLANTES</b>			
<b>Toutes les plantes</b>	La transpiration	Refroidir l'air qui entoure la plante par évaporation	Utiliser de l'eau autour du bâtiment
<b>La plupart des plantes désertiques</b>	Des feuilles denses et petites. Des épines et des poils.	Diminuer la surface exposée au soleil. Créer des ombres, des couches d'isolation thermique permettant de passer la ventilation naturelle.	Créer des façades multifonctionnelles (Protection contre le soleil, couches d'isolation permettant à la ventilation naturelle de passer)
<b>Le cactus</b>	Couches épaisses avec des matériaux cireux.	Protection contre le rayonnement direct du soleil.	Créer une couche contre le rayonnement direct du soleil.
<b>Autres plantes</b>	Cellules qui peuvent absorber l'humidité et la stocker	Créer une couche isolante contre la chaleur par absorption de l'humidité ou de l'air frais.	Bénéficier de l'humidité et de la ventilation naturelle afin de créer des couches d'isolation thermique.
<b>Mangroves</b>	Changer le positionnement des feuilles	Ajuster l'angle des feuilles afin de minimiser le gain de chaleur.	Contrôler l'angle des brise-soleil selon les besoins.

### 3.2.2 Similarité entre les systèmes de refroidissement biologiques et architecturaux

Généralement, on peut facilement observer la similitude des concepts de refroidissement entre les systèmes biologiques et architecturaux (figure 3.17). La similarité est claire entre la fonction des oreilles du renard et de la tour à vent, le comportement des rongeurs et les bâtiments souterrains ou les systèmes de refroidissement par geocooling, la transpiration et le refroidissement par évaporation, et l'ajustement de l'angle des feuilles et des brise-soleil, etc.



Les oreilles du renard et les tours à vent bénéficient de la ventilation naturelle pour perdre la chaleur



Les bâtiments souterrains évitent les rayonnements solaires comme les rongeurs qui restent dans un terrier pendant le jour.



Le refroidissement par évaporation utilisé comme méthode de refroidissement passif ressemble au processus de sudation et de transpiration.



Les fleurs et les feuilles se tournant pour capter ou éviter les rayonnements solaires inspirent les architectes pour concevoir des bâtiments et des brise-soleil tournants

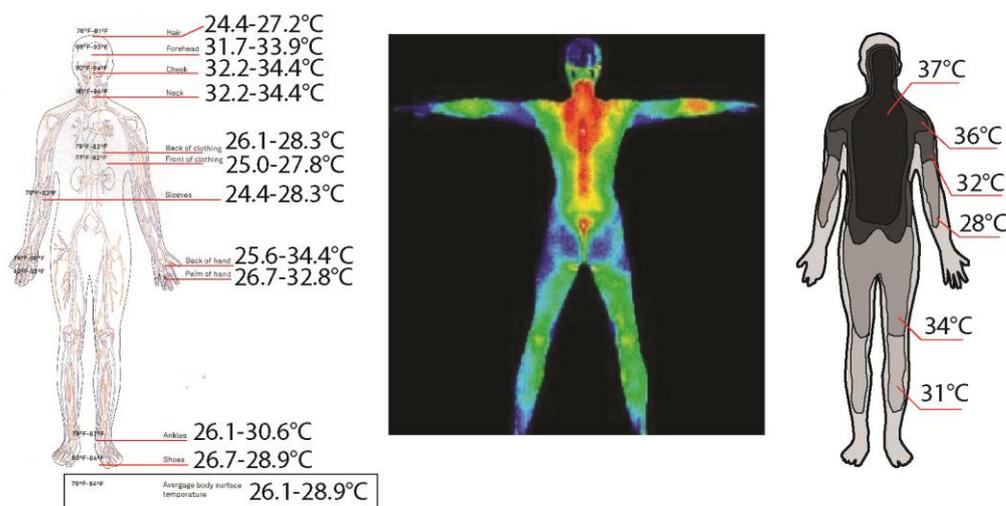
Figure 3.17: La similarité des exemples de refroidissement entre les systèmes biologiques et architecturaux.

Ces observations de similarité confirment que l'architecture tente d'imiter les systèmes de refroidissement naturels, mais elle soulève également des questions sur les raisons pour lesquelles ces systèmes architecturaux de refroidissement et de ventilation n'ont pas atteint les mêmes résultats impressionnants que les systèmes biologiques.

Malgré la similitude des concepts entre les systèmes de refroidissement architecturaux et les systèmes biologiques, l'un des points les plus faibles est l'imitation des caractéristiques physiques, des comportements et des systèmes de refroidissement sans examiner le processus complet de thermorégulation. Ces méthodes de refroidissement qui se composent en partie d'un processus plus large qui est le processus de thermorégulation vise à contrôler la température interne du corps.

### 3.3 La peau naturelle et son rôle dans le processus de thermorégulation

Le processus de thermorégulation est un processus naturel et complexe vise à réguler les températures internes de corps de nos corps à travers la production de chaleur ou le perdre de chaleur. Chez les animaux homéothermes, ce processus est pour effet de maintenir la température du noyau central autour une température stable et constante. Dans le corps humain, cette température est égale à 37°C. Les températures des autres parties du corps sont différentes (figure 3.18). Chaque organe demande une température spécifique et si cette température est changée, l'organe ne fonctionne pas correctement. Cette variation de température demandée par les organes du notre corps crée une gamme de température interne autour 37°C ce qui ressemble beaucoup le concept de paysage thermique ou Gulfstream proposé par Philippe Rahm.



Les températures de la peau

Les températures à l'intérieur du corps humain

**Figure 3.18:** Les températures du corps humain.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> [Moe, 2010] et <http://exercisephysiologist.wordpress.com/2012/02/15/the-human-homoeothermy/>

Ce processus est responsable donc d'atteindre ces températures nécessaires par l'échange thermique avec l'environnement et des processus de refroidissement naturels. La plupart d'échange thermique se passe par radiation entre le corps et les éléments qui l'entourent. La radiation est responsable de à peu près de 47% de l'échange thermique qui se passe entre notre corps et l'environnement, tandis que la conduction, la convection, l'évaporation et les autres moyens de transfert de chaleur sont responsable pour à peu près 53% (figure 3.19) [Moe, 2010, p.68].

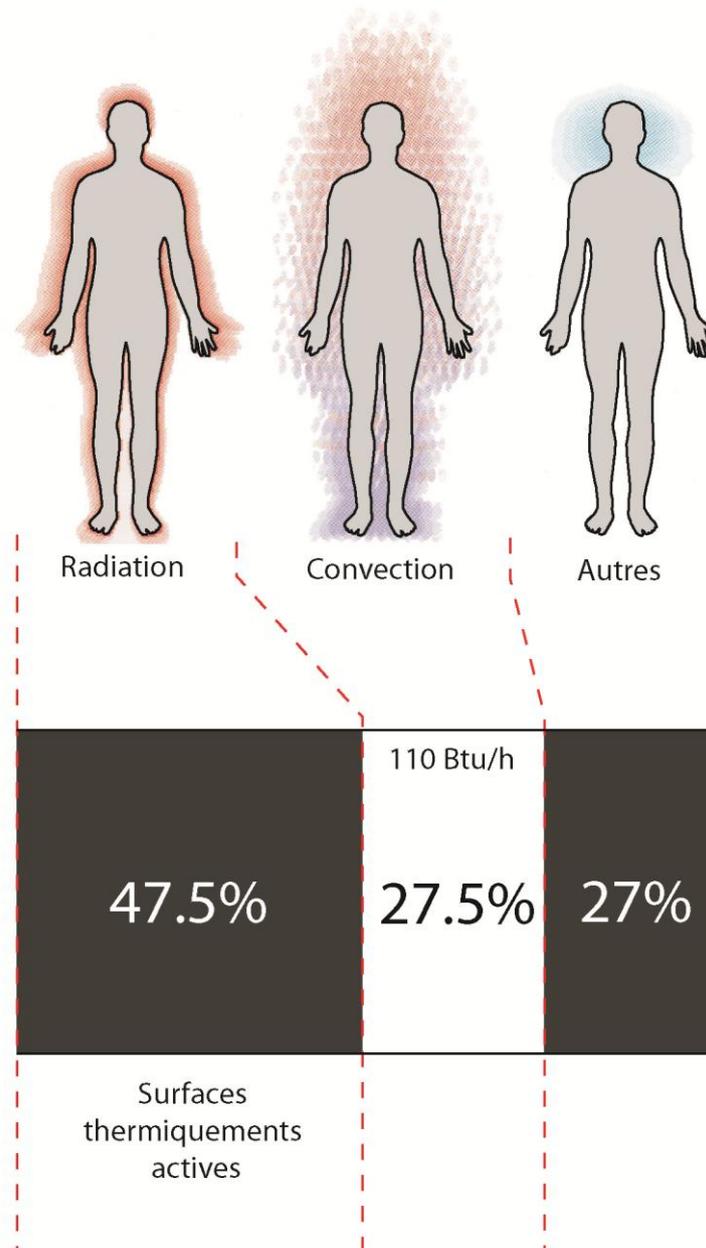
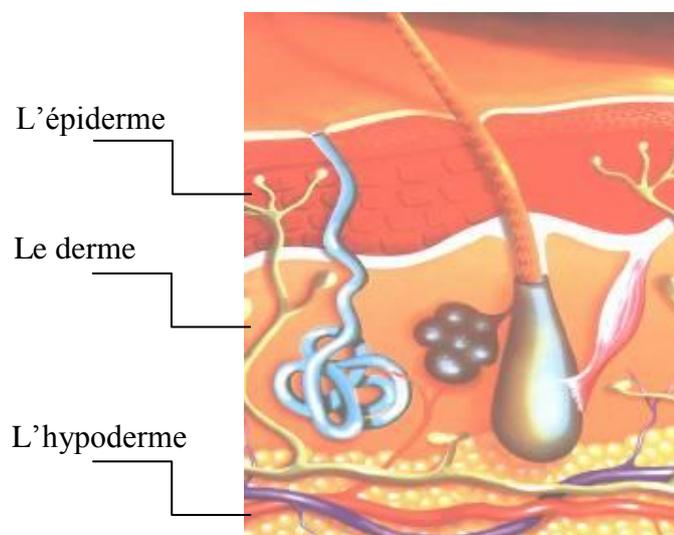


Figure 3.19: Transfert de chaleur dans le corps humain [Moe, 2010, p.69]

Le processus de thermorégulation dans nos corps dépend d'un système circulatoire de la chaleur entre le noyau du corps et sa peau pour perdre la chaleur par le contact direct avec l'air ambiant. La peau biologique joue donc un rôle important dans le processus de thermorégulation. Elle fonctionne comme une couche d'adaptation thermique entre les organes internes et l'air ambiant à l'extérieur du corps. Ce rôle est très différent du rôle des façades qui fonctionnent comme couches d'isolation thermique entre les espaces. Cette différence nous incite à analyser la fonction de la peau naturelle et à approfondir l'étude de son rôle dans le processus de thermorégulation. Cette approche nécessite d'abord une compréhension profonde de l'anatomie de la peau naturelle et de ses principes d'adaptation thermique au climat chaud, comme une étape pour appliquer ces principes sur les façades.

La peau est d'environ 15% de la masse corporelle, et elle est considérée comme le plus grand organe du corps. Elle est chargée de régler la température du corps à travers des échanges entre le système circulatoire sanguin et le système tégumentaire. Ainsi, toute la surface de la peau naturelle est considérée d'un côté comme un système de transfert de chaleur et d'autre côté une source de chaleur pour le corps [Moe, 2010].

Afin de bien analyser le rôle thermique de la peau de l'homme et de nombre d'animaux dans le processus de thermorégulation, il faut d'abord connaître l'anatomie de notre peau. Cet organe est composé de trois couches principales (figure 3.20); La couche superficielle 'l'épiderme', la couche interne nommée 'le derme' et une couche plus profonde 'l'hypoderme'. Ces trois couches contiennent des éléments différents qui jouent un rôle pour conserver la température de notre corps à environ 37°C [Wigginton, 2002, p.23].



**Figure 3.20:** La peau de l'homme comprend trois couches principales : l'épiderme, le derme, l'hypoderme. [Wigginton, 2002, p.23].

### 3.3.1 Le rôle thermique de la peau de l'homme

Ces couches jouent un rôle thermique important afin de maintenir l'équilibre thermique de notre corps. La sécrétion de sueur intervient dans la régulation de la température corporelle. Si la température du corps est en surchauffe, les sens thermiques de l'homme envoient des alertes vers le cerveau pour activer les glandes sudoripares. Les glandes sudoripares peuvent refroidir le corps par l'humidité sécrétée qui s'évapore, et refroidir la surface du corps. Le processus de la sudation augmente avec la température et provoque plus de rafraîchissement grâce à l'évaporation en surface. Il diminue lorsque la température baisse.

La couche interne contient des vaisseaux sanguins qui peuvent aussi réguler la température interne par échange thermique avec l'air par conduction. Cet échange thermique peut augmenter si la pression artérielle s'élève [Wigginton, 2002, p.28-29].

Les mammifères ont une peau recouverte de poils. Ceux-ci interviennent dans la régulation thermique par leur rôle isolant contre le froid ou le chaud et ce, en créant une couche d'air isolante entre la peau et les poils. Le fonctionnement est identique à celui des plumes.

Le vêtement joue aussi un rôle important de point de vue thermique. Cette couche fonctionne comme une couche d'isolation et de protection contre les rayonnements solaires en créant une espace d'air isolant entre le textile et la peau. Il est préférable dans ces climats chauds de porter un textile léger et ayant des couleurs claires en permettant de laisser passer le flux d'air pour inciter l'évaporation de la sécrétion de sueur.

L'analyse de la fonction thermique de la peau de l'homme nous montre qu'elle possède certaines caractéristiques qui lui permettent d'agir comme une surface thermiquement active :

- une surface « multifonctionnelle » qui a la capacité de réduire la température du corps par la protection contre les rayonnements directs du soleil, par le processus de refroidissement par évaporation et par le contact direct avec l'air, en plus de la création de plusieurs couches isolantes.
- toute la surface de la peau participe au processus de thermorégulation de notre corps. Le processus de thermorégulation n'est pas consacré à certains éléments du corps.
- les éléments qui participent au processus de thermorégulation devraient être coordonnés et liés ensemble, d'une part avec des capteurs pour recueillir les données nécessaires et d'autre part avec le cerveau qui analyse et prend les décisions.

Les principes susmentionnés devraient être appliqués aux façades des bâtiments pour transformer leur surface d'isolation thermique en une surface thermiquement active et adaptée au climat. Une façade thermiquement active signifie qu'elle a la capacité de contrôler l'échange thermique avec l'ambiance externe et de bénéficier du vent sur toute sa surface. Autrement dit, il s'agit d'un mur qui aurait la capacité d'isoler et de respirer en même temps. Cette approche va convertir toute la surface des façades pour qu'elles fonctionnent comme des tours à vent.

### **3.3.2 Principes des façades thermiquement actives ; peau au lieu de façade**

L'idée d'ajouter certaines propriétés spécifiques s'inspirant de la peau naturelle aux façades est déjà mentionnée et appliquée par plusieurs approches récentes, mais ces approches se concentrent principalement sur l'autoréparation, les réactions automatiques et la façade multifonctionnelle. Cette approche introduit la notion de la « peau du bâtiment » ou « building skin ». Ce terme a été défini par Michael Wigginton et Jude Harris dans leur livre « intelligent skins » comme une structure externe du bâtiment qui n'est pas inerte, mais elle est toujours modifiable de façon dynamique afin de maintenir le confort en consommant le moins d'énergie possible.

Cette recherche se concentre sur l'identification des caractéristiques nécessaires pour être ajoutées aux façades du bâtiment afin de remplacer la notion de 'façade' par la notion de 'peau'. Afin de créer cette peau intelligente, nous pouvons identifier trois principes importants de la fonction de la peau naturelle dans le processus biologique de thermorégulation qui sont :

#### **3.3.2.1 Une couche thermiquement active et multifonctionnelle**

Créer des façades actives du point de vue thermique nécessite de créer une surface multifonctionnelle (figure 3.21) qui a la capacité de réguler plusieurs facteurs climatiques en même temps. Elle doit séparer l'extérieur de l'intérieur en contrôlant le passage de la ventilation naturelle et de réguler la température par le contrôle de plusieurs méthodes de refroidissement passifs : évaporation, convection par le contact direct avec l'air « refroidir la structure », conduction par le contact direct avec le souterrain « geocooling », et radiation par l'évitement des rayonnements solaires directs « protection ».

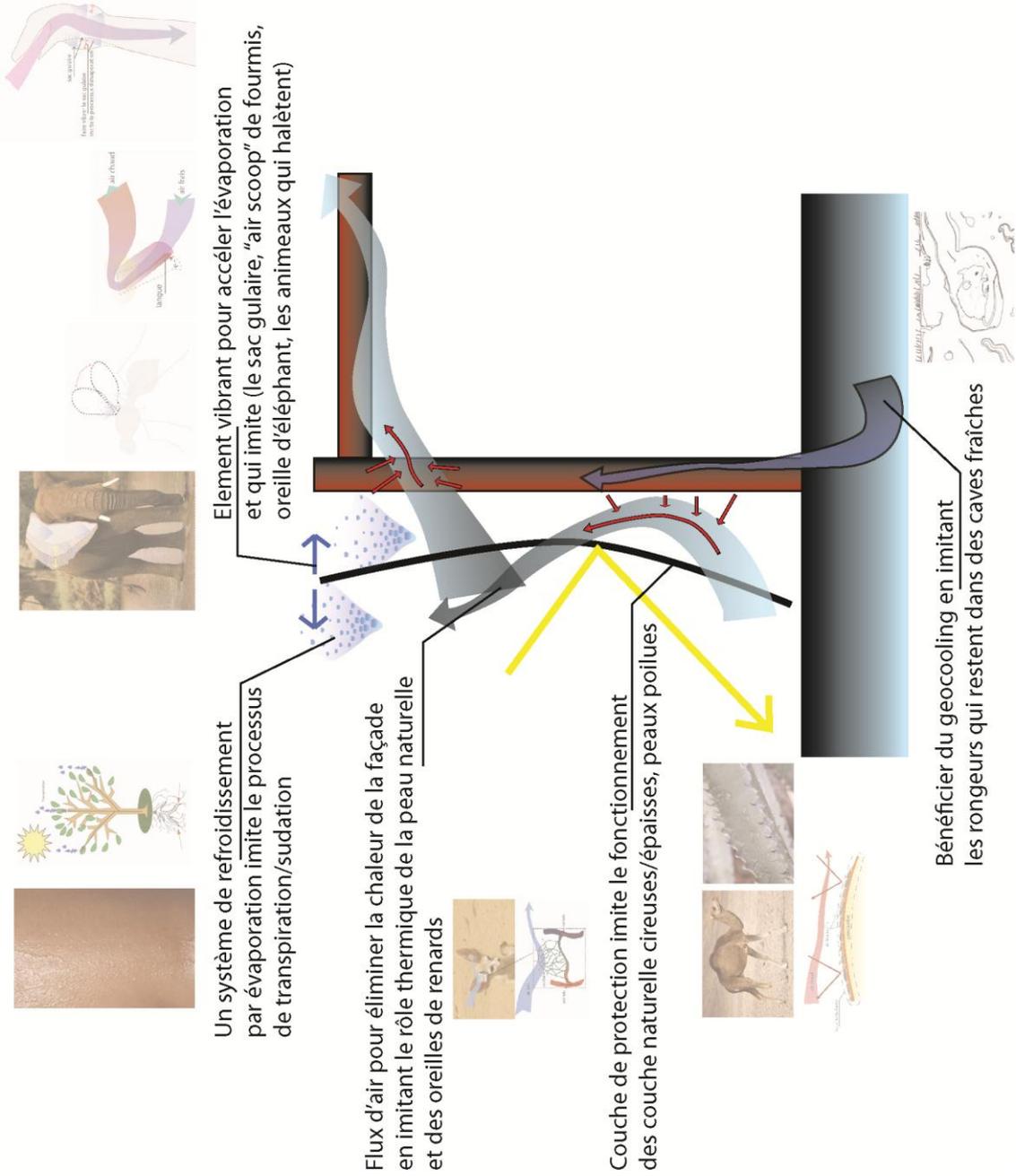
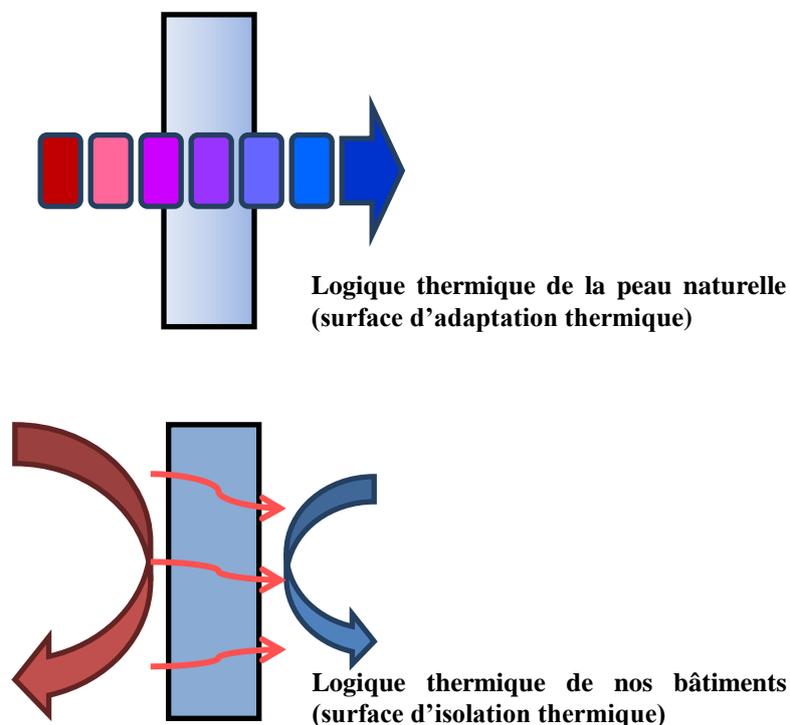


Figure 3.21: Mur multifonctionnel qui bénéficie de la nature (le chercheur).

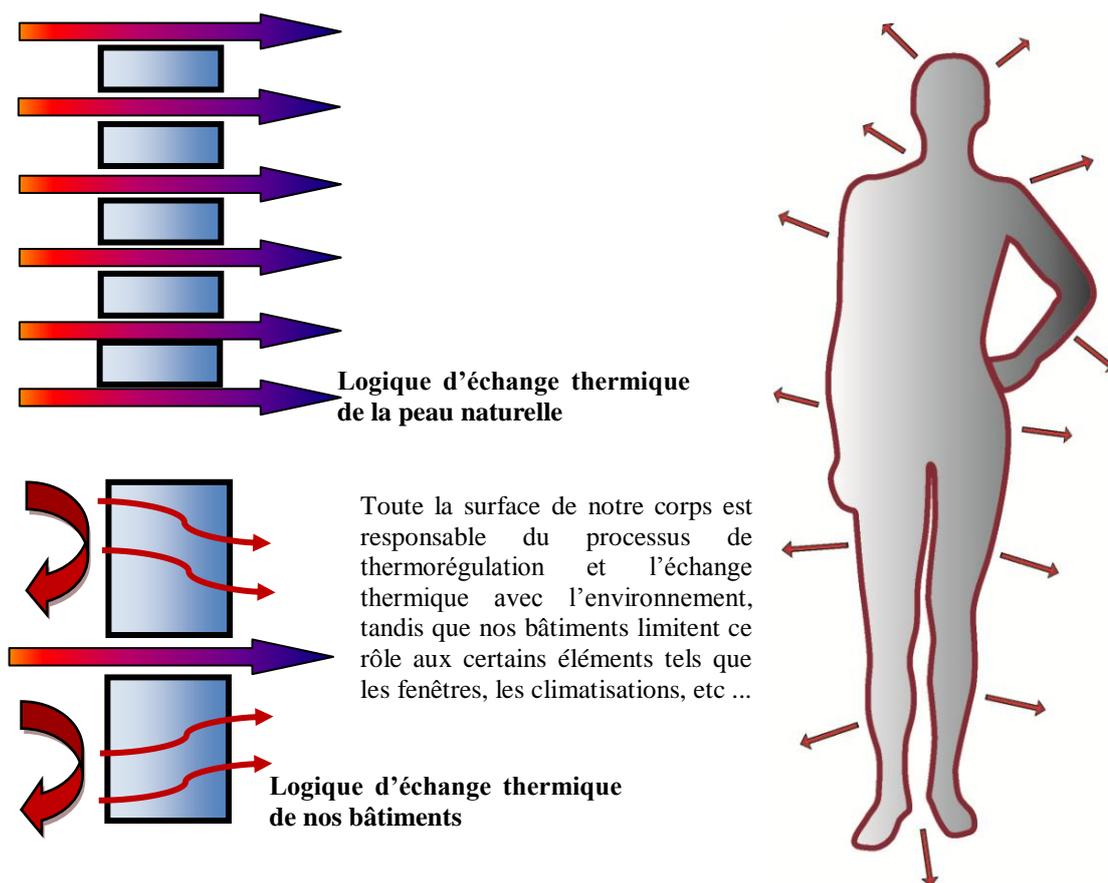
Cette approche engage les façades à utiliser les potentiels de la nature pour refroidir les espaces internes avec toute leur surface. L'application de ce concept va transformer la façade statique en surfaces thermiquement actives ayant des systèmes différents de régulation thermique (systèmes de refroidissement, systèmes de ventilation et systèmes d'isolation thermique) qui fonctionnent en harmonie les un avec les autres (figure 3.22).



*Figure 3.22: Afin d'imiter la fonction thermique de la peau, le mur doit fonctionner comme une surface d'adaptation thermique au lieu d'une surface d'isolation thermique (le chercheur).*

### 3.3.2.2 Participation de toute la surface des façades au processus de régulation thermique du bâtiment

Dans les systèmes biologiques, toute la surface de la peau naturelle joue un rôle important dans le processus de thermorégulation des organes par le contact direct entre la peau et l'air ou par le refroidissement par évaporation à travers la transpiration ou la sudation. Suivant ce concept, toute la surface des peaux naturelles fonctionne comme une partie du système de refroidissement. Bien que l'espace moderne jusqu'à maintenant soit en contact avec l'extérieur à travers certaines ouvertures en transformant les murs en couches isolantes provoquant plus ou moins un gain de chaleur (figure 3.23).



*Figure 3.23: Afin d'imiter la fonction thermique de la peau, la façade doit réguler la température par toute sa surface au lieu de consacrer cette fonction à certaines ouvertures (le chercheur).*

### 3.3.2.3 La façade doit être connectée et contrôlée

La peau biologique est bien liée aux capteurs climatiques (des sens humains) et à une unité de décision (le cerveau). Afin de créer une façade intelligente, il faut qu'elle soit connectée à d'autres équipements techniques du bâtiment en créant un système plus étendu pour régler le confort thermique dans le bâtiment. Les éléments qui participent au processus de thermorégulation devraient être coordonnés et liés, d'une part avec des capteurs pour recueillir des données météorologiques nécessaires, et d'autre part avec le SGB qui analyse et prend les décisions.

Les principes mentionnés devraient être appliqués aux façades des bâtiments pour les transformer de surfaces d'isolation thermique en surfaces thermiquement actives et adaptées aux climats. Une façade thermiquement active signifie pour cette recherche qu'elle a la capacité d'isoler et de respirer en même temps. Autrement dit, c'est un mur qui peut réguler l'échange thermique avec l'ambiance externe et bénéficier du vent sur toute sa surface. Cette approche va convertir les façades pour qu'elles fonctionnent comme des tours à vent ou en d'autre terme, elle va créer des murs qui peuvent respirer « des murs respirants » ou « breathing walls ». Ce concept du mur respirant n'est pas présenté dans cette thèse comme

---

la seule solution biomimétique qui imite les systèmes d'adaptation thermique au climat chaud, mais il est considéré comme une des solutions possibles à développer en suivant la nature et ses idées remarquables. La recherche postule que l'approche biomimétique puisse introduire beaucoup d'exemples de façade thermiquement active que le concept de mur respirant qui se concentre sur la ventilation naturelle. Dans la partie suivante, nous chercherons cette notion dans la littérature scientifique en regardant sa possibilité d'être développé et appliqué nos façades d'aujourd'hui. L'application de tel concept dans les façades changera la logique thermique d'une couche d'isolation en couche d'adaptation entre deux espaces, c'est-à-dire de réguler la température entre les espaces au lieu isoler le maximum ces espaces.

### 3.4 Un exemple biomimétique ; proposition du mur respirant

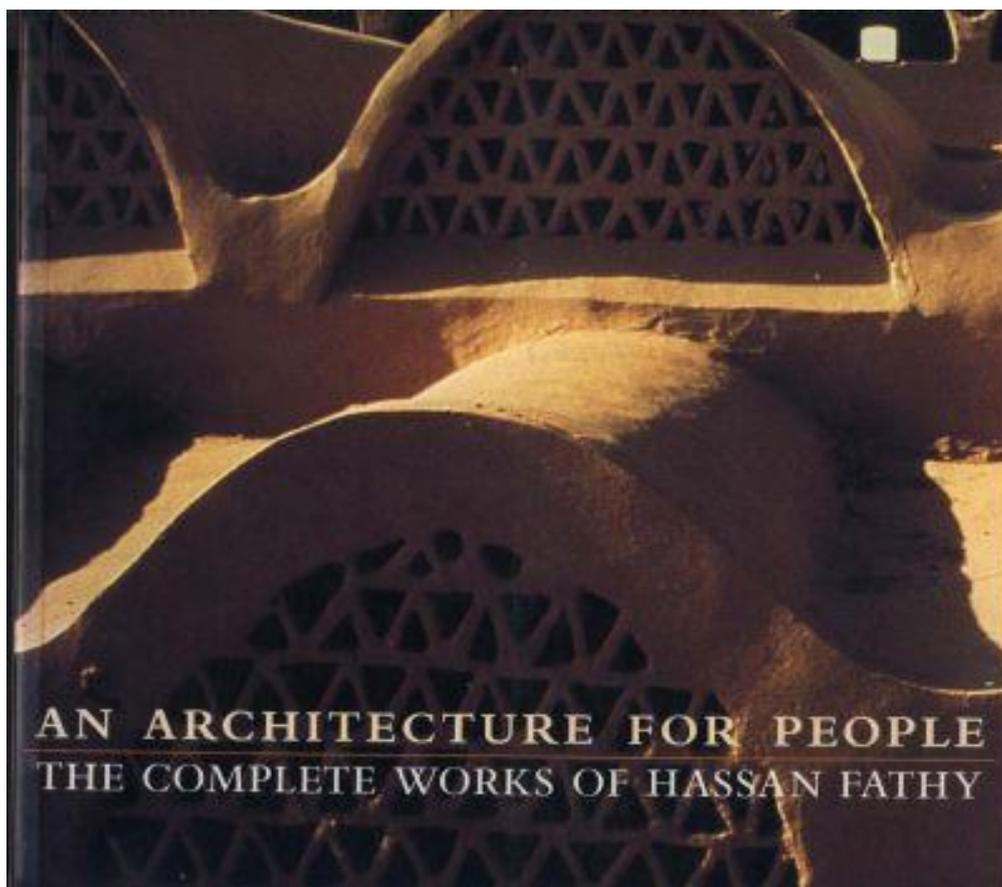
La notion de « murs respirants » est utilisée dans le domaine de la « Baubiologie » qui a été inventée en Allemagne en 1969, mais le terme lui-même est utilisé de manière imprécise. Il y a beaucoup de confusion sur ce que constitue un « mur respirant ». Bien que la « respiration » implique l'air dans la plupart de la littérature scientifique, le terme de « mur respirant » signifie simplement un mur qui est capable de diffuser la vapeur d'eau ou réguler le taux d'humidité pour assurer la qualité de l'air intérieur (IAQ) [Straube et Acahrya, 2002].

Dans les régions humides, la technologie de mur respirant permet de bénéficier d'une régulation hygrométrique naturelle avec des performances thermiques en conservant leurs qualités isolantes. Un mur respirant fonctionne grâce à un différentiel de pression intérieur-extérieur qui permet de faire migrer l'air lentement dans les murs, de l'ambiance présentant la pression la plus élevée à l'ambiance dont la pression est moins élevée avec laquelle il échange peu à peu ses calories et son eau excédentaire (figure 3.24). La définition accidentelle du « mur respirant » représente alors la régulation de l'hygrométrie et donc la régulation de la vapeur d'eau à l'intérieur du logement.



Figure 3.24: Exemple de mur respirant d'une maison à ossature en bois [Acqualys, 2011].

Au contraire, dans les régions chaudes, Hassan Fathy a utilisé le même terme, « les murs qui peuvent respirer », pour décrire la capacité qui permet au flux d'air de passer à travers des murs faits de matériaux naturels [Fathy, 1986, p. 8]. Ces matériaux organiques, comme le bois, les peaux d'animaux, les feuilles, les roseaux et l'argile absorbent l'humidité et permettent au flux d'air de passer à travers toute sa surface, en réduisant la température de l'air par évaporation. En plus de leur capacité de laisser passer le flux d'air, ces murs peuvent donc absorber l'humidité et l'utiliser pour refroidir l'espace intérieur par évaporation. Cette recherche partage la même définition de mur respirant introduite par Hassan Fathy qui signifie la capacité d'un mur à permettre au flux d'air de passer à travers sa surface.



*Figure 3.25: Hassan Fathy, architecte égyptien, a utilisé le terme de mur respirant dans son livre et l'a introduit dans ses travaux par l'utilisation des matériaux naturels absorbant l'humidité et permettant de faire passer le flux d'air afin de refroidir les espaces intérieurs.*

Suite à cette définition, nous pouvons considérer que les constructions faites par les bédouins, qui sont les habitants originaux du Sinaï, représentent des constructions respirantes (figure 3.26). Les habitants de cette région ont développé leurs propres solutions d'adaptation au climat chaud qui apparaissent clairement dans leurs constructions traditionnelles. Les tentes traditionnelles faites de peaux d'animaux et de matériaux naturels, les constructions légères faites de roseaux, ont la capacité de respirer et de réduire la température à l'intérieur.



*Figure 3.26: Des constructions respirantes construites par les bédouins (habitants originaux du Sinaï).*

En plus de ces constructions, les costumes traditionnels des bédouins (figure 3.27) peuvent être considérés comme des couches respirantes. Ces textiles noirs et lourds, bien qu'ils ne semblent pas adaptés au climat chaud, suivent la même logique. Ils évoquent le processus de la transpiration en absorbant l'humidité, en permettant à l'air de passer à travers toute la surface et en prévenant les rayonnements directs du soleil, ce qui permet de refroidir le corps humain par évaporation.

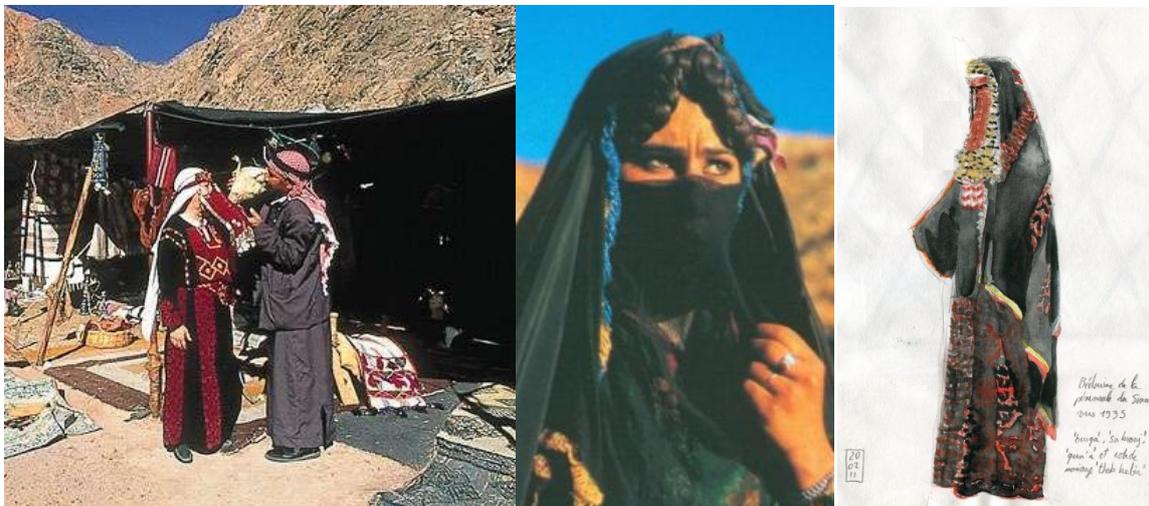


Figure 3.27: Les costumes traditionnels ne semblent pas adaptés au climat chaud, mais ils agissent comme des couches respirantes [Siliotti, 2000, p.40].

D'autre part, les façades modernes n'appliquent pas ce concept et fonctionnent selon une toute autre logique. Elles limitent la ventilation naturelle à certains points comme les fenêtres et les portes et utilisent les murs comme éléments pour isoler les espaces et non pas comme des interfaces d'adaptation thermique comme les exemples susmentionnés.

A l'inverse, nos façades d'aujourd'hui sont probablement des surfaces d'isolation thermique entre deux espaces. La recherche suppose que pour transformer nos façades inertes en façades actives, du point de vue thermique et surtout pour la ventilation naturelle, il faut que ces façades ayant la capacité de contrôler la ventilation sur toutes ses surfaces, il faut que ces murs soient capables de respirer d'une manière contrôlable. Cette recherche propose un modèle du mur respirant qui sera validé dans la partie suivante de notre recherche. Nous supposons que ce concept va améliorer le comportement thermique de nos bâtiments et peut assurer le confort thermique dans les bâtiments en régions chaudes telles que la région du Sinaï.

Un modèle conceptuel biomimétique de « mur respirant » a été développé par cette recherche. Nous proposons le concept du « mur respirant », qui s'inspire de la peau de l'homme pour créer une façade thermiquement active. Ce modèle est capable de contrôler le flux d'air sur toute la surface et fonctionne comme une couche appropriée aux bâtiments situés en zones chaudes, comme dans le Sinaï.

Ce concept vise à améliorer le comportement thermique des bâtiments par un système combiné de ventilation et de refroidissement tout en imitant le comportement thermique des peaux naturelles. L'intégration de ce concept dans les façades va transformer ces façades statiques pour fonctionner comme des tours à vent contrôlées. Par cette approche, la notion de l'enveloppe ou la façade sera changée par la notion de la peau qui peut respirer. Afin de valider l'efficacité de ce concept, ce modèle sera testé dans une expérimentation dans la partie suivante de cette thèse.

### 3.4.1 Conception du modèle du mur respirant - l'hypothèse de l'approche pratique

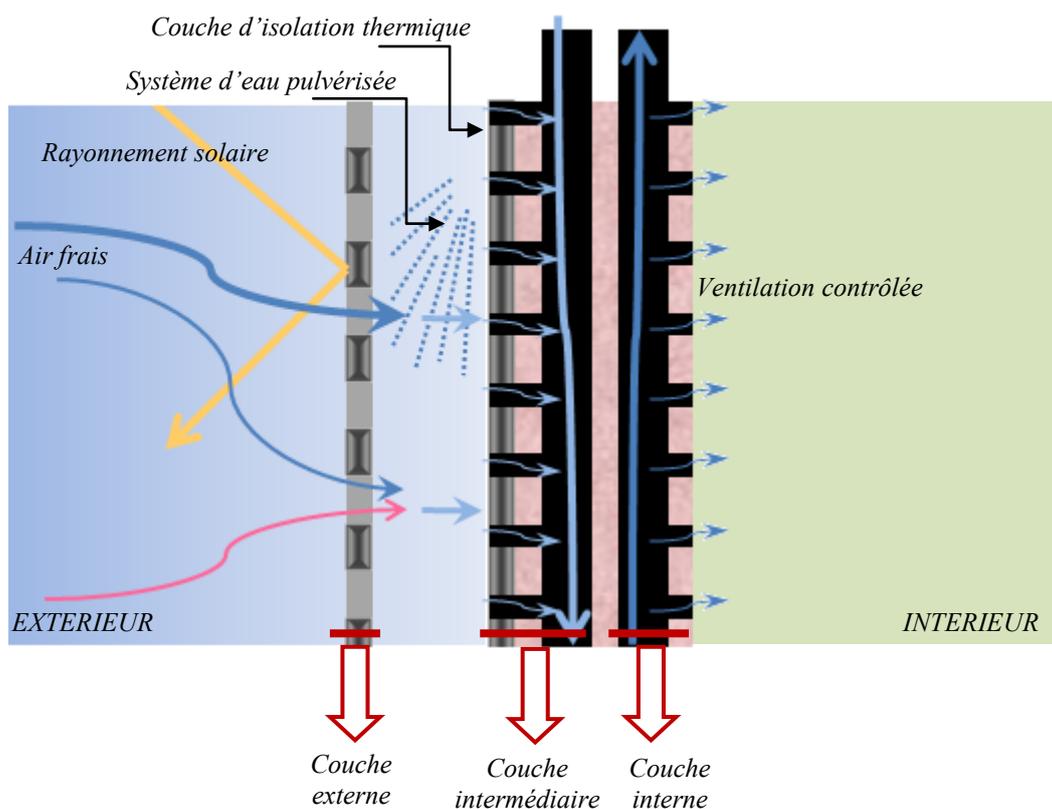


Figure 3.28: Conception du mur respirant « coupe de principe ».

En suivant les principes introduits dans le titre (3.3.2) des façades thermiquement actives, nous proposons un modèle de mur respirant qui imite la peau naturelle (figure 3.28). Ce modèle vise à minimiser l'énergie solaire reçue directement du soleil en permettant au flux d'air de passer, puis de se refroidir celui-ci et enfin d'être diffusé à l'intérieur du bâtiment. Il se compose de trois couches, chaque couche a des caractéristiques spécifiques;

La couche externe (figure 3.29), capable de prévenir ou de minimiser le rayonnement direct du soleil en permettant du flux d'air de passer par toute sa surface. Cette couche génère un volume d'air entre elle et la façade qui fonctionne comme un élément d'isolation thermique entre l'extérieur et l'intérieur en imitant les couches d'isolation trouvées dans les

plantes et les animaux désertiques (peaux poilues, couche épaisse et cireuse). Cette couche externe peut être exécutée avec un matériau qui a la capacité d'absorber l'humidité : textiles naturels, argile, bois ou roseaux, ou bien elle peut être plus sophistiquée en comportant des ouvertures ouvrantes capables de contrôler l'intensité du rayonnement du soleil en fonction de commandes nécessaires préprogrammées ou selon le désir des occupants. Si cette couche est faite par un matériel léger comme les roseaux et les textiles, la vibration de cette couche qui se produit grâce au vent naturel accélère le processus d'évaporation et par conséquent le refroidir de nos bâtiments. Ce processus existants dans la nature comme nous avons vu au debut de ce chapitre.

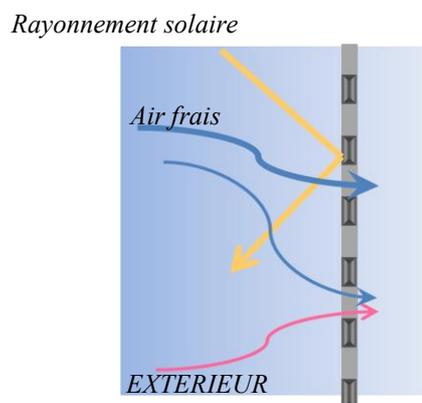


Figure 3.29: Couche externe visant à minimiser le gain de chaleur en permettant au flux d'air de passer

La couche intermédiaire (figure 3.30) qui contient des entrées d'air contrôlées, des systèmes d'eau pulvérisée et un réseau de conduits de ventilation (pour refroidir par évaporation et par conduction en faisant passer le flux d'air en sous-sol). Cette couche vise à réaliser trois tâches : l'isolation thermique de l'extérieur, le refroidissement par évaporation (en imitant le processus de transpiration / sudation), puis le contrôle des flux d'air par réseau de gaines. Ces réseaux de contrôle des flux d'air peuvent avoir des liaisons directes entre l'extérieur et l'intérieur pour une ventilation directe (figure 3.31), ou des liaisons indirectes (figure 3.30) lorsque le flux d'air contrôlé est refroidi par échange thermique en passant par le sous sol en contact avec la terre.

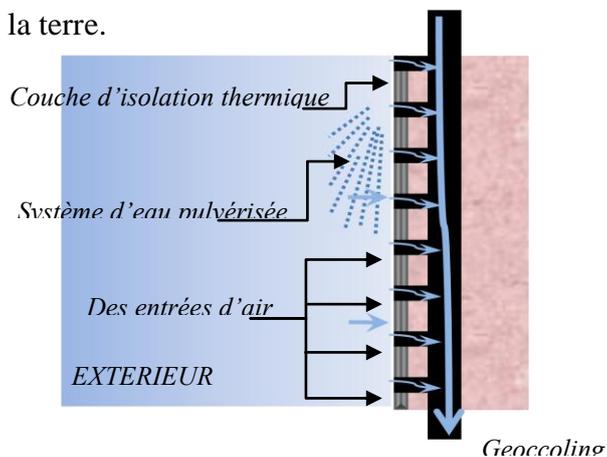
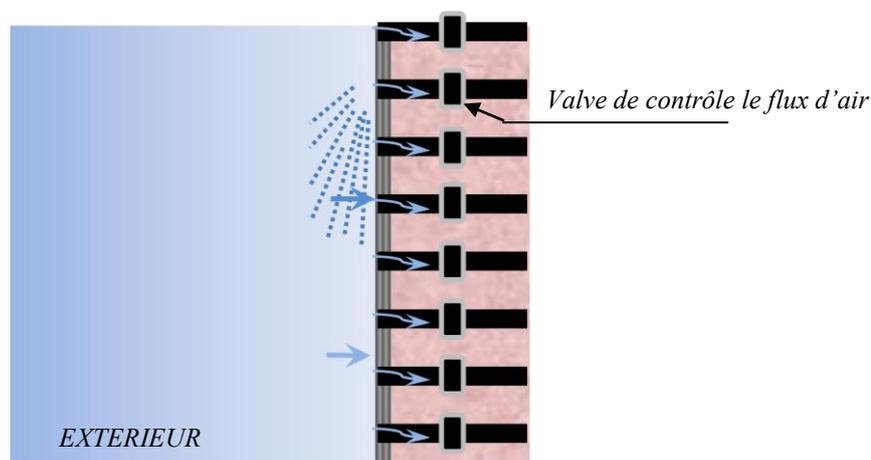


Figure 3.30: Couche intermédiaire se compose d'un système de refroidissement par évaporation, d'une couche d'isolation thermique, des entrées d'air distribué en toute la surface.



**Figure 3.31:** En plus du refroidissement par geocooling, cette couche peut avoir des entrées d'air directes avec des valves de contrôle du flux d'air.

La couche interne contient les sorties du flux d'air (figure 3.32) contrôlées et gérées par un système de gestion du bâtiment et par le désir des utilisateurs afin de moduler le flux d'air de l'espace interne. Ces sorties peuvent être distribuées sur le mur ou bien groupées dans une grille de ventilation contrôlée.



**Figure 3.32:** Couche interne : les sorties contrôlées pour distribuer l'air dans l'espace bâti.

Les murs traditionnels, une fois transformés en murs respirants, fonctionneraient comme des éléments de refroidissement capables de contrôler la ventilation naturelle et de la refroidir par évaporation ou par geocooling en passant sous terre. Cette évolution de la fonction de la façade signifie qu'elle travaillerait comme des couches thermiquement actives. Cette recherche suggère que ce concept pourrait être appliqué soit avec des matériaux naturels et des éléments simples, soit avec des technologies avancées. Les technologies peuvent aider les façades à contrôler la respiration des murs et d'assurer un niveau de confort thermique souhaité.

### 3.4.2 Méthodes de refroidissement utilisées

La conception du mur respirant contient plusieurs méthodes de refroidissement inspirées de la nature. Elles aident à baisser la température de l'air ainsi que les températures des surfaces qui l'entourent.

Premièrement, ce modèle peut éviter l'exposition directe du mur au soleil et le gain de chaleur par une couche de protection contre les rayonnements solaires. La fonction de cette couche ressemble au rôle thermique de nos vêtements, de la couche en matériaux cireux, de la peau velue des animaux. Cette couche avec sa capacité d'absorber l'humidité peut être mise en vibration mécaniquement ou naturellement par le vent pour accélérer le taux d'évaporation en imitant les systèmes de refroidissement trouvés chez les chiens et les fourmis.

La deuxième méthode de refroidissement est un système de refroidissement par évaporation qui imite les processus de sudation ou de transpiration existants dans les pluparts des êtres vivants en régions chaudes. Cette méthode de refroidissement est utile si le climat est sec.

La troisième méthode de refroidissement utilisée est le geocooling. Cette méthode bénéficie de la température inférieure du sous sol de la terre pour refroidir l'air avant qu'il n'entre dans le bâtiment. L'utilisation de la terre et sa température modérée est la logique de refroidissement utilisée par les rongeurs qui vivent dans le Sinaï.

Ces méthodes de refroidissement ne sont pas nouvelles. Elles ont été utilisées dans l'architecture vernaculaire en régions chaudes comme l'Égypte. Nous avons trouvé l'effet de cheminée dans le patio et dans la tour à vent de la maison islamique. Le moucharabieh qui réduit le gain de chaleur en permettant au vent de passer est couramment utilisé dans ce climat. L'eau comme un moyen de refroidissement est un élément utile dans les régions chaudes et arides. Nous avons trouvé la même logique dans les fontaines qui se trouvent au centre des patios et dans les jarres poreuses remplies d'eau ou les nattes d'herbe humide qui se situent aux sorties de l'air des tours à vent. Nous pouvons considérer aussi que la tente qui est faite de matériaux naturels est une surface thermiquement active ou un mur respirant traditionnel inventé par les bédouins qui habitent le Sinaï.

Ces idées traditionnelles sont bien sûr intelligentes, elles ont été développées par la pratique à travers le temps. L'analyse de la nature et ses systèmes de thermorégulation nous offre aussi des idées climatiques impressionnantes. Ces deux approches peuvent être considérées comme une base d'idées architecturales bien adaptées aux climats locaux. Le concept de mur respirant est basé sur ces deux approches. Notre recherche pose l'hypothèse qu'à l'aide de la technologie d'automatisation et ses systèmes de gestion de bâtiment, nous pouvons transposer ce concept à un système architectural intelligent et créer un vrai bâtiment intelligent. Afin de créer un mur respirant intelligent, il faut bien déterminer quelles sont les

éléments qui seraient automatisées ;

- L'ajustement de la couche externe, si nous voulons contrôler l'intensité du rayonnement solaire. (selon l'angle solaire et le besoin de refroidissement par l'activation d'une protection contre le soleil et ses rayonnements solaires directs)
- L'activation ou la désactivation du système d'eau pulvérisée selon le besoin de refroidissement dans le cas d'un climat sec. (selon l'humidité et le besoin de refroidissement par évaporation)
- L'ouverture ou la fermeture des entrées d'air pour contrôler la quantité de l'air. (selon le besoin de refroidissement par ventilation pour l'espace interne et les murs)
- L'ouverture ou la fermeture des sorties d'air pour contrôler la distribution d'air dans l'espace. (pour refroidir les espaces internes)
- L'ouverture ou la fermeture de la sortie générale. (pour activer l'effet de vent)

### 3.5 Conclusion

Une caractéristique impressionnante des systèmes biologiques est leur capacité d'adaptation thermique aux changements climatiques dans les organismes naturels. La flore et la faune du Sinaï offrent de nombreux exemples de méthodes d'adaptation au climat chaud. Ces méthodes d'adaptation thermique varient entre des caractéristiques physiques adaptées des comportements des vivants pour éviter le gain de chaleur; et des processus de refroidissement qui profitent de la nature. En plus de ces concepts de refroidissement qui ressemblent beaucoup à ceux utilisés dans l'architecture, les peaux naturelles des plantes, des animaux et de l'homme jouent un rôle important dans le processus de thermorégulation. Ces peaux fonctionnent comme des couches thermiquement actives aidant à la régulation de la température du corps.

D'autre part, la façade est l'élément régulateur le plus important dans un bâtiment. Elle agit comme un intermédiaire entre les demandes et les besoins des utilisateurs de l'intérieur et les facteurs environnementaux de l'extérieur. A la conception, elle est donc analogue à notre propre peau naturelle, mais dans la pratique, elle fonctionne, du point de vue thermique, avec une autre logique. La plupart des façades fonctionnent comme des couches d'isolation thermiques.

Les approches de l'architecture intelligente et de la biomimétique introduisent le concept de la « façade active » afin de changer la logique des façades traditionnelles fonctionnant comme des surfaces d'isolation thermique en surfaces thermiquement actives. L'application de ce concept pour bénéficier de la ventilation naturelle aux façades signifie que les façades doivent avoir la capacité de contrôler la ventilation naturelle, ou en d'autres termes, créer un mur qui peut respirer. Cette approche a été introduite par Hassan Fathy sous le nom

de « mur respirant » qui ressemble au même terme scientifique utilisé dans les régions humides pour exprimer le transfert de l'humidité entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment.

Le même concept de mur respirant a été appliqué aux constructions traditionnelles et au costume traditionnel des bédouins dans la région du Sinaï. Ils fonctionnent comme des couches thermiquement actives ou des couches respirantes qui ont la capacité d'absorber l'humidité de l'air en permettant au flux d'air de passer par toutes ses surfaces. Ce processus améliore le système de ventilation naturelle en diminuant la température de l'air qui passe par un système de refroidissement passif d'évaporation.

L'introduction du concept de couche thermiquement active ou mur respirant dans les peaux naturelles, les constructions traditionnelles et les costumes traditionnels, pourrait être considérée comme une preuve de l'importance de l'application de ce concept dans les façades d'aujourd'hui dans cette région. L'application de ce concept aux façades vise à transformer les murs inertes en murs respirants qui peuvent aider à améliorer les systèmes de ventilation et à diminuer l'énergie nécessaire au processus de refroidissement.

Avons-nous pensé au changement considérable dans le comportement thermique du bâtiment si toute la surface des façades avait la capacité de traiter la ventilation naturelle ? Pouvons-nous assurer le confort thermique dans ces régions chaudes si nous transformons les murs inertes en des murs respirants ? Et comment appliquer le concept de « mur respirant » aux façades d'aujourd'hui ?

Afin de répondre à ces questions, il faut valider ce concept dans la réalité. Cette thèse suggère que ce concept, à l'aide des technologies récentes, peut contrôler le flux d'air et transformer toute la surface de façade en un capteur de vent. Par cette approche, la notion de l'enveloppe sera changée pour la peau, en d'autres termes, elle créera des façades intelligentes qui respirent.

## **PARTIE II**

# **APPROCHE PRATIQUE**



## 4. La compatibilité du concept de mur respirant aux microclimats du Sinaï

Afin de valider le concept du mur respirant dans la région du Sinaï, il faut expérimenter ce concept dans la réalité. La première étape vers cette validité est d'évaluer l'appropriation du concept de mur respirant avec ses couches différentes au climat<sup>1</sup> existant dans le Sinaï.

Le Sinaï jouit d'un climat typique du désert avec des températures élevées et surtout pendant les mois d'été, mais cette région possède une diversité de conditions climatiques : extrêmement chaude dans la région désertique et froide dans les montagnes au sud.

Cette diversité peut changer la conception de notre modèle de mur respirant selon les conditions climatiques. C'est pour cela qu'il faut analyser chaque microclimat afin d'évaluer l'appropriation du modèle respirant proposé par le chercheur aux ces microclimats. Cette étape est suivit par une phase pour choisir les couches nécessaires du mur et de concevoir un modèle pour chaque microclimats. L'analyse climatique de chaque microclimat nous aide donc à développer un modèle approprié à chaque microclimat. Ces modèles peuvent être expérimentés dans la réalité dans les chapitres suivants.

---

<sup>1</sup> Le climat désigne l'ensemble des éléments météorologiques qui caractérisent les conditions moyennes et extrêmes de l'atmosphère sur une longue période, pour une région donnée de la surface du globe [Recyconsult, 2010], tandis que la météo d'un environnement correspond à un impact intégrant toutes les variables atmosphériques sur une courte période de temps. La météo et le climat sont représentés par des facteurs climatiques tels que le rayonnement solaire, la température ambiante, l'humidité, les précipitations, les conditions du vent et du ciel.

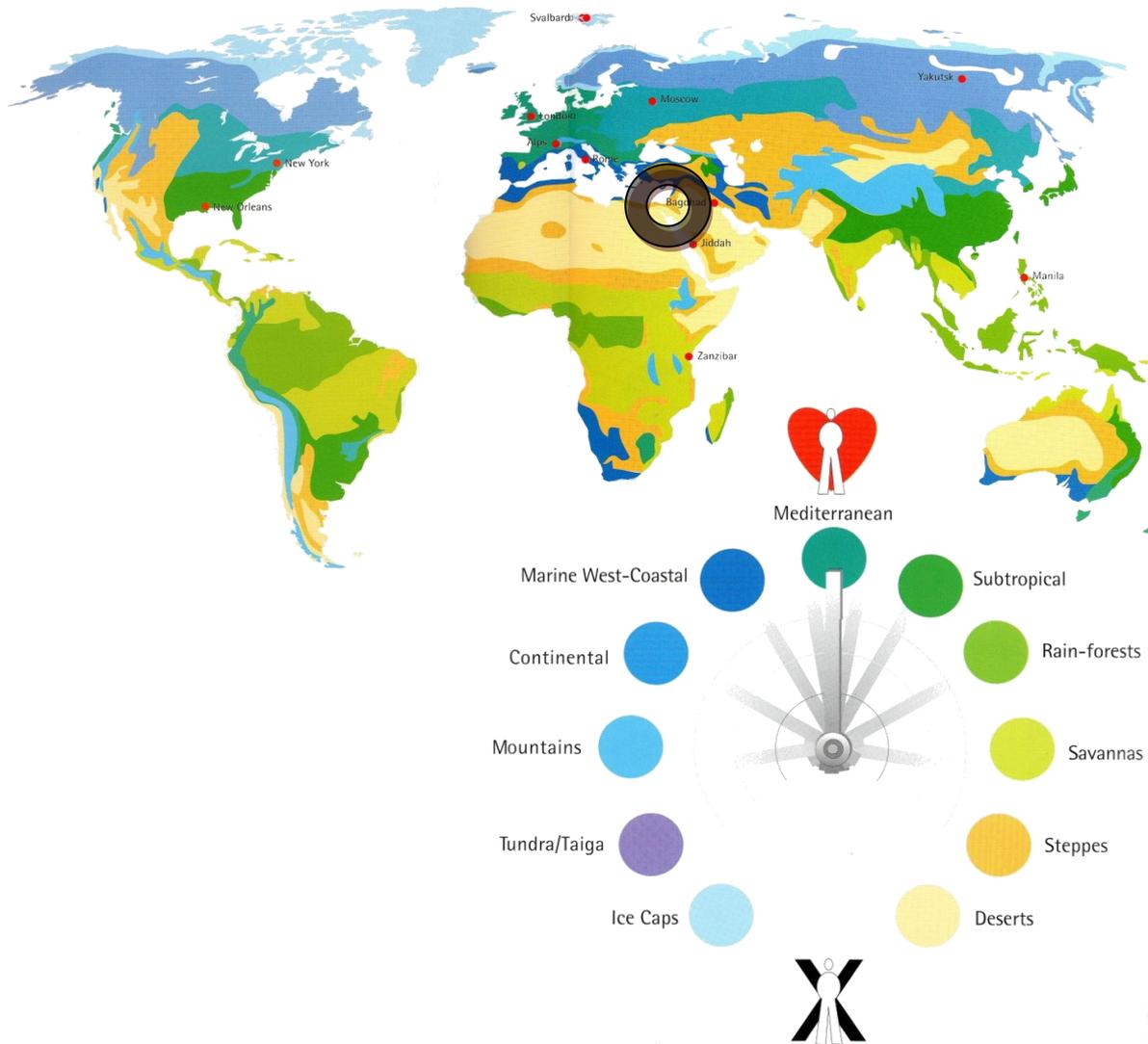


Figure 4.1: Les régions climatiques autour du monde [Moe, 2010].

## 4.1 Sinaï et ses zones climatiques

Le Sinaï est une région désertique située à l'est de l'Égypte. Elle est une péninsule entre la Méditerranée au nord et la Mer Rouge au sud-est et au sud-ouest et qui a une forme triangulaire de 60 000 km<sup>2</sup>. Sa frontière terrestre longe le canal de Suez à l'ouest et la frontière palestino/israélo-égyptienne à l'est (figure 4.2). Cette région désertique se trouve entre la latitude 27°43' et 31°19' N, et les longitudes 32°18' et 34°54' E.

Le climat de cette région est en général un climat désertique qui est chaud et semi-aride. Selon le centre égyptien de recherche sur le logement et la construction, le climat de l'Égypte peut être divisé en 8 micro-zones climatiques [HBRC. Code : ECP 306, 2006], dont 4 se trouvent dans le Sinaï (figure 4.3) : la zone côtière du Nord, la zone désertique au centre, la zone des hauts plateaux et la zone côtière du Sud. Ces zones climatiques sont très variées avec des climats aux caractéristiques différentes : zone très chaude et aride au centre désertique, zone très chaude et semi-aride sur la côte Sud, climat méditerranéen au nord et zone froide sur les hauts plateaux qui englobent le Mont Sainte-Catherine, sommet le plus haut d'Égypte culminant à 2 642 m.



Figure 4.2: La région du Sinaï

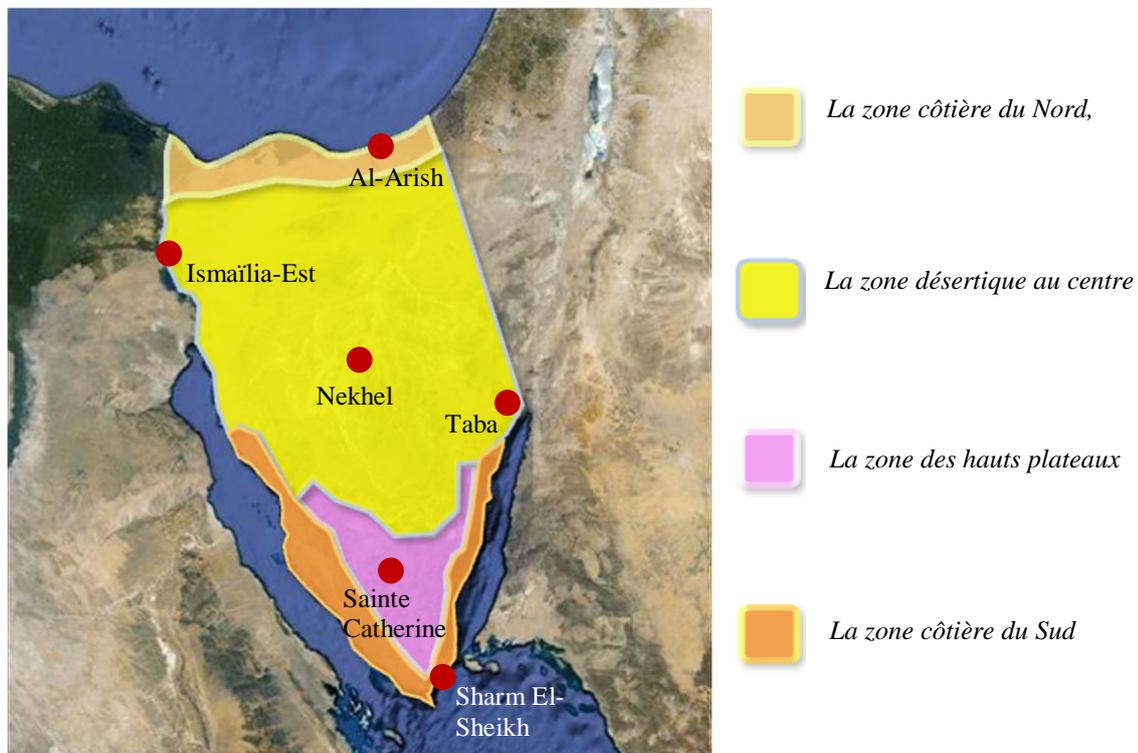


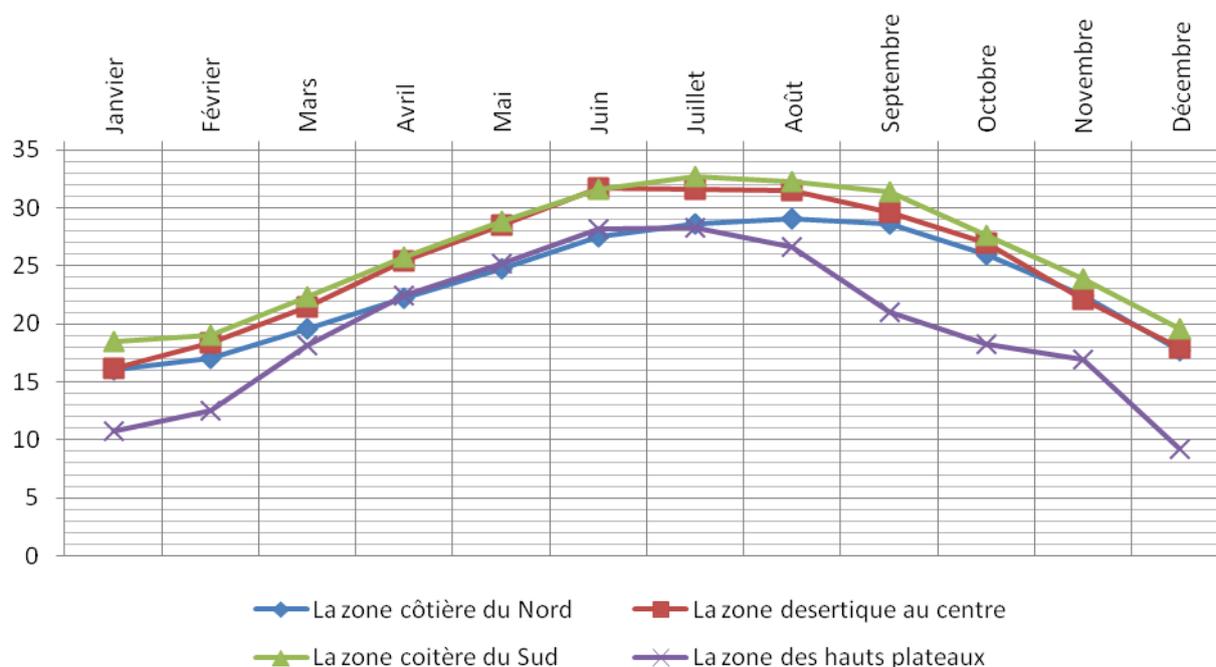
Figure 4.3: Zones climatiques du Sinaï

Une étude récente d’Ayman Hassan analyse les zones climatiques d’Egypte en utilisant les moyennes mensuelles maximum et minimum de la température et de l’humidité [Ayman, 2011, 606]. La température opérative ( $T_{op}$ ) est calculée avec une approximation suffisante comme la moyenne de la température de l’air ( $T_{air}$ ) et de la température radiante moyenne ( $T_{rm}$ ). La formule suivante peut être utilisée :

$$T_{op} = T_{air} + (1-A) T_{rm}$$

dans laquelle  $A$  est l’indice relatif de la vitesse de l’air ( $V_r$ ). Elle est équivalente à 0,7 lorsque  $V_r$  est comprise entre 0,6 et 1,0 m/s. Les températures opératives moyennes  $T_{rm}$  sont obtenues par un logiciel appelé ‘RayMan Package’ (développé à l’institut météorologique de l’université de Freiburg) et basées sur des données recueillies pendant les 30 dernières années.

La figure 4.4 illustre le profil de la température opérative moyenne des zones climatiques dans le Sinaï. L’illustration est basée sur les données climatiques recueillies à partir des stations qui se trouvent dans chaque zone climatique. Le tableau suivant illustre les gammes mensuelles maximales et minimales de la température sèche, de la température opérative et de l’humidité relative pendant les mois d’été dans les 4 zones bioclimatiques définies dans le Sinaï (figure 4.4) [Ayman, 2011, 609].



**Figure 4.4:** Profil de la température opérative moyenne pour les quatre zones climatiques du Sinaï

**Tableau 4.1:** Données climatiques des quatre zones différentes du Sinaï (température ambiante, température opérative, rayonnement global, humidité relative) [Ayman, 2011, 609]

Zone		La zone côtière du Nord	La zone désertique au centre	La zone côtière du Sud	La zone des hauts plateaux
<b>Température Max (été)</b>	Tair	28-31	34-35	36-37	31-32
	Top	33-37	37-46	39-42	37-39
<b>Température Min (été)</b>	Tair	20-24	22-24	27-28	16-20
	Top	18-23	13-21	19-22	12-16
<b>Energie solaire globale (été)</b>	W/m2	890-880	940-1050	950-1000	840-930
<b>Humidité</b>	%	55-90	32-84	22-60	22-58

Tair = Température d'air (°C)

Top = Température opérative (°C).

Selon cette étude, le Sinaï a quatre microclimats, dont trois microclimats chauds dans la zone côtière du Nord, la zone côtière du Sud et la zone désertique au centre, et un microclimat frais dans la zone des hauts plateaux.



Figure 4.5: La ville de Sainte Catherine représentante du climat de la zone des hauts plateaux.

La zone des hauts plateaux se trouve dans la région sud du Sinaï, entre la latitude 28° et 29°N. Cette zone contient des montagnes les plus hautes d'Égypte (figure 4.5). L'altitude des montagnes s'élève de 400 à plus de 2000 m au-dessus du niveau de la mer. Ces hautes attitudes fournissent un climat agréable pendant l'été, frais pendant le printemps et l'automne, et assez froid pendant l'hiver. Les jours d'hiver sont assez froids et les nuits peuvent atteindre -14 C. Les villes et les villages de cette région climatique sont considérés comme les villes les plus froides en Égypte

Tableau 4.2: Les moyennes et les extrémités mensuelles de la température et de l'humidité relative dans la zone des hauts plateaux. <sup>2</sup>

	Température (°C)			Humidité (%)		
	high	avg	low	high	avg	low
Janvier	16	9	2	74	53	32
Février	18	11	4	65	46	27
Mars	17	11	5	58	39	20
Avril	23	15	8	53	37	21
Mai	29	21	14	52	35	18
Juin	31	23	16	48	32	17
Juillet	32	25	18	54	36	18
Août	32	26	20	60	40	21
Septembre	30	23	17	66	45	24
Octobre	24	18	13	64	46	27
Novembre	22	15	9	65	47	28
Décembre	15	10	6	69	49	29

<sup>2</sup> Average weather for St. Catherine, Egypt voir (<http://weatherspark.com/averages/29252/St-Catherine-Janub-Sina-Egypt>)

Au cours d'une année, la température varie généralement entre  $-6^{\circ}\text{C}$  à  $43^{\circ}\text{C}$  mais est rarement en dessous de  $1^{\circ}\text{C}$  ou supérieures à  $36^{\circ}\text{C}$ . La saison chaude dure du 30 mai au 22 septembre avec une température moyenne quotidienne élevée au-dessus de  $29^{\circ}\text{C}$ . La saison froide dure du 8 décembre au 27 février avec une température moyenne quotidienne en dessous de  $18^{\circ}\text{C}$ . La température opérative estivale maximale varie de  $37^{\circ}$  à  $39^{\circ}\text{C}$ , et la température minimale varie entre  $12^{\circ}$  et  $16^{\circ}\text{C}$ . Pendant l'hiver, elle oscille entre  $22^{\circ}$  et  $29^{\circ}\text{C}$  maximum et entre  $0^{\circ}$  et  $5^{\circ}\text{C}$  minimum.

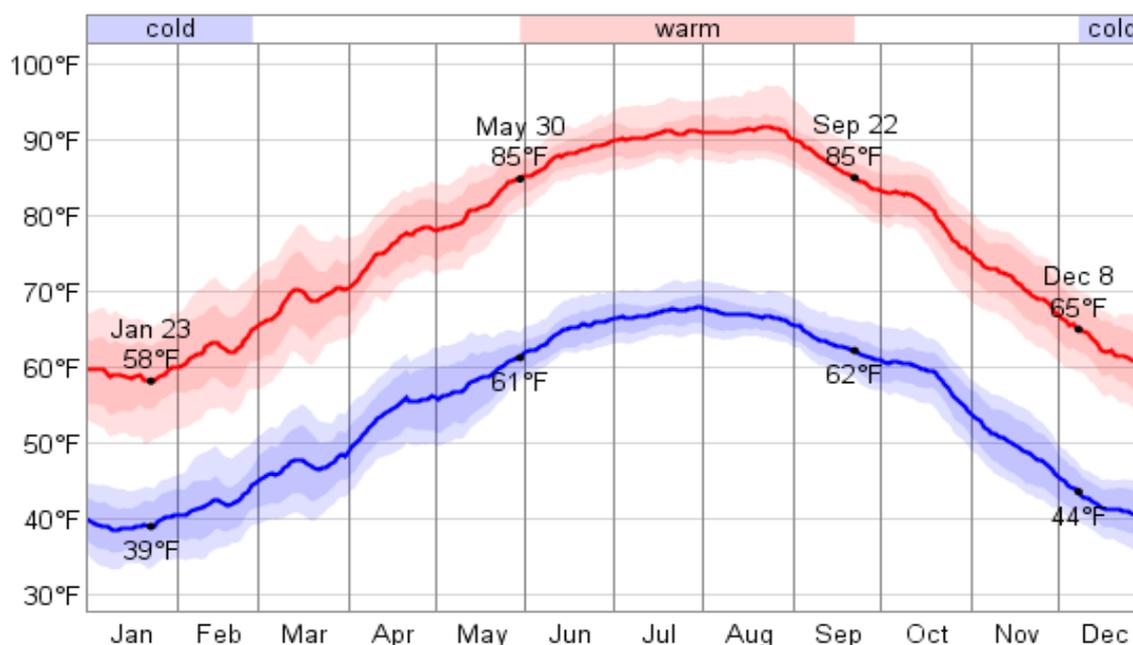


Figure 4.6: Les températures maximum et minimum au cours d'une année dans la zone des hauts plateaux<sup>3</sup>.

L'humidité relative dans cette région varie généralement de 16% (sec) à 74% (humide) au cours de l'année, rarement en dessous de 11% (très sec), ou supérieur à 88% (très humide). L'énergie solaire globale dans cette zone climatique varie de 840 à 930 W/m<sup>2</sup> pendant l'été et de 500 à 800 W/m<sup>2</sup> pendant l'hiver.

Au cours de l'année des vitesses du vent typique varie de 0,0 m/s à 7,3 m/s (brise calme à modérée), dépassant rarement 9,7 m/s (brise fraîche). La direction du vent la plus souvent est du Nord (13% du temps), de l'ouest (12% du temps), et du nord-ouest (11% du temps). Le vent vient moins du Sud-Est (2% du temps), du sud (2% du temps), du sud-ouest (2% du temps), et de l'Est (3% du temps).

<sup>3</sup> Average weather for St. Catherine, Egypt voir (<http://weatherspark.com/averages/29252/St-Catherine-Janub-Sina-Egypt>)

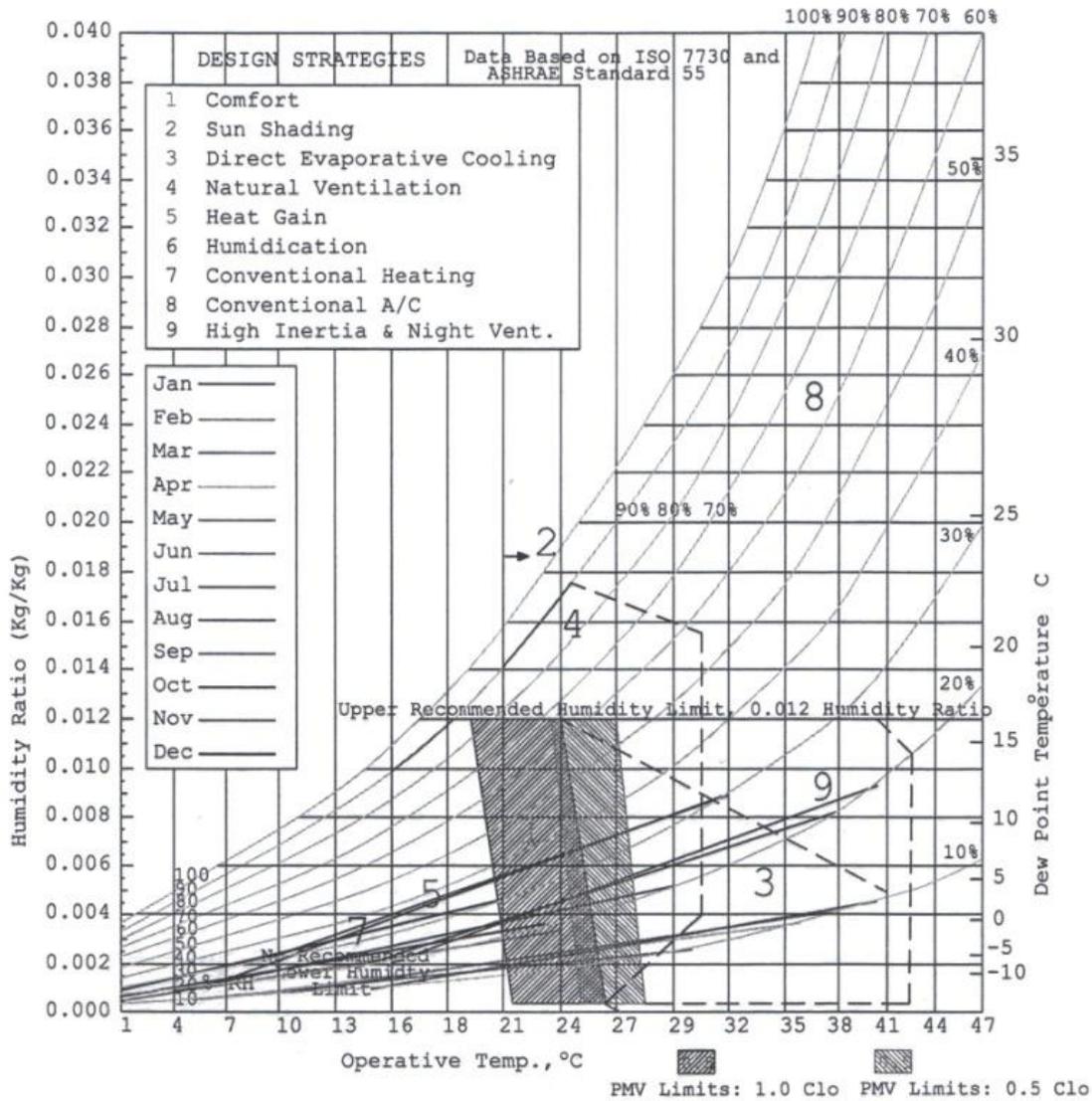


Figure 4.7: Diagramme bioclimatique de la zone des hauts plateaux [Ayman, 2011, 617]

Selon l'étude d'Ayman Hassan [Ayman, 2011, 606], l'analyse du diagramme du confort (figure 4.7) nous montre que les bâtiments dans ce climat n'ont pas besoin de système de refroidissement. Il peut être suffisant d'utiliser un système de protection solaire qui est nécessaire pendant 82,64% des heures d'été afin d'atteindre le confort thermique, tandis que la ventilation naturelle peut résoudre le problème seulement pour 13,79% des heures d'été.

En générale, les bâtiments dans cette région peuvent être conçus en ayant une inertie élevée afin de surmonter le grand écart entre la température de la nuit et celle du jour et sans l'intégration d'un système de refroidissement complexe. Selon ce résultat, la conception du mur respirant n'est pas appropriée à ce microclimat frais. Ce résultat nous incite à nous concentrer sur les trois autres zones climatiques du Sinaï ; la zone côtière du Nord, la zone désertique au centre et la zone côtière du sud. L'analyse de ces microclimats va nous aider à évaluer les murs respirants et voir la compatibilité du concept avec ces différents microclimats.

## 4.2 Analyse des diagrammes bioclimatiques des différentes zones climatiques du Sinäi

Le travail d'analyse climatique dans ce chapitre est basé sur le diagramme psychrométrique de Givoni. Ces diagrammes de confort prennent en considération la température opérative, l'humidité, le rayonnement solaire, le mouvement d'air, les vêtements et le niveau d'activité afin de déterminer le confort thermique.

Ces analyses ont été faites sur deux logiciels d'analyse climatiques. Le premier est l'outil de « *weather tool* » existant dans l'« *Ecotech Analysis 2011* ». Cet outil analyse les données climatiques et les présentes dans un diagramme psychrométrique. Ces données sont comparées à la zone de confort déterminée par Givoni. En conséquence, nous pouvons proposer des techniques de refroidissement approprié à ce climat et choisir les couches du mur proposées dans la partie précédente.

Le deuxième logiciel est « *Climate consultant 5.2* » par lequel les données climatiques sont indiquées sur le diagramme psychrométrique en comparant ces points avec les zones de confort. Les lignes climatiques mensuelles de 12 mois ont été superposées sur chaque diagramme psychrométrique. Cette superposition me permet de calculer le pourcentage de temps qui se trouve à l'intérieur de la zone de confort par rapport au temps total. En plus, nous pouvons préciser l'appropriation de chaque système de refroidissement par rapport à ces données climatiques.

L'analyse dans cette partie est faite suivant la norme de confort adaptive ASHRAE<sup>4</sup> 55-2004 qui est appropriée à l'utilisation de la ventilation naturelle pour le refroidissement. Ce modèle de confort fournit une méthode graphique basée sur un diagramme psychrométrique pour des individus qui peuvent adapter leur habillement selon les conditions thermiques. La zone graphique correspond aux taux métaboliques qui se situent entre 1,0 et 1,3 met (58,15-75,6 W/m<sup>2</sup>)

Les données climatiques utilisées pour ces deux logiciels sont des fichiers numériques présentés par l'autorité d'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, le département d'énergie aux États-Unis. Ces fichiers sont destinés au logiciel de simulation thermique « *Energy plus* » produit par la même organisation.

Des autres données climatiques en formats papiers sont utilisées en cas d'absence de données numériques. Ces données sont prises de deux sources principales ; l'autorité publique égyptienne de la météorologie et le département de « *Underground Weather* », l'université du Michigan.

<sup>4</sup> The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

***Validation des logiciels utilisés dans cette phase d'analyse :***

*Weather tool (plugin d'Ecotech 2011):*

L'« Ecotech » est principalement conçu comme un logiciel de conception qui intègre diverses fonctions de simulation. Sa cible principale est les architectes. Les points forts de ce logiciel sont son aspect visuel et sa pertinence pour les premiers stades de la conception. Il possède l'une des interfaces les plus conviviales, qui permet un puissant outil d'analyse visuelle. Selon une étude faite par Attia S. et al., 2009 afin d'évaluer les logiciels de simulation thermique existants, l'Ecotech est le plus utilisé et le plus répandu chez les architectes pour simuler l'ambiance thermique. Cette étude montre que plus de 64% des interviewés disent qu'ils utilisent Ecotech dans leurs projets (Attia S. et al., 2009, p. 206).

Malgré l'utilisation répandue de ce logiciel, il existe un manque de précision et de fiabilité de l'analyse thermique. Son moteur de simulation thermique est basé sur la méthode CIBSE. L'Ecotech utilise cette méthode pour calculer les températures internes et les charges thermiques, mais il n'est pas capable de simuler l'efficacité énergétique, Cela est dû à des limitations de son moteur de simulation thermique (Attia S. et al., 2009, p. 206).

Bien que la plupart des conditions de construction réelle puissent être entrées dans Autodesk Ecotech pour la simulation de charges thermiques, l'incapacité de préciser le type de système de CVC semble être un inconvénient majeur dans l'obtention de résultats précis. Les résultats de la recherche montrent qu'Ecotech a constamment sous-estimé les charges thermiques de plus de 15% (Vangimalla et al., 2011, p. 3399). Cette étude prouve que la qualité et la quantité des informations d'entrées qui peuvent être introduites dans Ecotech devraient être améliorées afin d'obtenir des simulations plus précises des charges thermiques.

Dans cette thèse, nous n'utilisons pas Ecotech comme un logiciel de simulation, mais plutôt comme un logiciel d'analyse climatique par le plugin « Weather tool ». L'outil « Weather tool » intégré à Ecotech, est un programme de visualisation et d'analyse des données climatiques horaires. Il reconnaît un large éventail de formats de fichiers météo internationaux. Il possède une interface très conviviale et facile à lire par les utilisateurs. Il est facile d'identifier certaines tendances et détails subtils qui caractérisent chaque climat différent. Cet outil est capable de proposer des stratégies passives de refroidissement ou de chauffage appropriées aux conditions climatiques.

Selon une étude d'évaluation à l'école supérieure de design à Harvard, il n'y a pas d'informations techniques détaillées sur les caractéristiques des solutions de refroidissement proposés par l'outil (Ibarra, digital workshops series, 2010, p.19). Il est donc utilisé principalement pour calculer les conditions climatiques générales ou pour procéder à des comparaisons climatiques.

Le manque d'études d'évaluation sur les caractéristiques des solutions de refroidissement, nous incite à utiliser un deuxième logiciel d'analyse climatique, qui est capable aussi de proposer des stratégies passives de refroidissement. La comparaison entre les résultats obtenus par ces deux logiciels, nous permet d'identifier les résultats anormaux et d'obtenir des analyses plus précises. Nous avons donc utilisé le logiciel « Climate consultant » qui accepte les mêmes fichiers climatiques d'« Energy plus ».

*Climate consultant 5.2:*

Ce logiciel d'analyse climatique a été développé par le département d'architecture et d'« urbain design » de l'université de Californie, Los Angeles. Selon les utilisateurs, ce logiciel est très convivial, facile d'utilisation et un représente un outil d'analyse puissant. Il affiche les données climatiques et les analyses de différentes façons. Son interface graphique est appréciée par les architectes.

L'analyse psychométrique existante dans ce logiciel recommande les stratégies les plus appropriées à la conception passive, comme indiqué dans le livre de Givoni « Man, climate and architecture ». Contrairement à l'outil de « Weather tool », les informations techniques détaillées sur les caractéristiques des solutions de refroidissement, sont documentées et librement disponibles. C'est donc un logiciel plus précis. Selon Ibarra (Ibarra, digital workshops series, 2010, p.59), pour l'analyse quantitative détaillée, l'utilisation de « Climate consultant » est suggérée plutôt que le « Weather tool ».

Dans cette partie, nous allons utiliser ces deux logiciels « Weather tool – Ecotech 2011 » et « Climate consultant 5.2 » afin d'analyser les différentes zones climatiques du Sinaï et de proposer les solutions de refroidissement les plus appropriées à chaque zone climatique.

### 4.2.1 Zone côtière du Nord

La zone côtière du Nord occupe une bande étroite d'environ 1 km de largeur, parallèle à la côte méditerranéenne et autour de la latitude 31°N (figure 4.8). Le tableau 4.3 suivant nous présente les données climatiques recueillies pour la ville d'Al-Arish qui se trouve au Nord-Est du Sinaï.



Figure 4.8: La ville d'Al-Arish, la zone de côte Nord du Sinaï.

Tableau 4.3: les moyennes et les extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent dans la zone côtière du Nord dans le Sinaï

	Température (°C)			Humidité (%)			Wind (km/h)		
	high	avg	low	high	avg	low	high	avg	low
<b>Janvier</b>	21	14	8	83	64	38	14	9	-
<b>Février</b>	22	15	10	81	63	41	16	10	-
<b>Mars</b>	23	16	11	82	61	38	16	9	-
<b>Avril</b>	26	19	13	79	57	35	15	8	-
<b>Mai</b>	28	21	16	79	58	36	16	8	-
<b>Juin</b>	32	25	19	81	61	38	16	8	-
<b>Juillet</b>	33	27	22	81	64	45	15	8	-
<b>Août</b>	33	27	23	83	65	45	15	7	-
<b>Septembre</b>	32	25	21	77	61	44	15	8	-
<b>Octobre</b>	31	24	18	79	63	42	16	8	-
<b>Novembre</b>	26	19	13	82	65	40	13	8	-
<b>Décembre</b>	23	15	9	74	55	33	15	10	-

Climate Consultant 5.2 (Build 2, Oct 25, 2011)  
File Criteria Charts Help

**WEATHER DATA SUMMARY**

**LOCATION:** El Arish, Shamal Sina, EGY  
**Latitude/Longitude:** 31.08° North, 33.82° East, **Time Zone from Greenwich 2**  
**Data Source:** ETMY 623370 WMO Station Number, **Elevation 32 m**

MONTHLY MEANS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)	312	419	483	516	562	530	539	493	476	439	349	338	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)	364	454	441	412	408	352	330	311	388	421	407	455	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Hourly)	123	144	179	204	234	248	274	254	197	162	123	110	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Max Hourly)	775	1091	1047	1409	1365	1339	1051	1004	1178	1257	794	775	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	1224	1423	1258	1445	1423	1459	926	1099	1299	1501	1493	1335	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Max Hourly)	1224	1423	1258	1445	1423	1459	926	1099	1299	1501	1493	1335	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)	2853	3850	4803	5797	6393	6465	6098	5557	5076	4151	3279	2832	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)	3323	4190	4423	4691	4754	4338	3797	3577	4163	4017	3866	3791	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)	1145	1354	1818	2327	2705	3045	3130	2879	2142	1588	1191	968	Wh/sq.m
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	lux
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	lux
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)	13	13	17	19	21	24	26	27	25	22	18	14	degrees C
Dew Point Temperature (Avg Monthly)	8	7	10	12	13	18	19	20	18	17	11	8	degrees C
Relative Humidity (Avg Monthly)	72	70	69	68	64	69	66	68	68	72	69	67	percent
Wind Direction (Monthly Mode)	150	170	0	300	340	330	330	330	10	340	140	170	degrees
Wind Speed (Avg Monthly)	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	m/s
Ground Temperature (Avg Monthly of 3 Depths)	15	15	17	18	21	23	24	24	22	20	17	16	degrees C

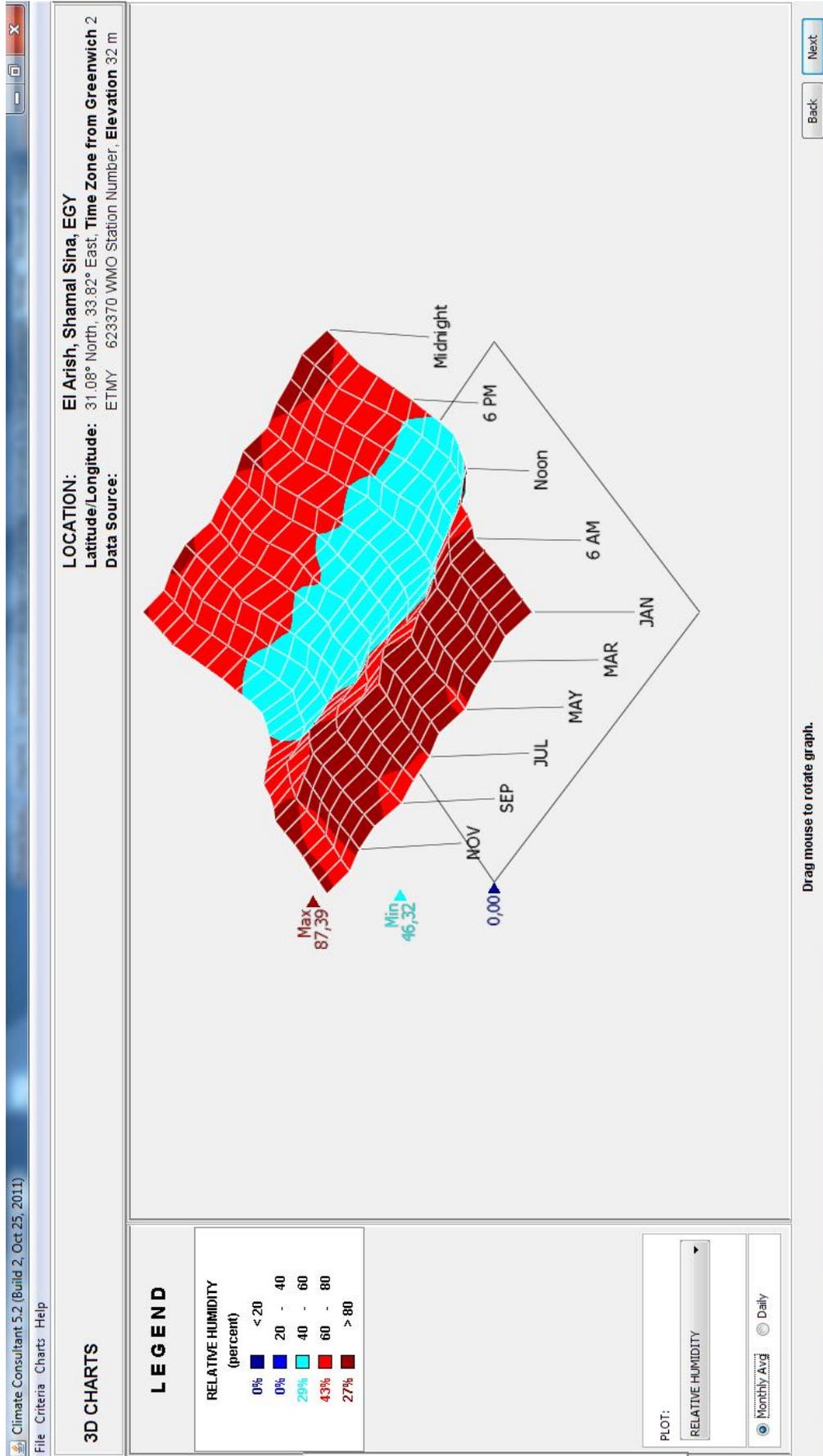
Back Next

**Tableau 4.4:** les données climatiques de la zone côtière du Nord dans le Sina (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEFER en format numérique).

L'analyse des données climatiques (tableau 4.4) de cette zone nous montre que la température d'air maximum varie entre 21°C et 33°C et le minimum entre 8°C et 23°C. Pendant l'été, le maximum varie entre 26°C et 33°C, et le minimum entre 13°C et 23°C. selon l'étude qui a été fait par Ayman Hassan [Ayman, 2011, 606], la température opérative maximum varie entre 33° et 37°C, et le minimum entre 18° et 23°C pendant l'été, alors que pendant l'hiver la température opérative maximum varie entre 25° et 28°C et la température minimum entre 7° et 9°C.

L'humidité relative est élevée dans cette dans cette zone climatique méditerranéenne (figure 4.9). Elle varie entre 33% et 83% et les moyennes sont autour le 60% toute l'année. Selon l'analyse des moyennes de l'humidité relative enregistrées, 27% du temps, l'humidité relative est plus de 80%, et 43% du temps, elle est entre 60% et 80%, tandis que 29% du temps elle varie de 40% et 60%.

Les données enregistrées du vent dans cette région (figure 4.10&4.11) nous montrent que les vitesses moyennes du vent varient entre 7 et 10 km/h (1.9 et 2.7 m/s) et les directions les plus fréquentes sont le Nord, le Nord-Ouest et le Sud.



**Figure 4.9:** Le pourcentage de l'humidité relative par rapport au temps dans la région côtière du Nord (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

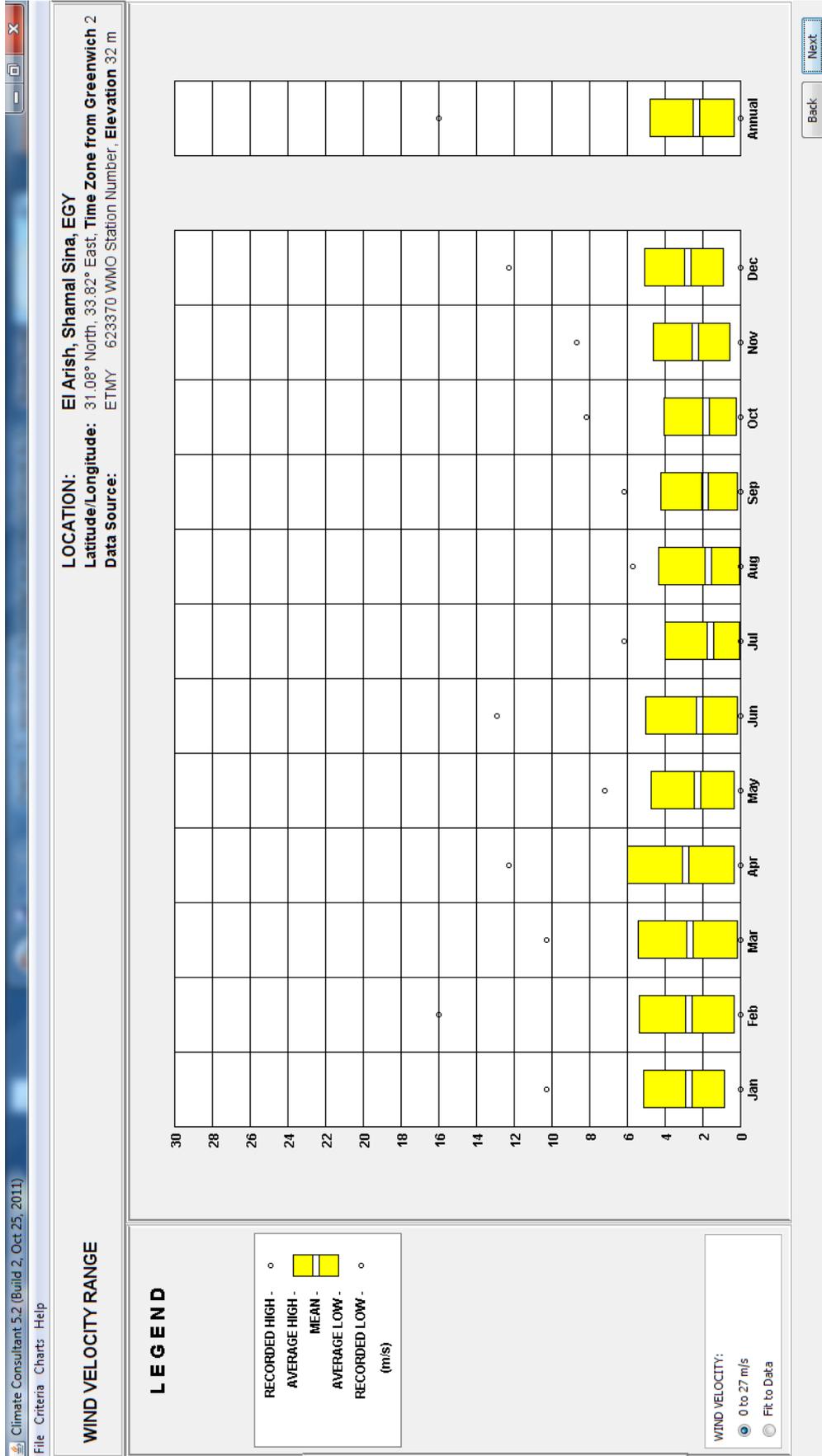
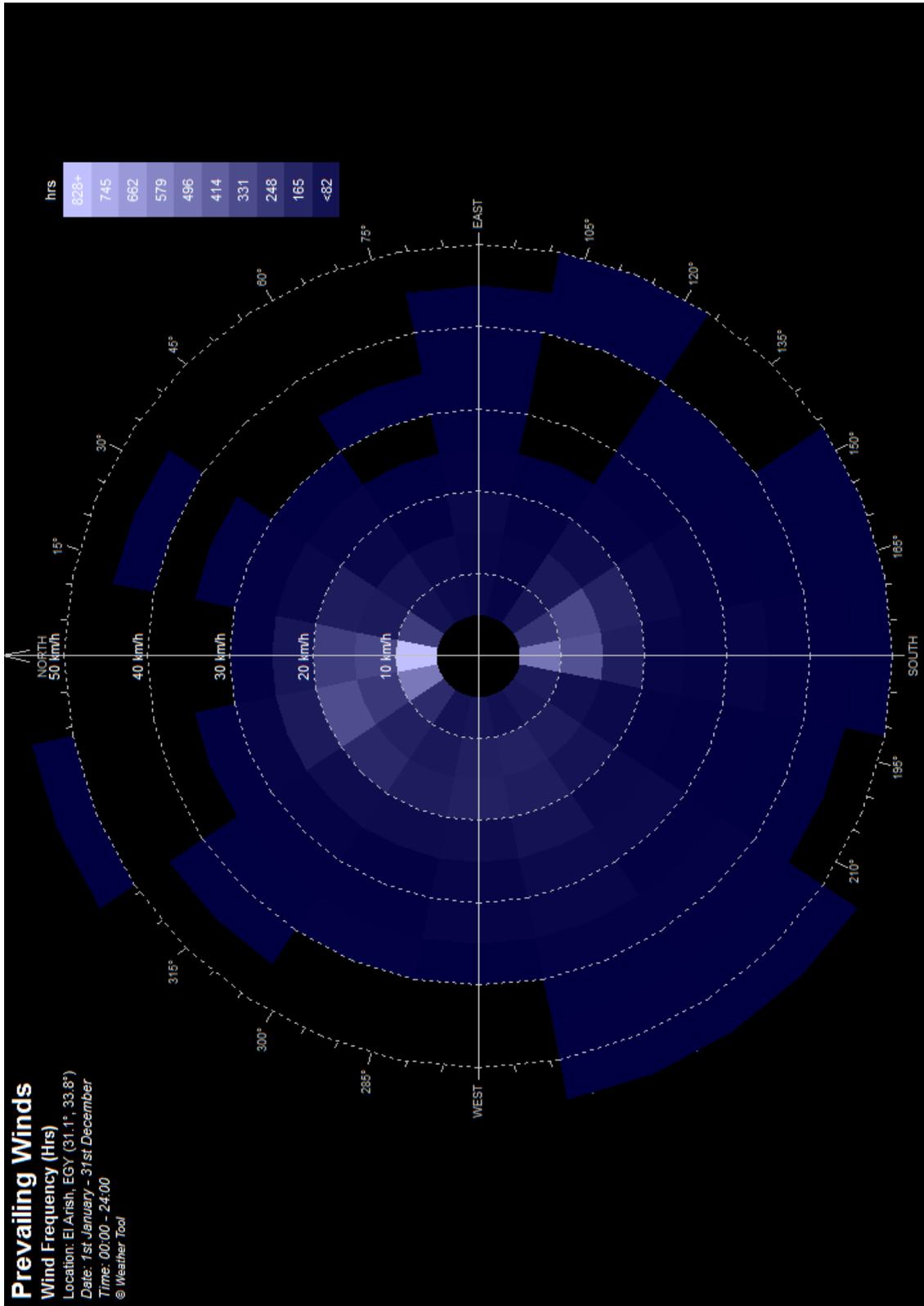
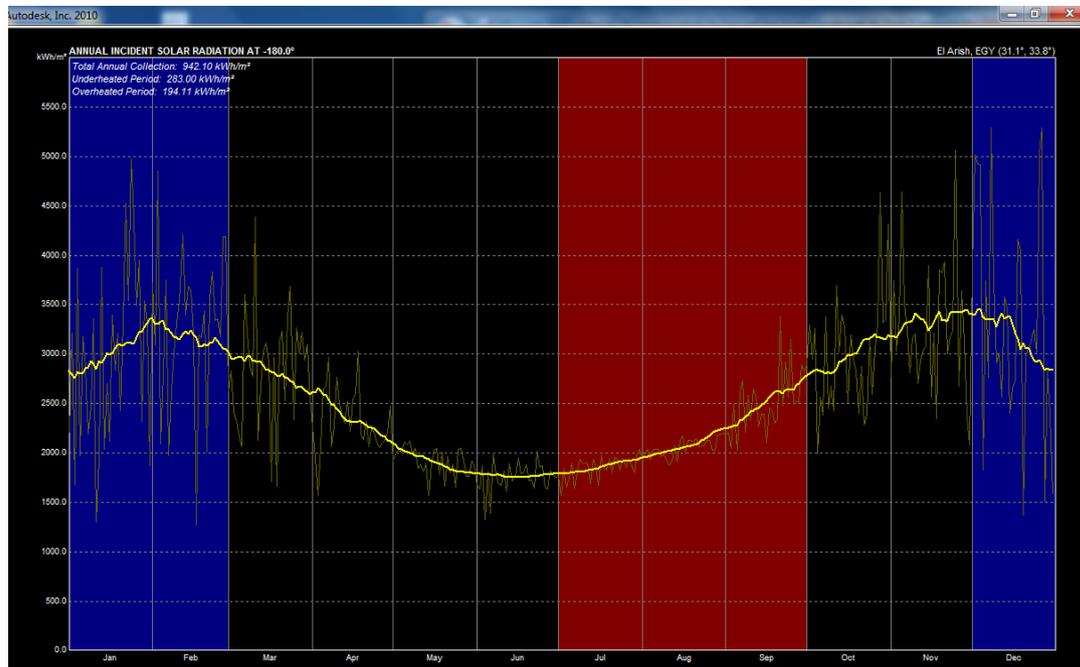


Figure 4.10: Les vitesses du vent dans la région côtière du Nord (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

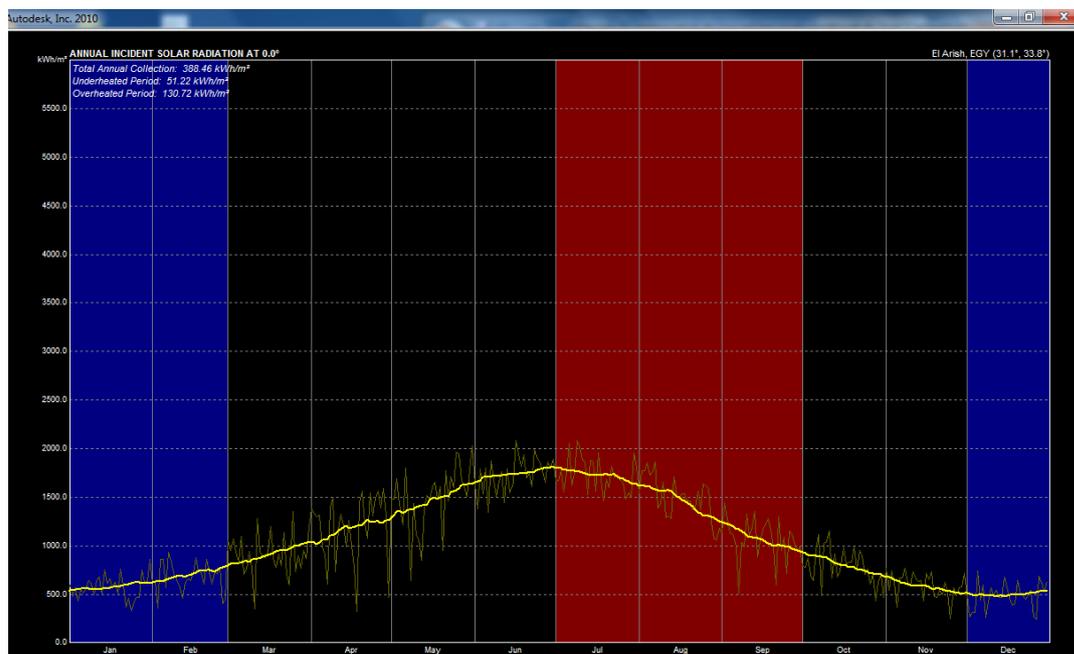


**Figure 4.11:** La rose des vents dans la région côtière du Nord (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

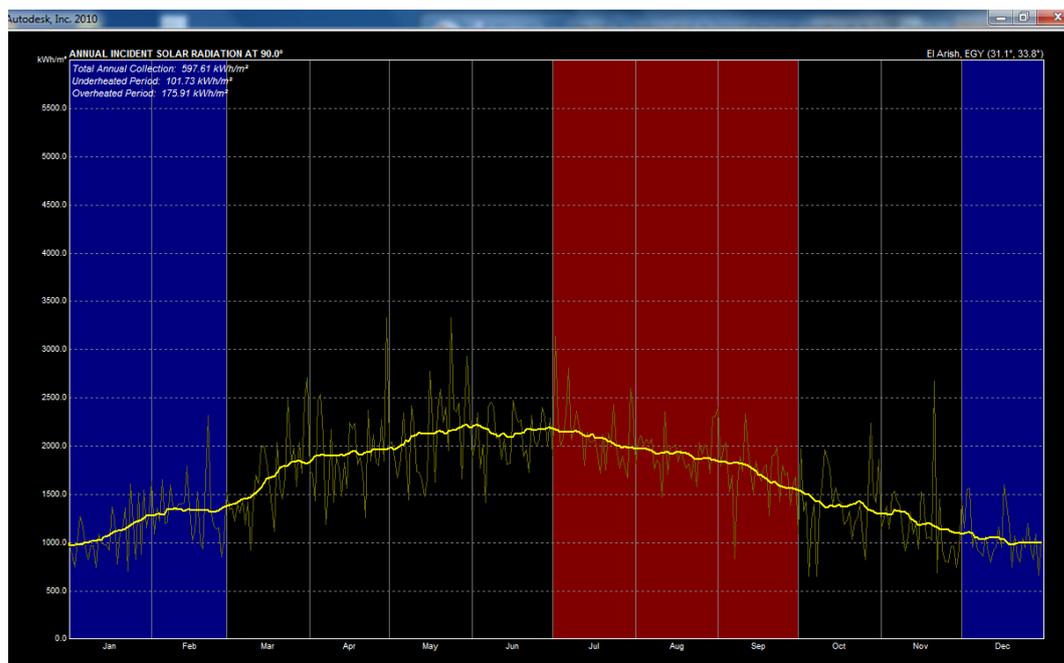
L'énergie solaire reçue sur 1m<sup>2</sup> de façade Nord oscille entre 1000 et 1700 kWh/m<sup>2</sup>, et de 1500 à 2200 kWh/m<sup>2</sup> sur la façade Est, tandis que la façade Sud reçoit entre 1800 et 3000 kWh/m<sup>2</sup>, et la façade Ouest reçoit une énergie entre 2300 à 3300 kWh/m<sup>2</sup> (figure 4.12). Cette énergie solaire élevée produit un gain de chaleur peut être favorable pendant l'hiver, mais elle produit un sentiment d'inconfort thermique pendant l'été. Ce problème est très important dans cette région. En conséquence, la protection solaire pendant l'été est considérée comme un des facteurs majeurs pour la conception bioclimatique des bâtiments dans ce climat.



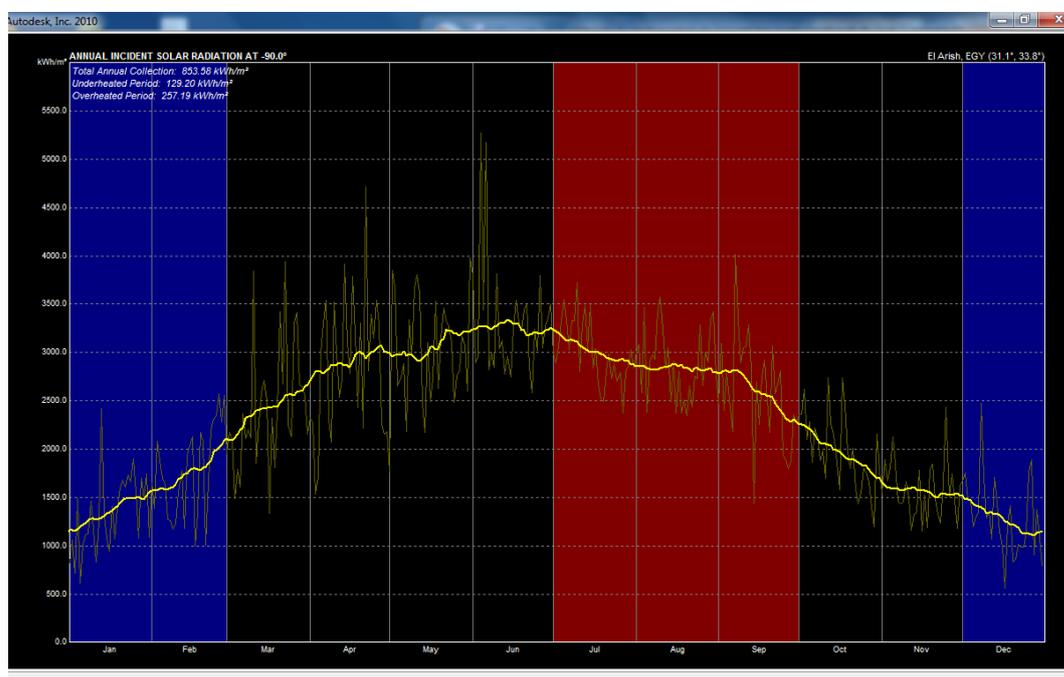
Énergie solaire reçue par une façade Sud



Énergie solaire reçue par une façade Nord



Énergie solaire reçue par une façade Est



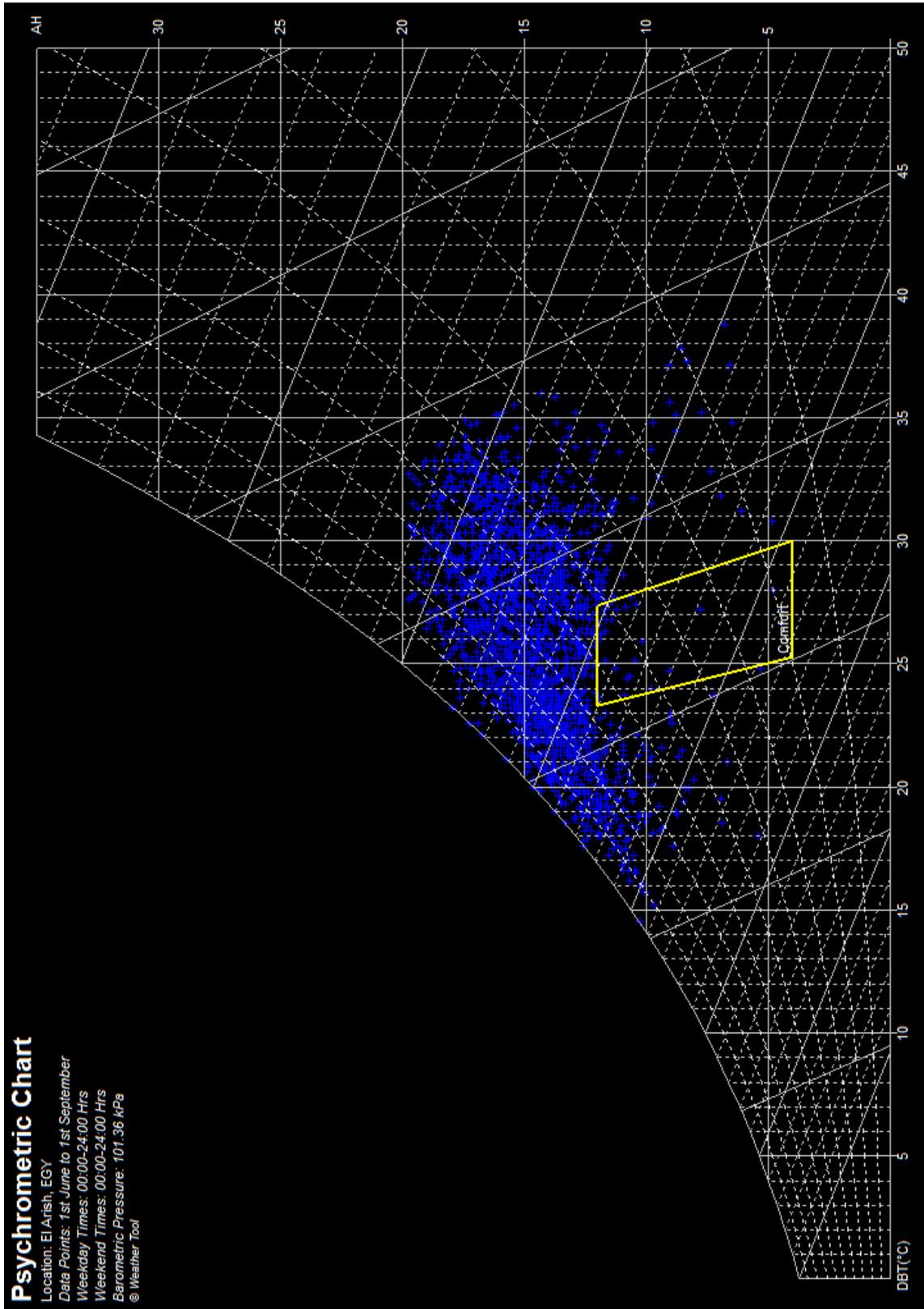
Énergie solaire reçue par une façade Ouest

**Figure 4.12:** L'énergie solaire reçue par 1m<sup>2</sup> verticale dans la zone côtière du Nord (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

Le diagramme psychrométrique nous montre que les plus parts des données enregistrées sont en dehors la zone de confort à cause des taux d'humidité qui sont très hauts, surtout pendant l'été. L'analyse du diagramme de confort pour cette zone climatique montre que, pendant l'été, 9,10% des heures sont à l'intérieur de la zone de confort.

Une analyse bioclimatique est faite en utilisant le logiciel *ecotech analysis* qui évalue l'appropriation des systèmes de refroidissement passif par rapport au climat du site. Cette analyse (figure 4.14) montre que la stratégie de refroidissement la plus appropriée est celle qui utilise la ventilation naturelle afin de diminuer l'humidité interne.

Cette stratégie de refroidissement est très efficace dans cette région. Le diagramme suivant montre que l'utilisation de la ventilation naturelle peut résoudre la plupart des problèmes de refroidissement pendant l'été (figure 4.15). L'utilisation de cette stratégie de refroidissement (ventilation naturelle) peut augmenter le pourcentage du confort thermique de 3% pour plus de 50% de temps pendant les mois de juin, juillet, août et septembre (figure 4.16). Elle augmente aussi le pourcentage du confort thermique pendant le mois d'octobre de 10% à 49%. La ventilation naturelle améliore aussi les conditions thermiques pendant les mois de mars, avril, mai et novembre, mais avec un pourcentage qui n'est pas élevé, tandis qu'elle n'est pas utile pendant les mois de janvier, février et décembre.



**Figure 4.13:** Le diagramme psychrométrique de la zone côtière du Nord du Sinai (pendant l'été) (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

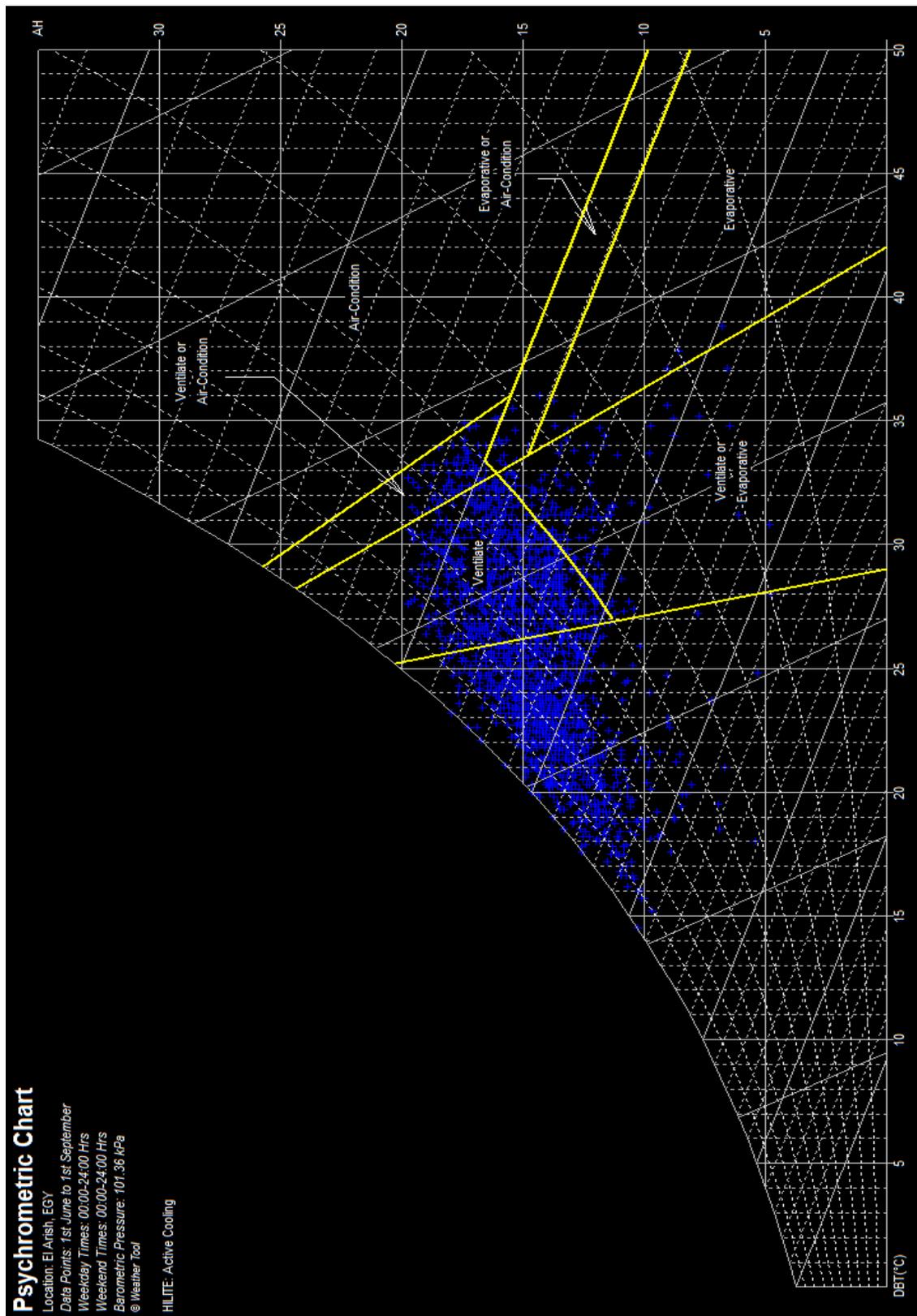
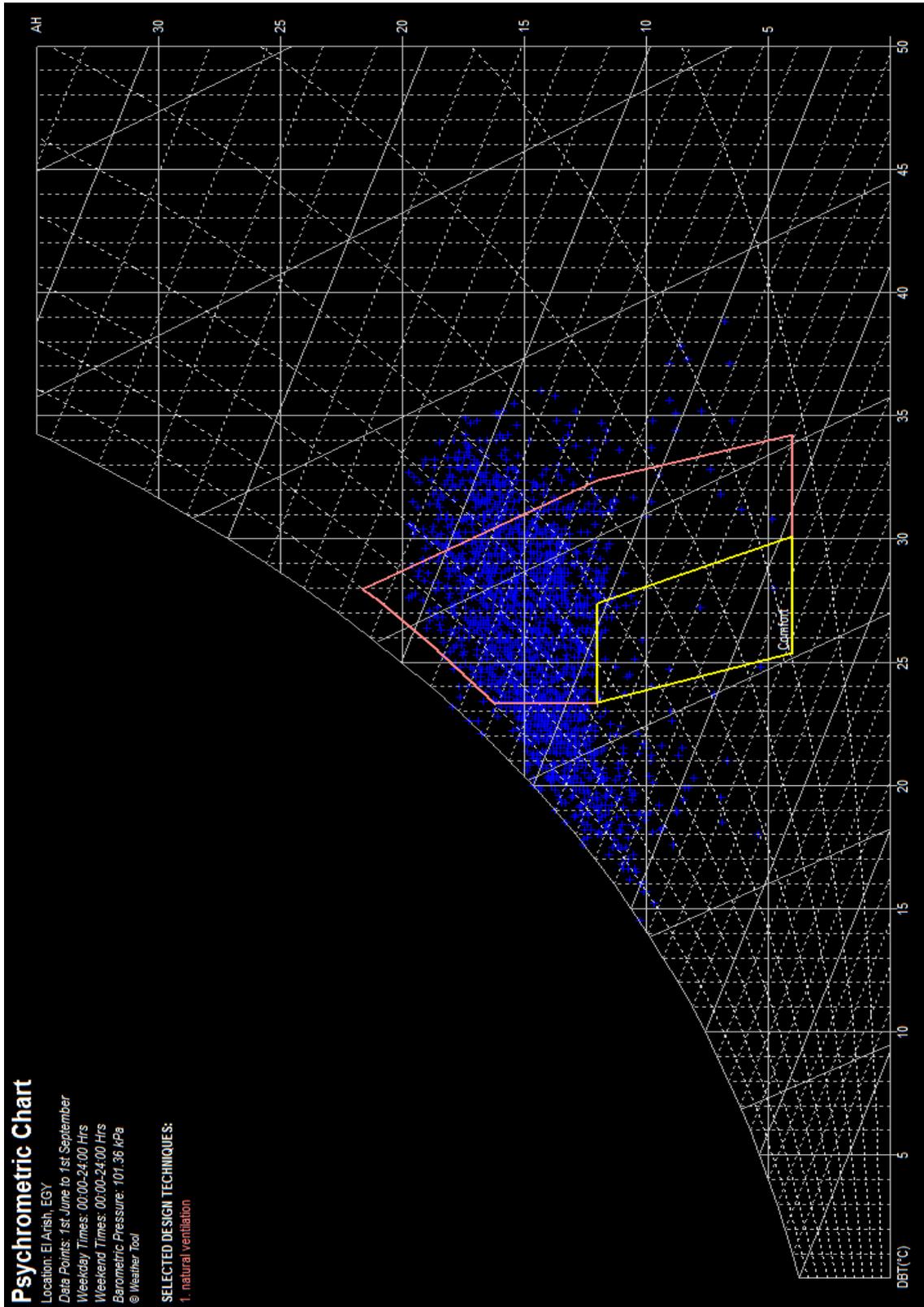


Figure 4.14: Stratégies de refroidissement appropriées à la zone côtière du Nord dans le Sinai (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).



**Figure 4.15:** La zone de confort en bénéficiant de la ventilation naturelle (la zone côtière du Nord) (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

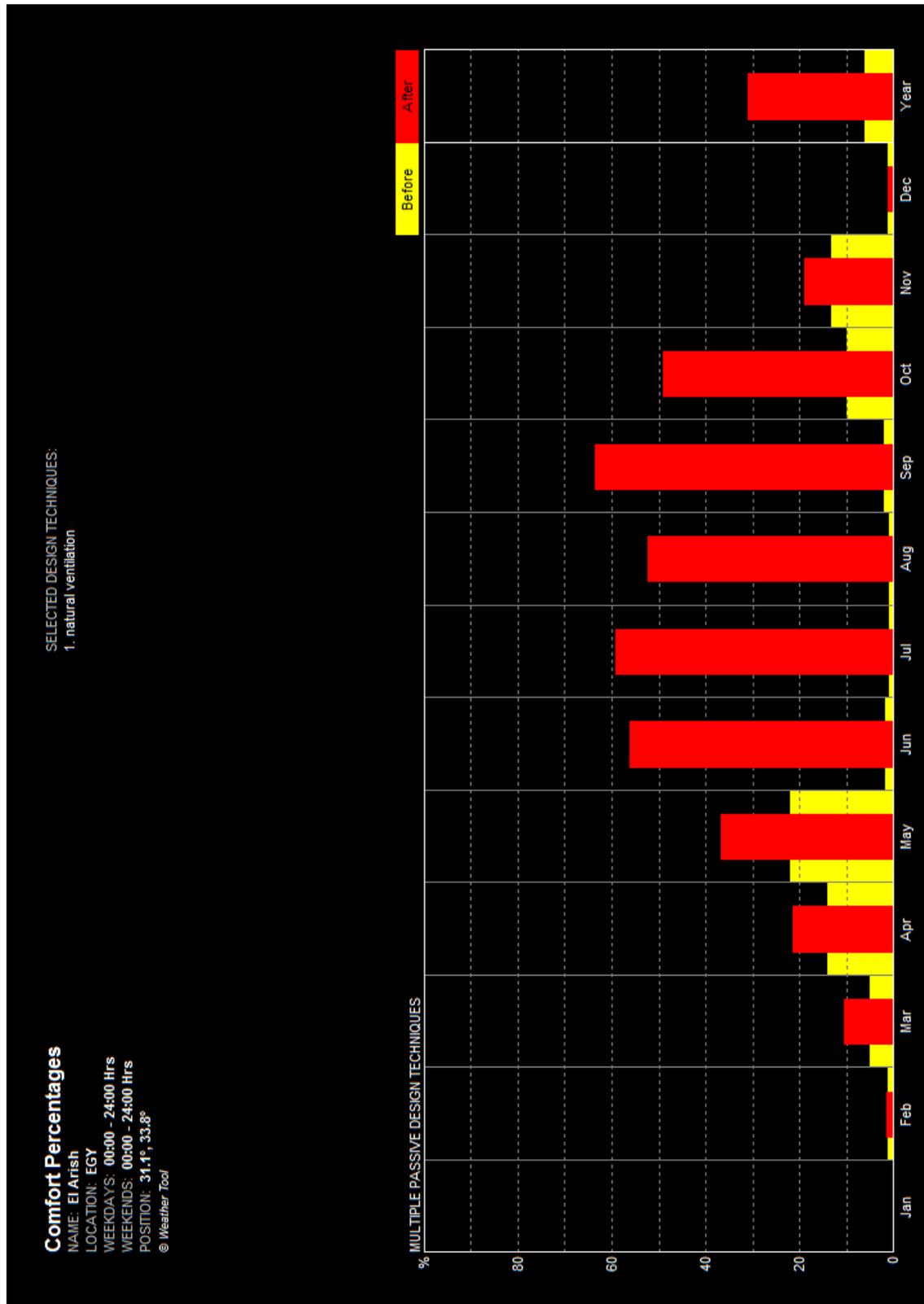


Figure 4.16: Le pourcentage du confort en utilisant les techniques utilisées par rapport à la zone côtière du Nord (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

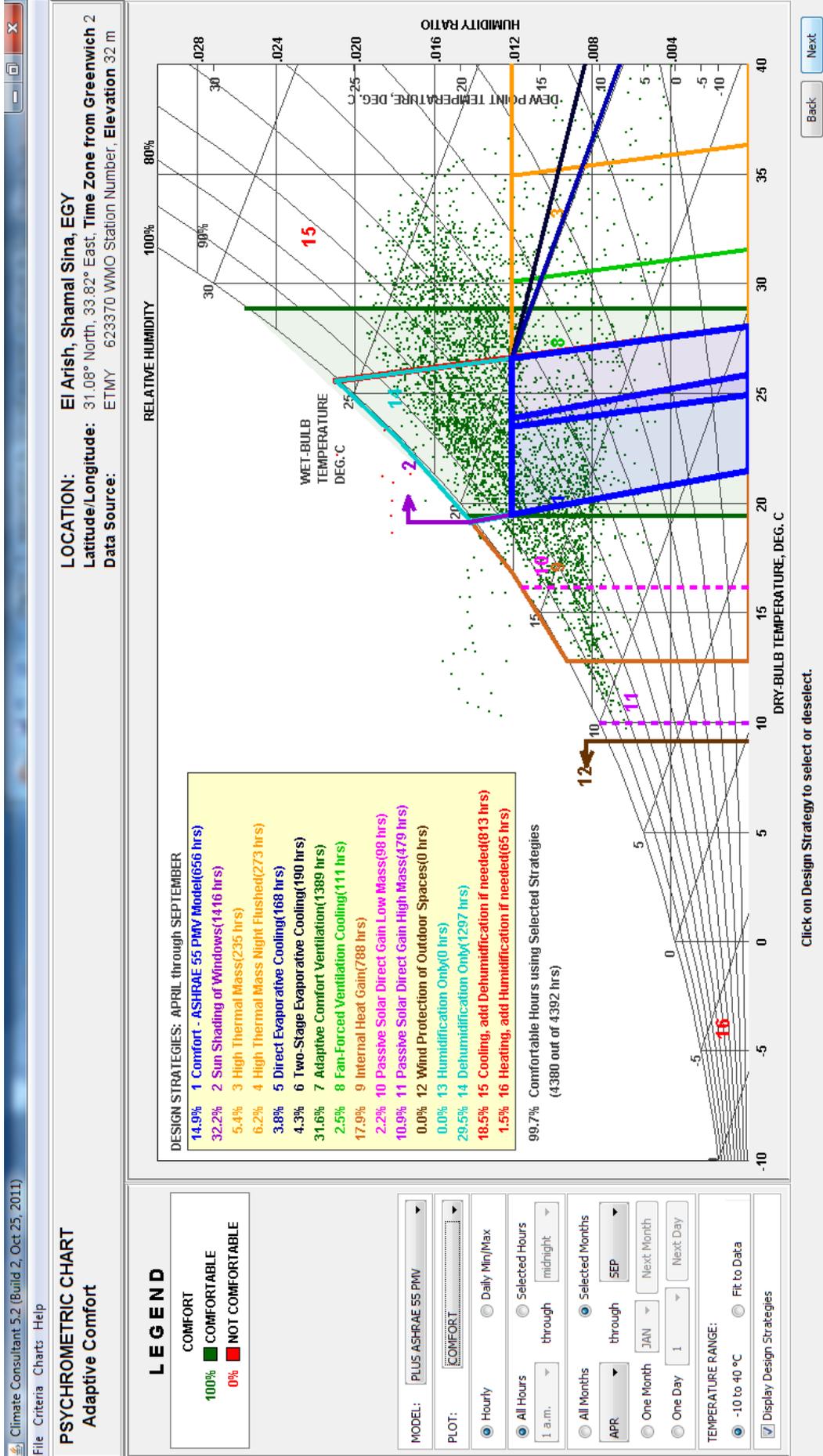


Figure 4.17: L'évaluation des systèmes de refroidissement par rapport à la zone côtière du Nord (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

Selon le diagramme psychrométrique, pendant les mois d'été, la ventilation naturelle peut fournir le confort thermique en contribuant à peu près à 31% du confort thermique dans cette zone, tandis que la protection solaire est nécessaire pendant 32% en l'été afin d'éviter le gain solaire direct. Ces deux systèmes ne répondent pas totalement au problème du confort thermique dans cette zone. Il est nécessaire d'utiliser un système de déshumidification pour surmonter le problème de l'humidité relative élevée qui contribue à l'inconfort pour à peu près 30% de temps. D'autres solutions de refroidissement comme le geocooling par exemple sont nécessaires pendant 18% des heures d'été. Ce système de refroidissement bénéficie des températures presque stables pendant la journée et la moyenne pendant le mois le plus chaud ne dépasse pas 23°C au niveau -4 m, et 25°C au niveau -2 m dans cette région (figure 4.18).

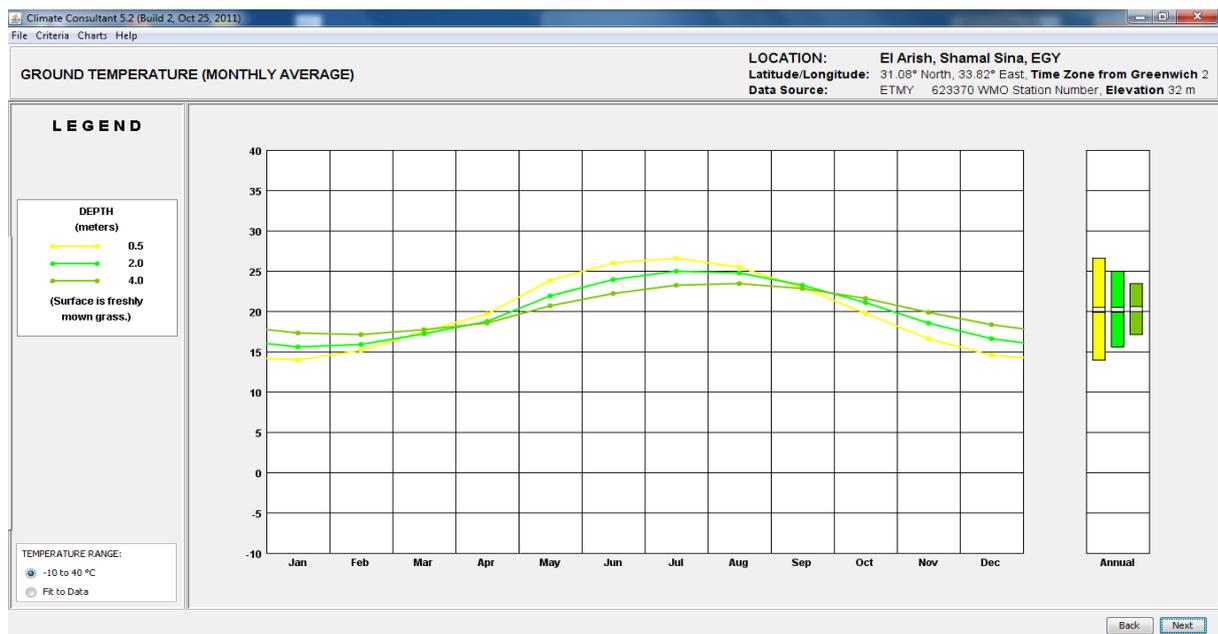
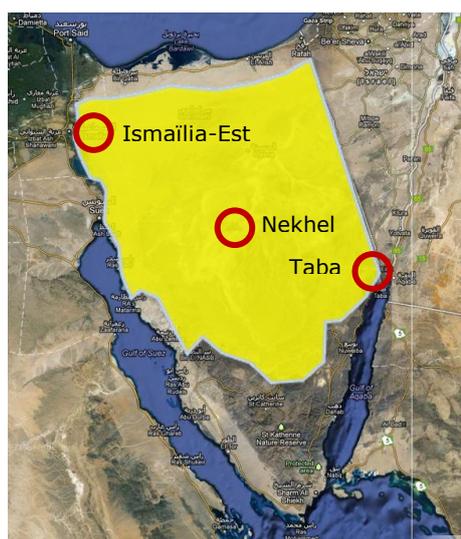


Figure 4.18: Moyennes mensuelles des températures du sol aux niveaux -0,5m, -2,0m et -4,0m (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

## 4.2.2 Zone désertique au centre

La deuxième zone climatique dans cette région est la zone désertique qui se situe au centre de la péninsule du Sinaï entre la latitude 29° et 31° N (figure 4.19). Le climat de cette région est un climat désertique typique qui est chaud et aride ou semi-aride. Ce climat est caractérisé aussi par un grand écart entre les températures élevées pendant la journée et les températures froides pendant la nuit. Les tableaux suivants 4.5, 4.6 & 4.7 présentent les données climatiques de trois villes dans cette région. La première est une ville à l'Est, à côté de la frontière israélienne qui s'appelle Taba, la deuxième est la ville d'Ismaïlia qui se situe à l'ouest et sur le canal de Suez, tandis que la troisième est une petite ville qui s'appelle Nekhel se situe au centre de cette région désertique.



**Figure 4.19:** Isamillia (à l'Ouest), Nekhel (au centre) et Taba (à l'Est), les trois villes représentant le climat de la zone centrale du Sinaï.

**Tableau 4.5:** Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville de Taba dans la zone désertique.

	Température (°C)			Humidité (%)			Wind (m/s)		
	high	avg	low	high	avg	low	high	avg	low
<b>Janvier</b>	20	13	6	83	57	32	18	8	-
<b>Février</b>	23	17	10	73	48	25	24	11	-
<b>Mars</b>	24	17	10	67	41	21	24	11	-
<b>Avril</b>	28	21	14	62	37	18	22	10	-
<b>Mai</b>	32	24	17	57	34	16	22	10	-
<b>Juin</b>	36	28	21	55	31	14	22	10	-
<b>Juillet</b>	37	29	22	61	34	17	20	10	-
<b>Août</b>	37	30	23	70	40	18	20	10	-
<b>Septembre</b>	34	27	21	74	48	26	20	10	-
<b>Octobre</b>	32	25	18	70	44	23	18	8	-
<b>Novembre</b>	25	18	11	74	48	27	18	8	-
<b>Décembre</b>	21	14	7	74	51	31	19	9	-

*Tableau 4.6: Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville d'Ismaïlia dans la zone désertique au centre*

	Température (°C)			Humidité (%)			Wind (m/s)		
	high	avg	low	high	avg	low	high	avg	low
<b>Janvier</b>	21	16	12	79	60	41	25	10	-
<b>Février</b>	23	18	14	70	50	31	29	14	-
<b>Mars</b>	25	19	14	76	54	30	28	16	-
<b>Avril</b>	28	22	17	68	46	26	34	15	-
<b>Mai</b>	32	26	20	69	45	25	28	15	-
<b>Juin</b>	36	30	24	69	46	27	26	14	-
<b>Juillet</b>	35	30	25	80	57	33	27	13	-
<b>Août</b>	36	30	25	81	58	34	23	12	-
<b>Septembre</b>	34	28	23	79	56	33	26	13	-
<b>Octobre</b>	32	26	22	77	56	34	28	12	-
<b>Novembre</b>	26	21	17	80	62	41	25	10	-
<b>Décembre</b>	22	18	14	73	57	39	23	12	-

*Tableau 4.7: Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville de Nekhel dans la zone désertique au centre*

	Température (°C)			Humidité (%)			Wind (m/s)		
	high	avg	low	high	avg	low	high	avg	low
<b>Janvier</b>	19	11	3	76	50	28	19	10	-
<b>Février</b>	21	13	6	69	44	21	23	12	-
<b>Mars</b>	24	15	7	71	41	16	26	12	-
<b>Avril</b>	27	18	10	66	36	14	25	11	-
<b>Mai</b>	30	21	13	64	34	11	27	12	-
<b>Juin</b>	34	25	16	63	33	10	27	11	-
<b>Juillet</b>	35	27	19	69	38	13	25	11	-
<b>Août</b>	36	27	19	80	46	14	27	11	-
<b>Septembre</b>	33	24	16	79	50	20	26	11	-
<b>Octobre</b>	30	23	15	76	49	22	24	11	-
<b>Novembre</b>	24	16	8	76	50	25	19	9	-
<b>Décembre</b>	21	12	4	68	44	24	21	12	-

## WEATHER DATA SUMMARY

## LOCATION: Taba, -, EGY

Latitude/Longitude: 29.55° North, 34.95° East, Time Zone from Greenwich 2

Data Source: MSI 401990 WMO Station Number, Elevation 12 m

MONTHLY MEANS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)	376	485	554	566	605	689	670	668	618	497	353	330
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)	522	616	594	537	511	701	684	697	710	612	441	501
Diffuse Radiation (Avg Hourly)	111	117	144	180	201	109	117	132	110	103	119	90
Global Horiz Radiation (Max Hourly)	710	813	885	969	1017	1034	1005	1038	956	852	704	620
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	791	796	796	792	785	776	774	781	787	788	788	784
Diffuse Radiation (Max Hourly)	791	796	796	792	785	776	774	781	787	788	788	784
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)	3427	4487	5530	6286	6774	7720	7495	7497	6577	4645	3238	2996
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)	4823	5911	6149	6065	5744	8020	7722	8276	7888	6079	4241	4673
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)	1024	1114	1471	2027	2318	1298	1386	1521	1207	1008	1115	828
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)	15	16	19	23	27	31	33	33	30	26	21	16
Dew Point Temperature (Avg Monthly)	9	9	12	13	16	18	19	20	19	16	13	10
Relative Humidity (Avg Monthly)	46	33	36	33	26	25	23	28	32	36	37	48
Wind Direction (Monthly Mode)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	340
Wind Speed (Avg Monthly)	4	3	4	5	5	5	3	5	5	4	4	4
Ground Temperature (Avg Monthly of 3 Depths)	19	18	18	19	23	26	29	30	29	28	24	21

Back

Next

**Tableau 4.5:** Des données climatiques de la ville de Taba dans la zone désertique (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

L'écart de la température entre le jour et la nuit et entre l'été et l'hiver est très clair dans cette région. Cet écart apparaît dans les moyennes des températures maximums et minimums. La température opérative y varie entre 37° et 46°C maximum et entre 13° et 21°C minimum pendant l'été, tandis que pendant l'hiver elle varie entre 25° et 28° C maximum et entre 6° et 9° C minimum (figure 4.20).

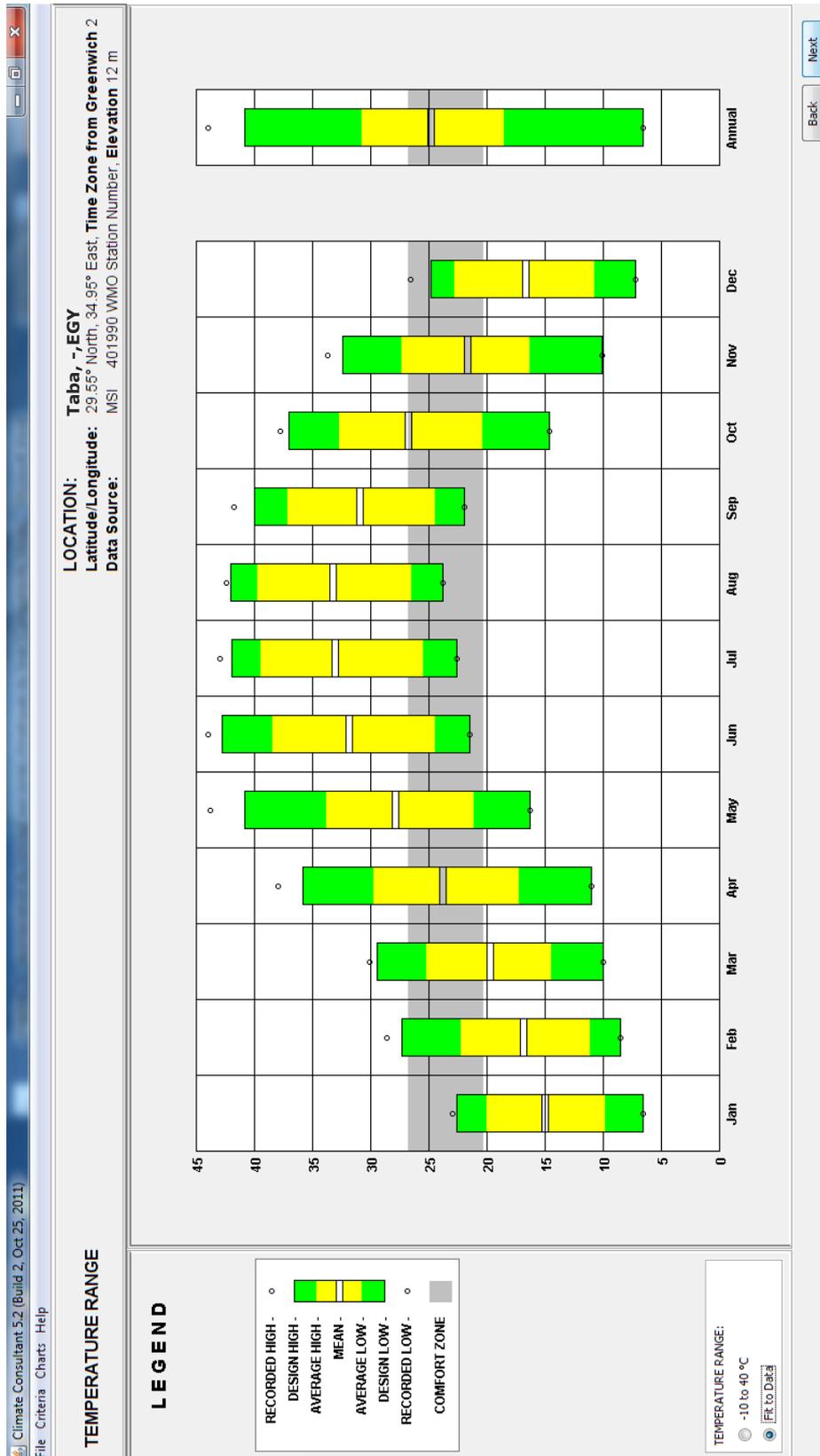
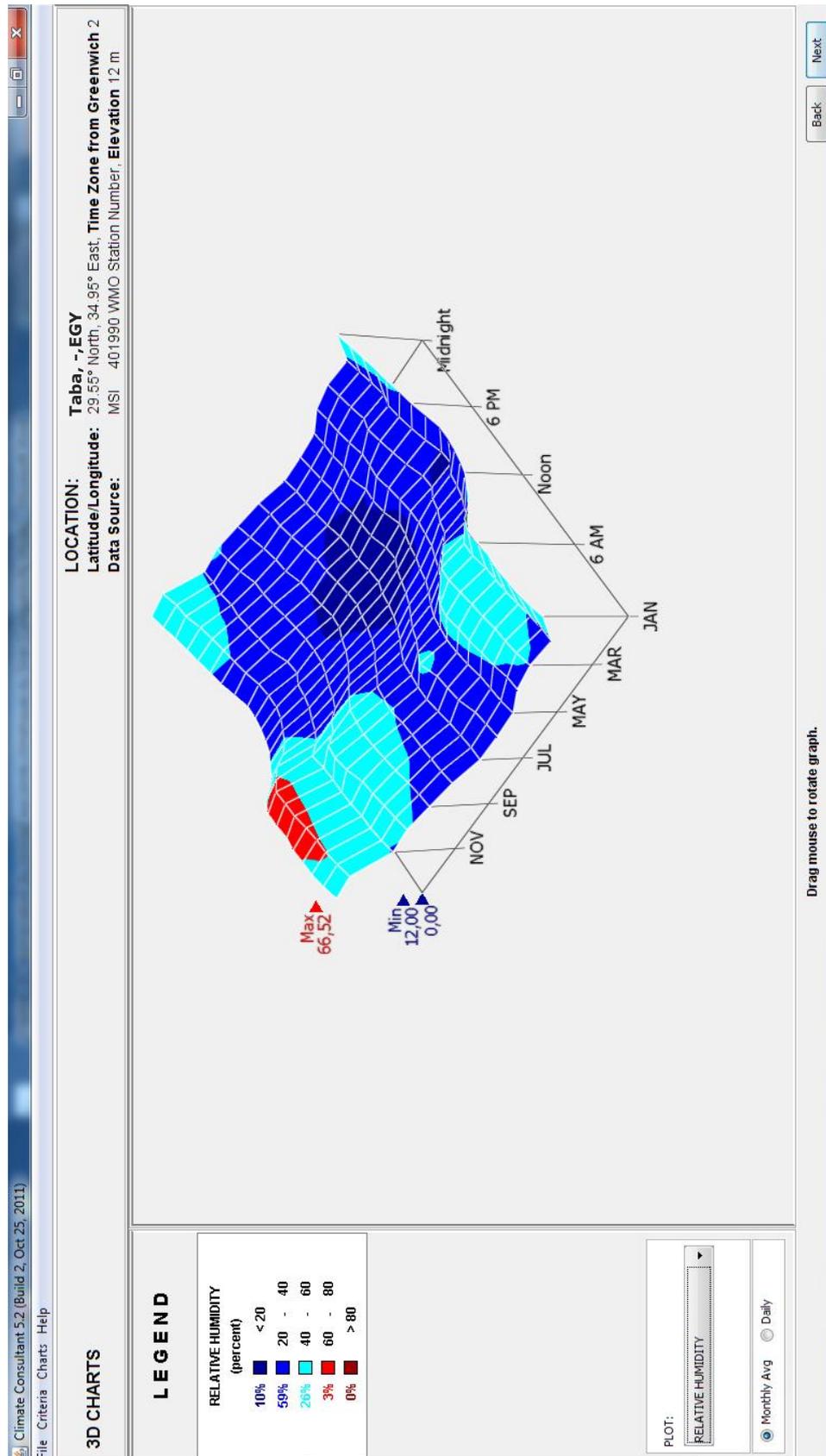


Figure 4.20: Températures moyennes mensuelles à Taba, Sinai (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

L'humidité relative fluctue entre 10 et 83% avec des moyennes entre 31% et 61%. Le graphe suivant montre que pour la ville de Taba, 59% du temps l'humidité relative est entre 20% et 40% ce qui présente un climat aride ou semi-aride (figure 4.21).



**Figure 4.21:** Le pourcentage de l'humidité relative par rapport au temps dans la ville de Taba (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

Dans cette région, la vitesse du vent monte à plus de 14 m/s, et les moyennes mensuelles sont toujours entre 3 et 6 m/s. La direction du vent dominant est le Nord avec une moyenne entre 4,16 m/s (15 km/h) et 9,7 m/s (35 km/h) (figures 4.22 & 4.23).

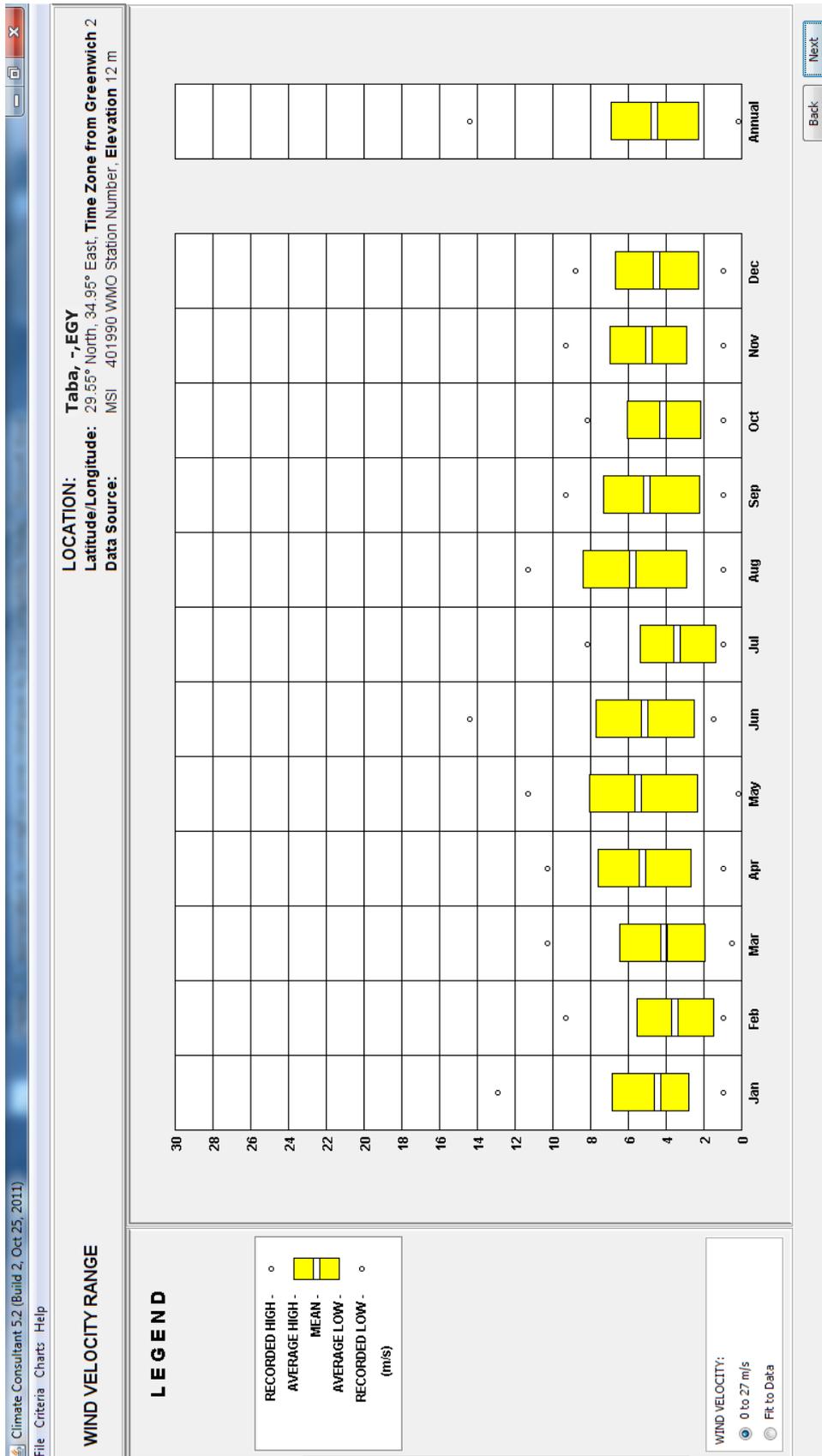
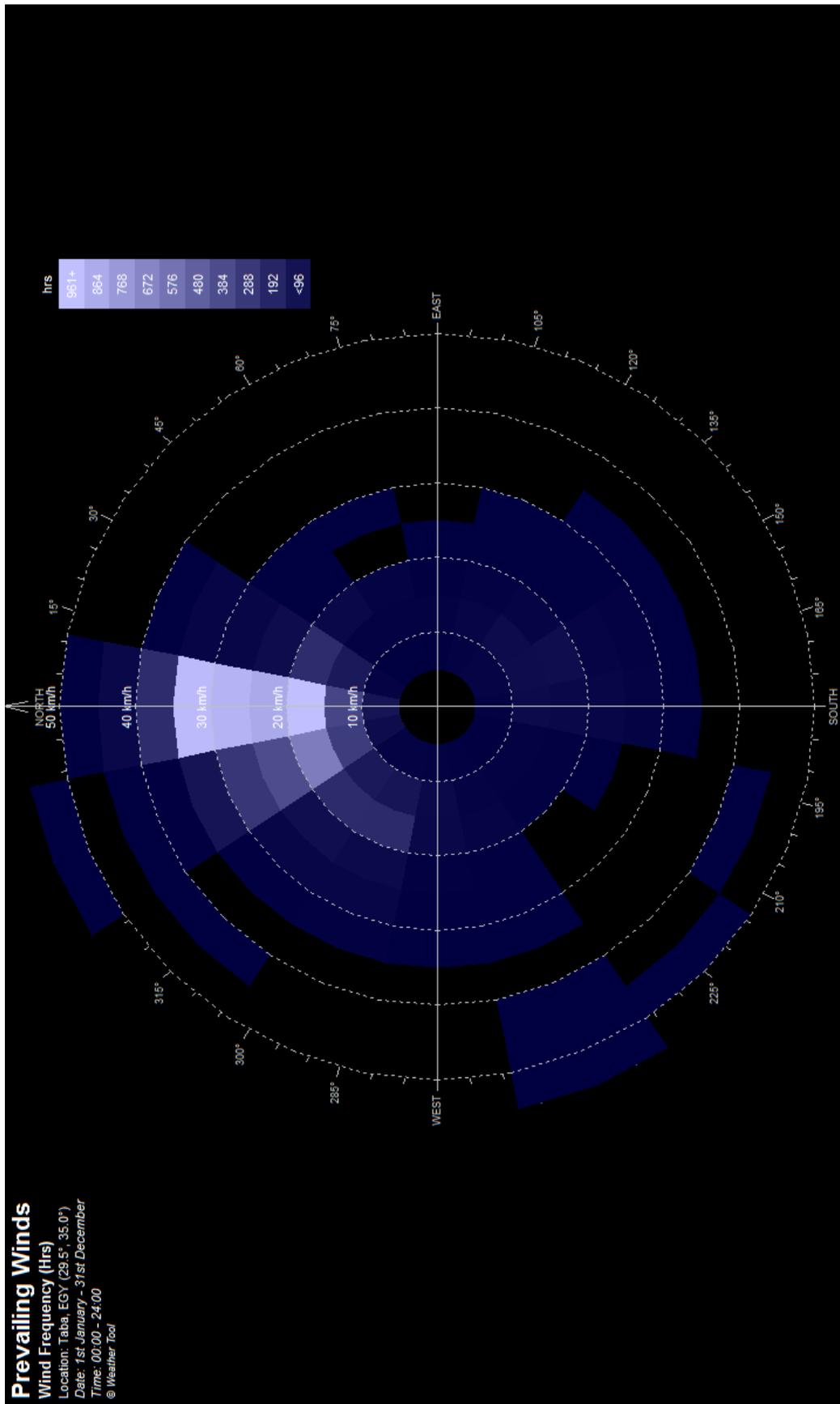
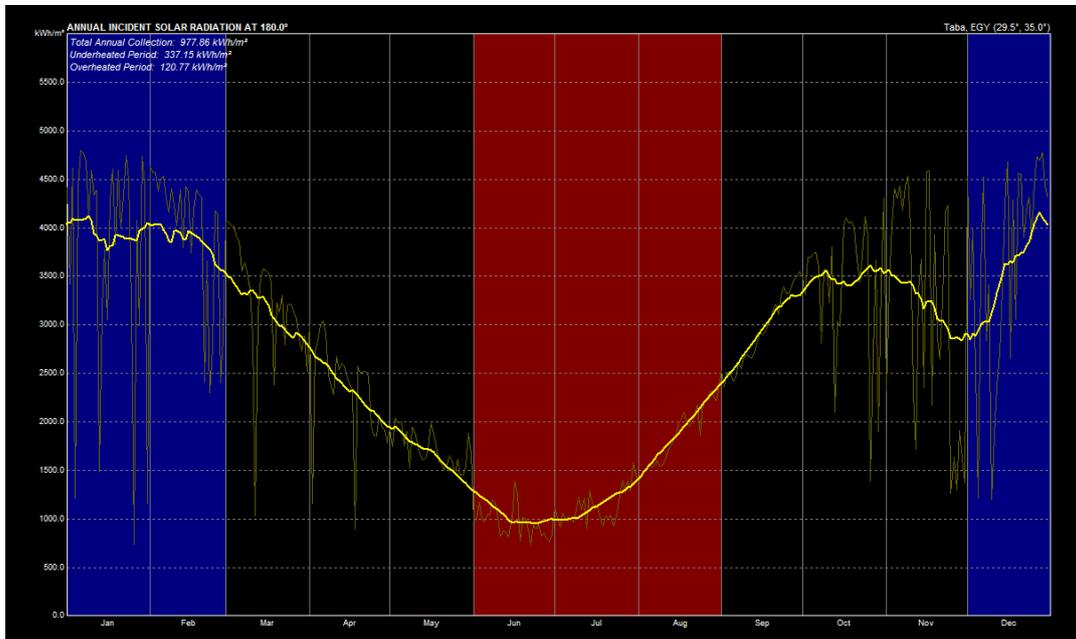


Figure 4.22: La vitesse du vent dans la région désertique au centre du Sinai (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

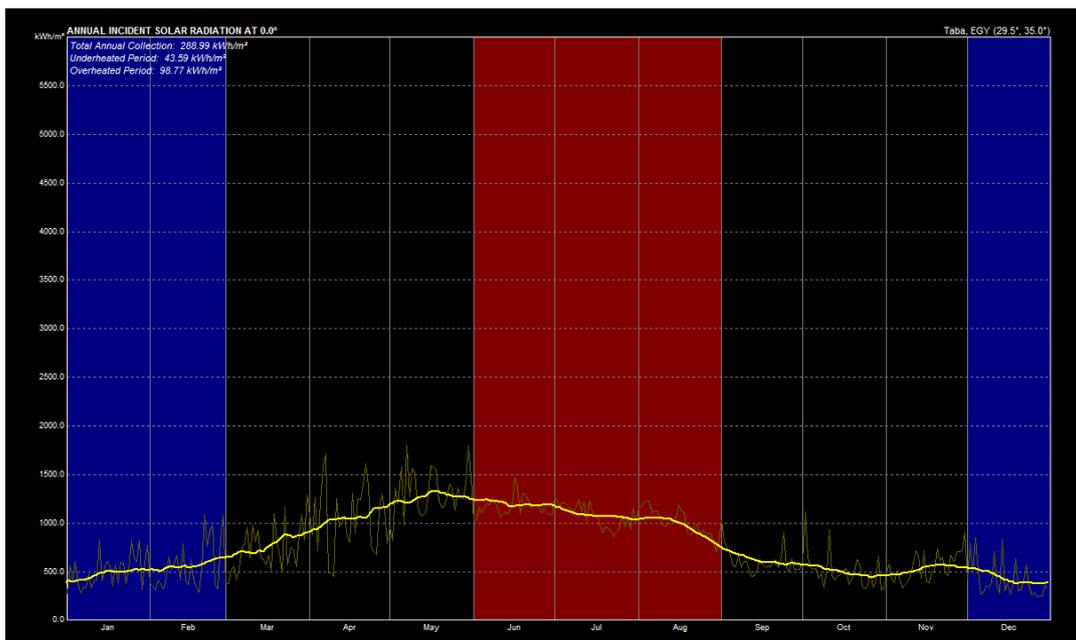


**Figure 4.23:** La rose des vents à la ville de Taba (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

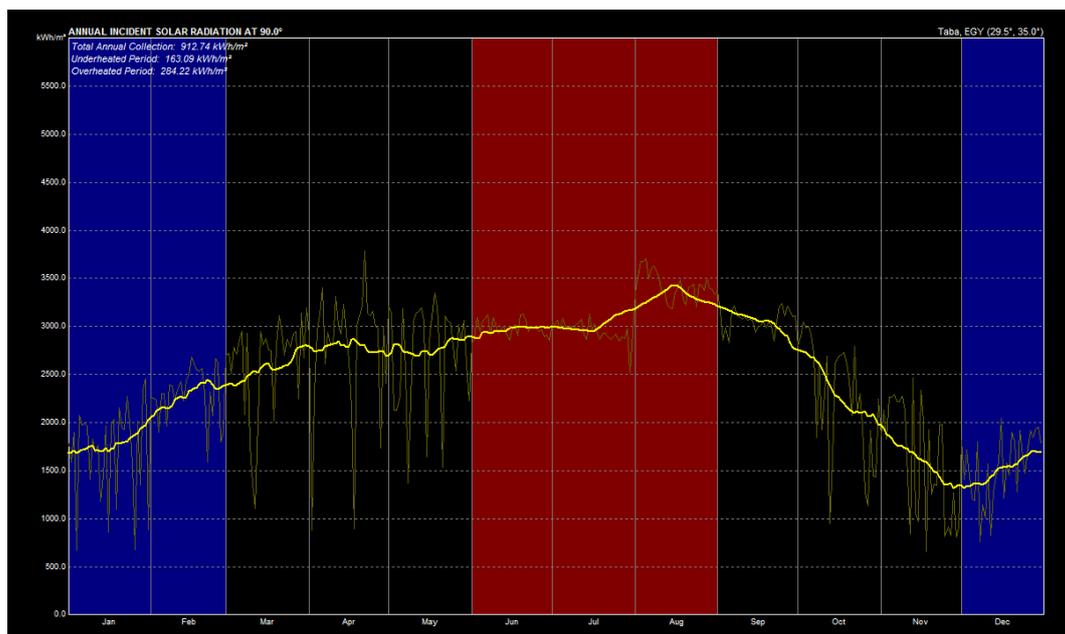
L'énergie solaire oscille entre 940 et 1050 W/m<sup>2</sup> pendant l'été et entre 550 et 750 W/m<sup>2</sup> pendant l'hiver. Pour 1m<sup>2</sup> de surface verticale, la façade Sud reçoit entre 1000 et 4000 kWh/m<sup>2</sup>, la façade Nord reçoit entre 400 et 1300 kWh/m<sup>2</sup>, la façade Est reçoit entre 1300 et 3400 kWh/m<sup>2</sup>, et la façade Ouest reçoit entre 1200 et 2900 kWh/m<sup>2</sup> (figure 4.24).



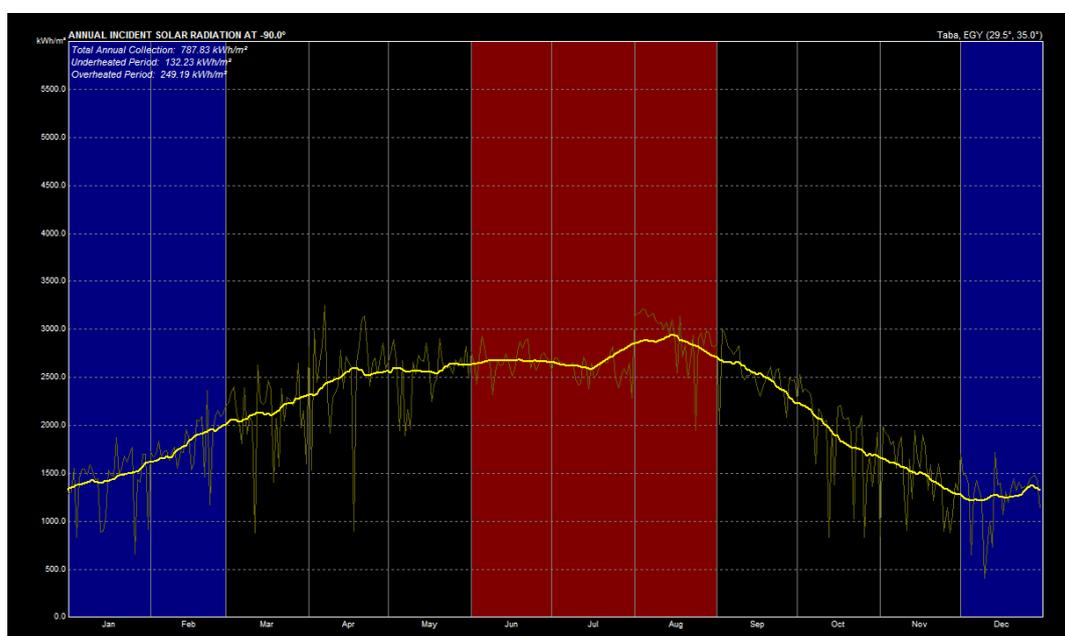
Énergie solaire reçue par une 1m2 de façade Sud



Énergie solaire reçue par une 1m2 de façade Nord



Énergie solaire reçue par une 1m2 de façade Est



Énergie solaire reçue par une 1m2 de façade Ouest

**Figure 4.24:** L'énergie solaire reçue par 1m2 verticale (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

Le diagramme psychrométrique pour cette région montre que, pendant l'été, le climat est chaud et aride ou semi-aride. Le confort peut être donc obtenu sans l'humidification ou la déshumidification de l'air. L'analyse du diagramme de confort affirme que 25,8% des heures d'été sont à l'intérieur de la zone de confort. Les stratégies de refroidissement les plus appropriées sont d'utiliser la ventilation naturelle et le refroidissement par évaporation soit par un système d'évaporation directe ou indirecte (figures 4.25, 4.26 & 4.27).

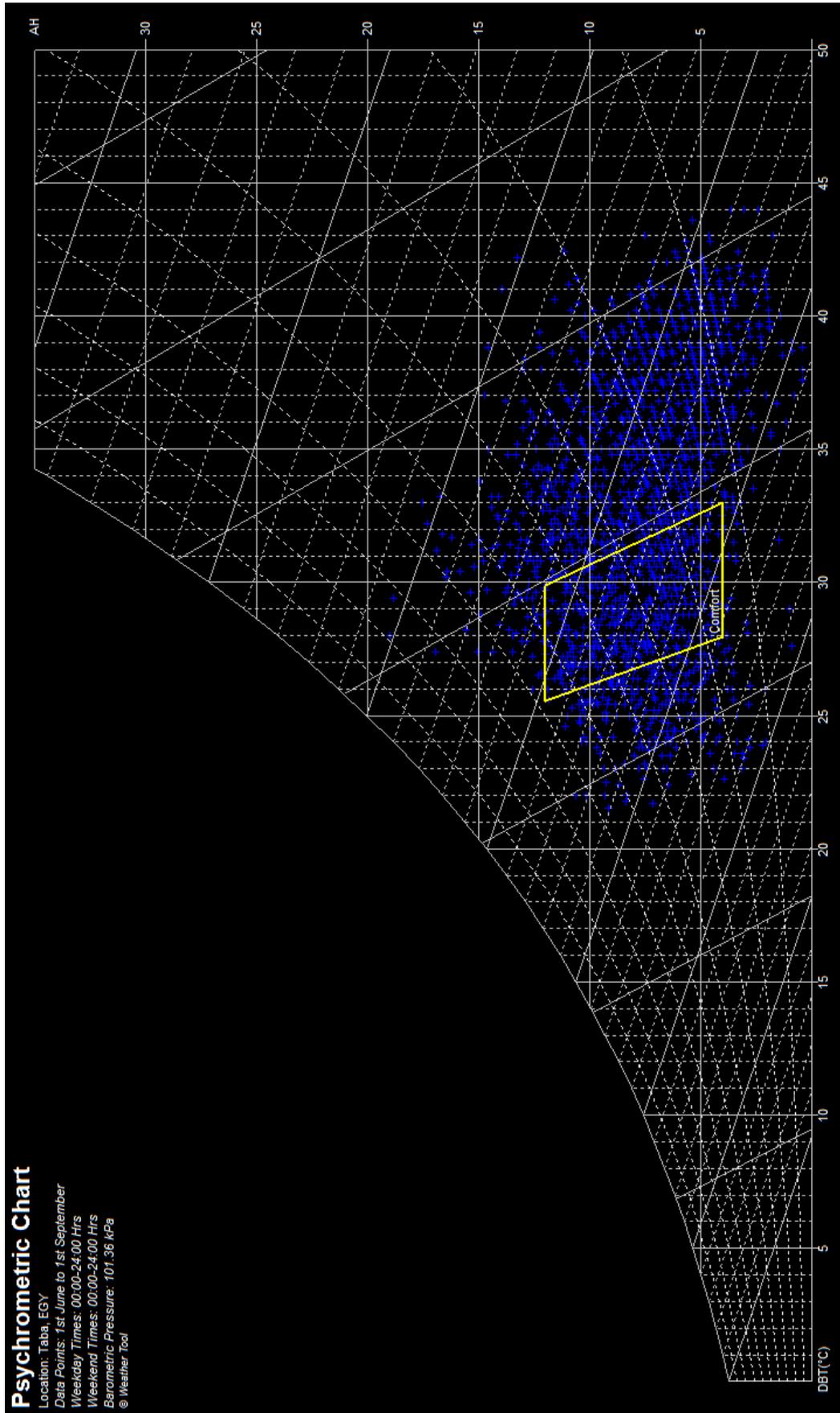
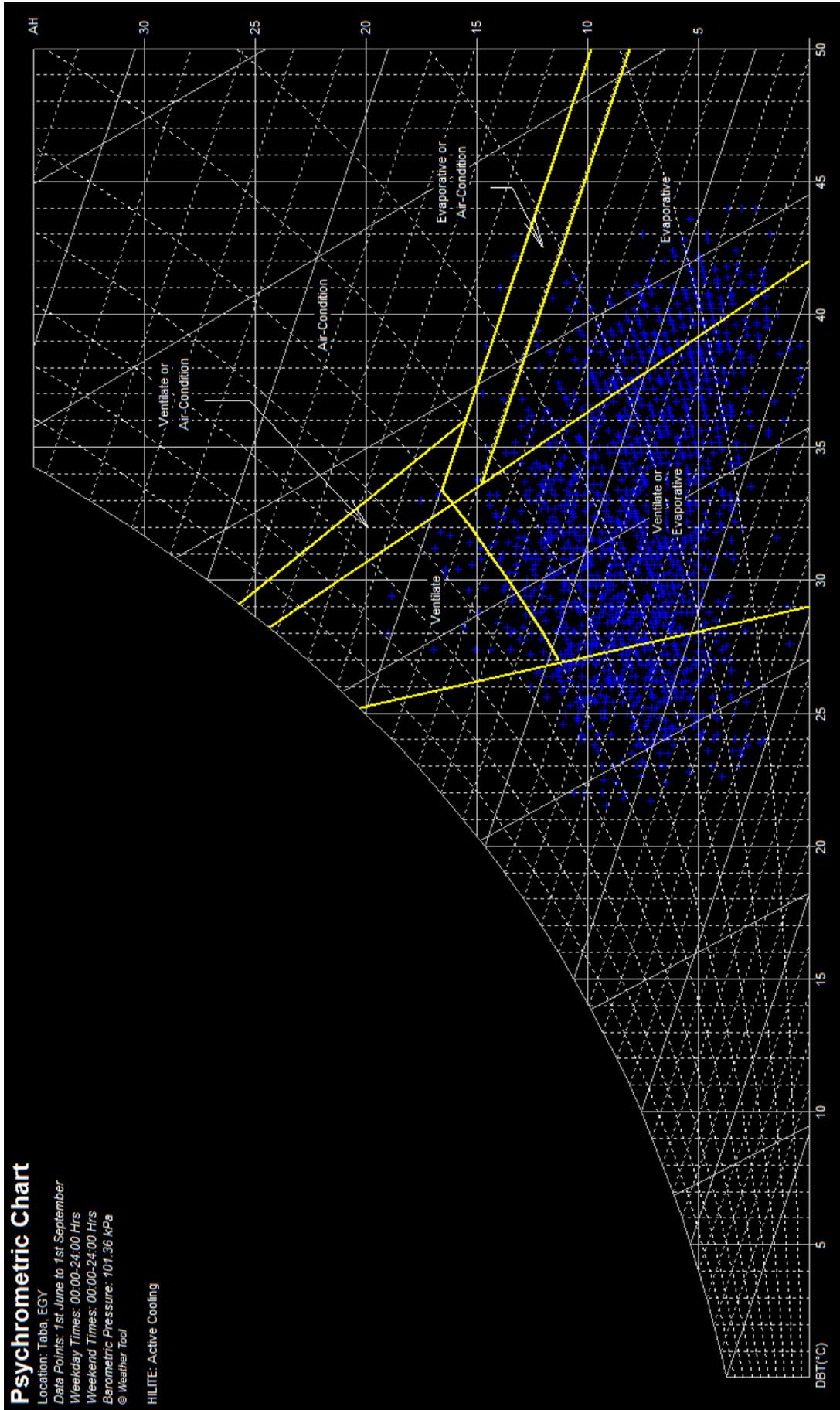


Figure 4.25: Le diagramme psychrométrique de la zone désertique au centre du Sinai (pendant l'été) (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).



**Figure 4.26:** Stratégies de refroidissement appropriées à la zone désertique au centre du Sinai (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

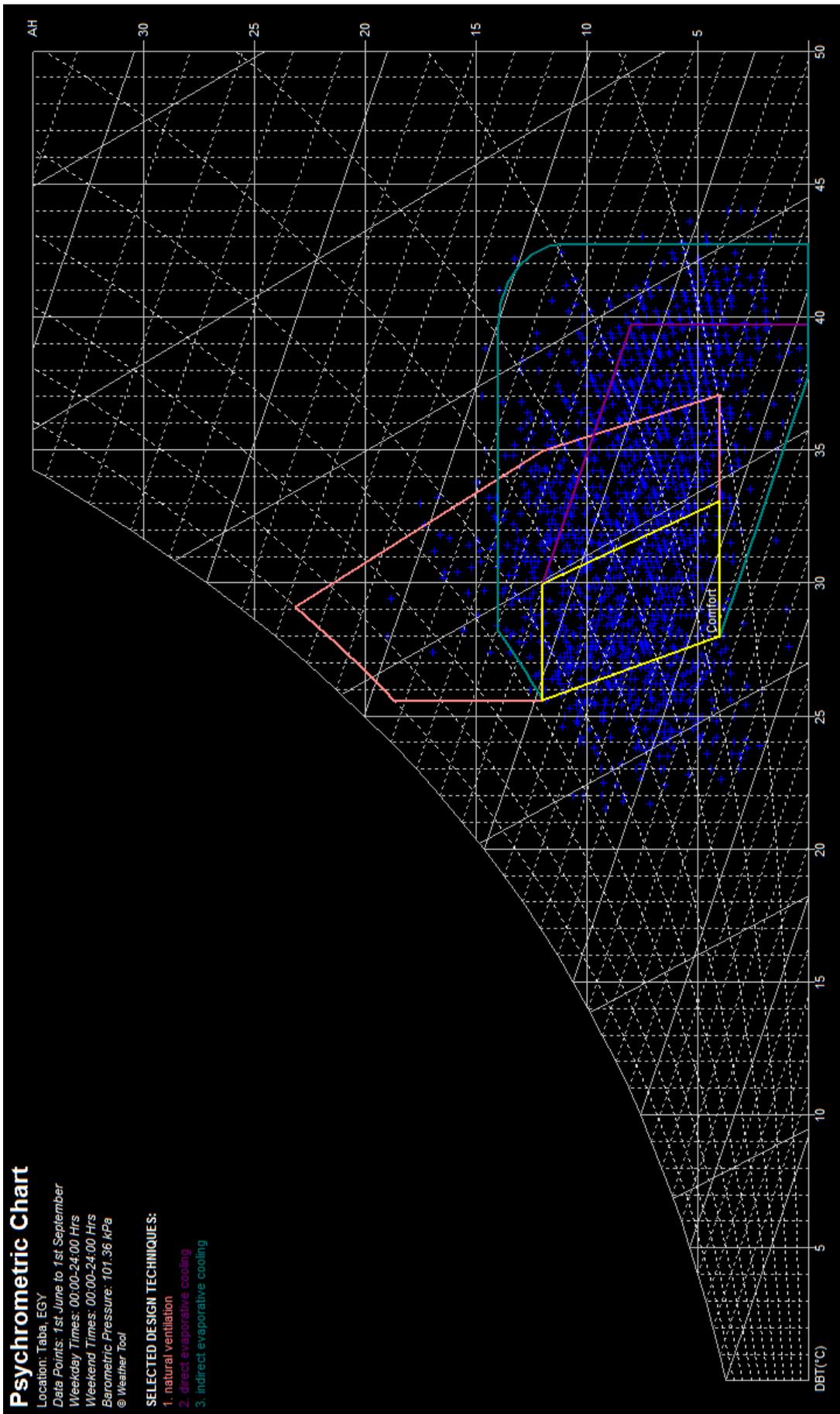
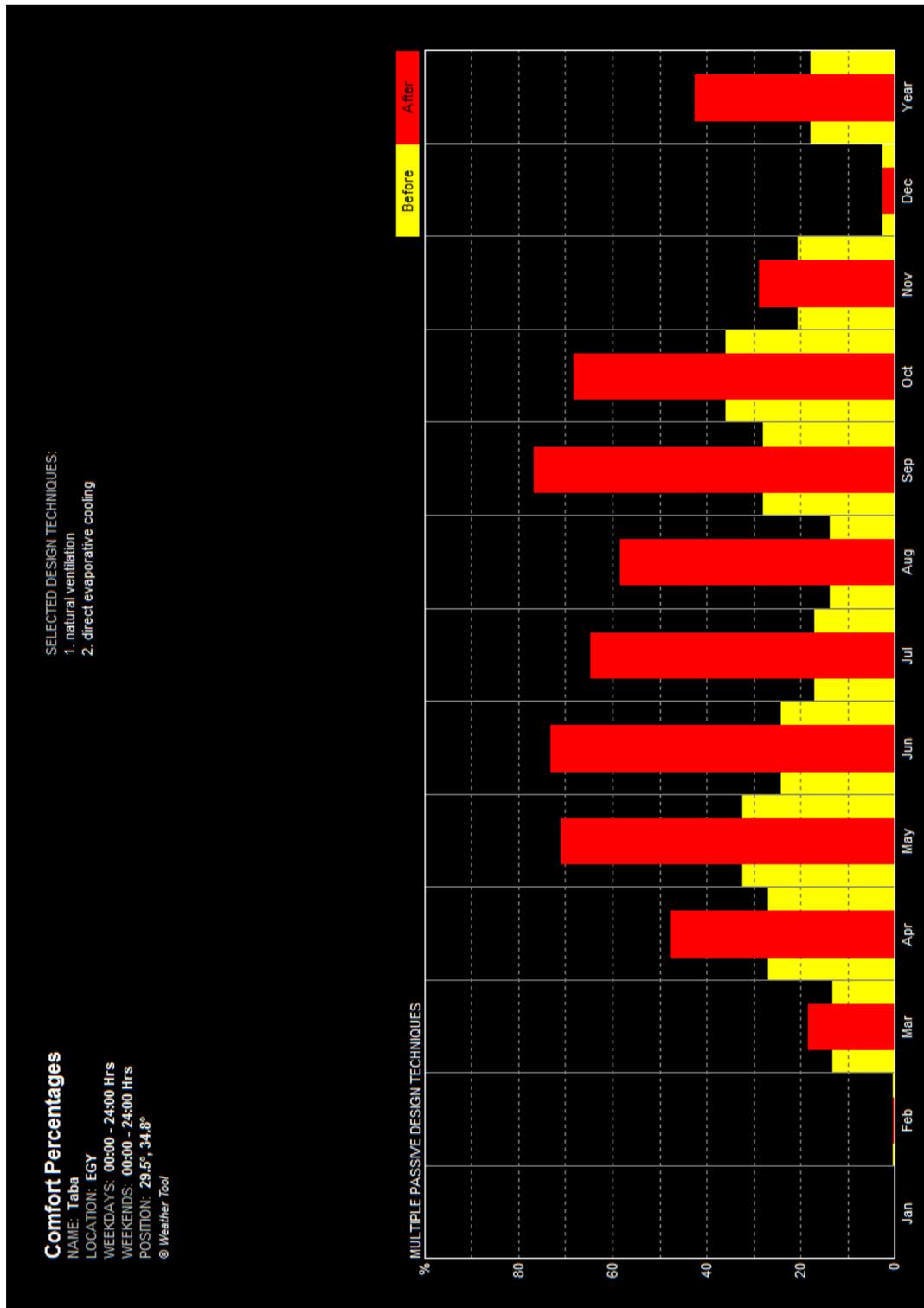


Figure 4.27: La zone de confort en bénéficiant de la ventilation naturelle et un refroidissement par évaporation directe et indirecte (la zone désertique au centre du Sinai) (l'analyse est faite sur le logiciel «Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

La figure 4.28 montre que la part principale du problème du confort thermique dans cette zone climatique peut être résolue par des systèmes qui bénéficient de la ventilation naturelle et du refroidissement par évaporation. La figure 4.28 permet de calculer que ces techniques de refroidissement peuvent fournir le confort thermique pour 60% à 80% du temps. Afin de surmonter le problème de l'écart de température entre la nuit et le jour, le bâtiment doit avoir une masse importante avec une inertie élevée. Selon l'analyse, cette technique peut augmenter le pourcentage de confort fourni jusqu'à 90% à 100% du temps (figure 4.29).



**Figure 4.28:** Le pourcentage du confort en utilisant les techniques de refroidissement par évaporation et en utilisation la ventilation naturelle dans la zone désertique au centre du Sinaï (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

La figure 4.30 indique que le refroidissement par évaporation directe et indirecte peut résoudre 66% du problème de l'inconfort thermique dans cette zone climatique. La ventilation naturelle joue un rôle important pour fournir les conditions du confort pendant l'été, elle peut fournir le confort pour 25% du temps, et 10% en plus avec l'utilisation de la ventilation mécanique. Ces systèmes de refroidissement ont besoin d'une protection solaire afin d'éviter la surchauffe du rayonnement solaire direct. Cette protection solaire peut résoudre 27% du problème de refroidissement nécessaire, tandis que la climatisation ne solutionne que 3,6% du problème de refroidissement.

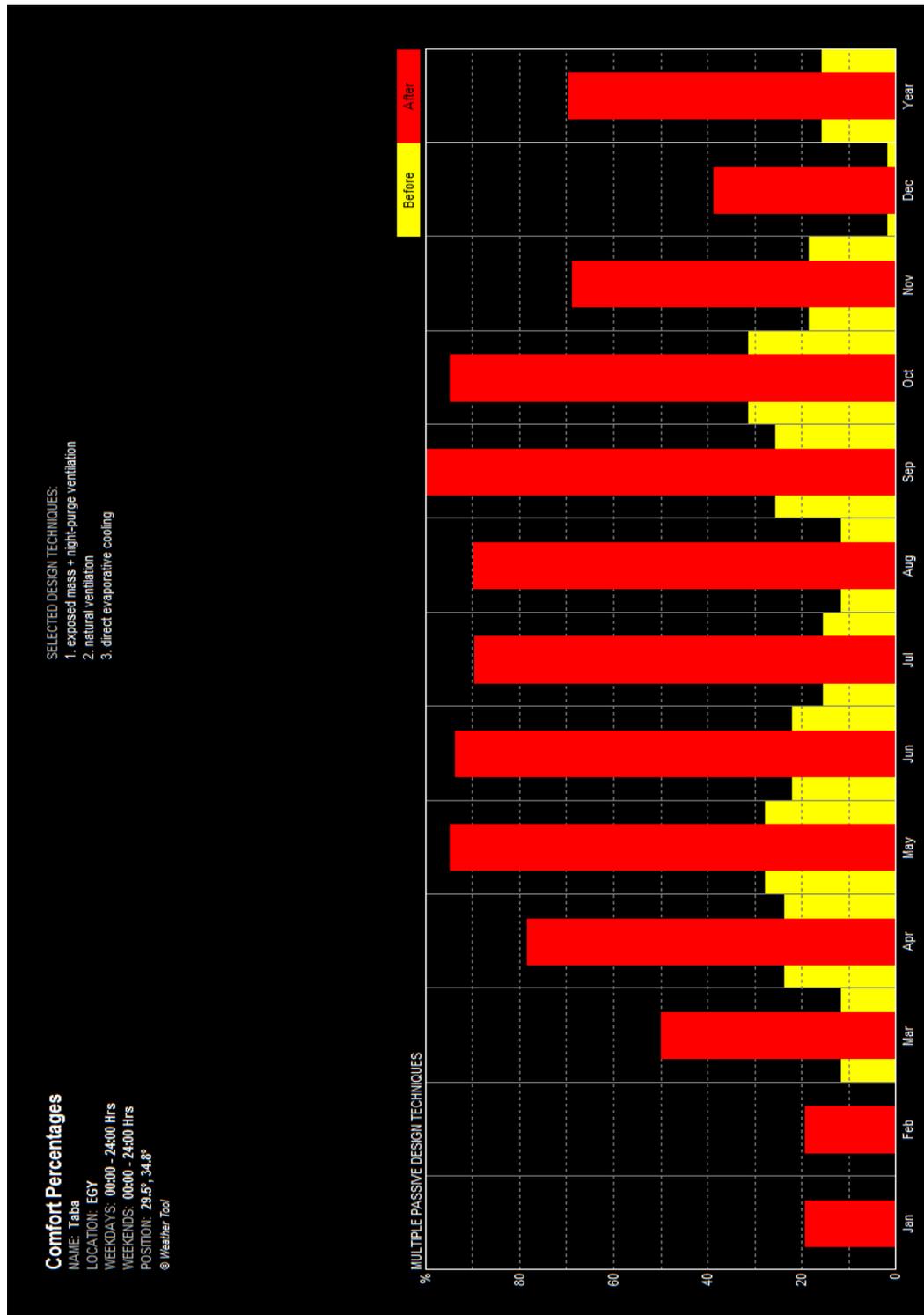


Figure 4.29: Le pourcentage du confort en utilisant les techniques de refroidissement par évaporation, la ventilation naturelle et inertie avec un refroidissement nocturne dans la zone désertique au centre (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

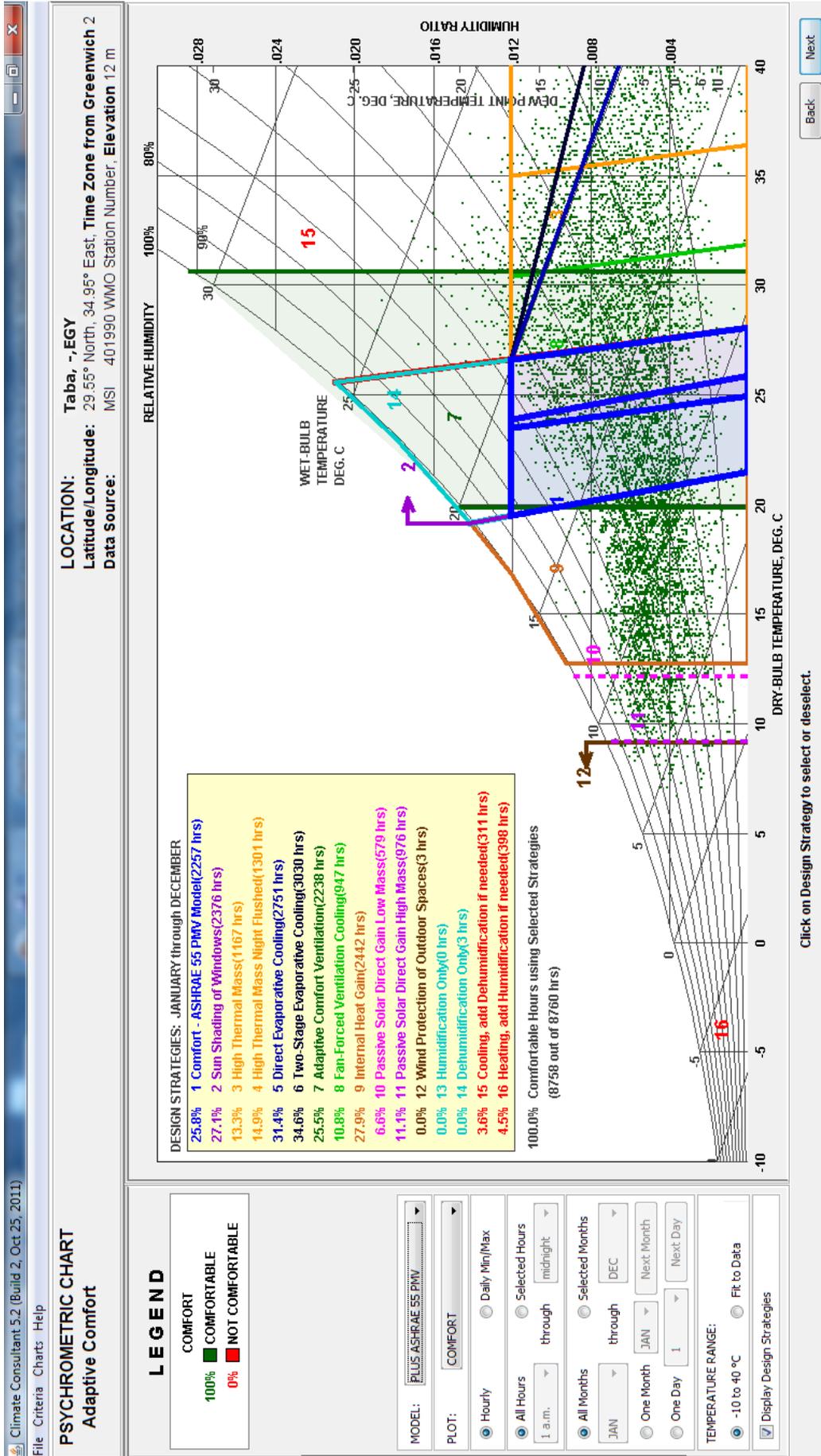


Figure 4.30: Évaluation des systèmes de refroidissement dans la zone désertique au centre du Sinai (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

### 4.2.3 Zone côtière du Sud

Cette zone au bord de la Mer Rouge se trouve au sud-est et au sud-ouest de la péninsule du Sinaï. Elle occupe une bande étroite de 1km à 5km de largeur et parallèle au golfe d'Aqaba au Sud-Est et au golfe de Suez au Sud-Ouest. Nous avons pris la ville de Charm El-Cheikh comme ville représentante du climat de cette zone climatique très chaude (figure 4.31). Les tableaux suivants montrent les données climatiques de cette zone (tableaux 4.9& 4.10).

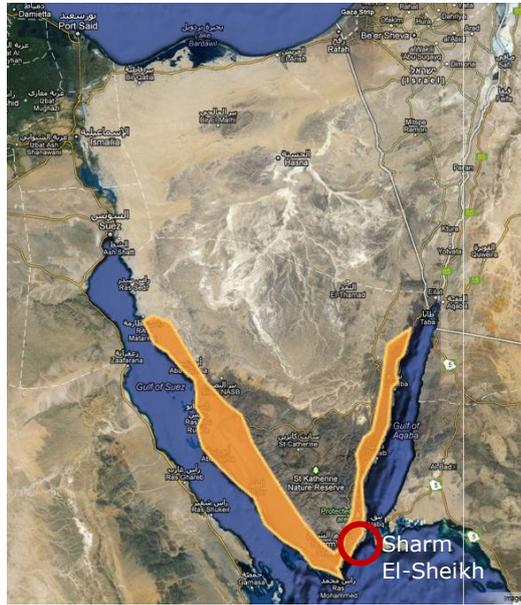


Figure 4.31: La ville de Charm El-Cheikh, la zone côtière du Sud.

Tableau 4.9: Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville de Charm El-Cheikh dans la zone côtière du Sud

	Température (°C)			Humidité (%)			Wind (m/s)		
	high	avg	low	high	avg	low	high	avg	low
<b>Janvier</b>	24	19	16	66	50	35	25	12	-
<b>Février</b>	25	21	17	63	45	31	28	14	-
<b>Mars</b>	27	23	19	57	39	24	31	18	-
<b>Avril</b>	30	26	22	56	33	17	28	15	-
<b>Mai</b>	34	29	25	51	31	17	30	18	-
<b>Juin</b>	38	32	27	46	26	14	32	20	-
<b>Juillet</b>	38	33	28	55	33	18	30	18	-
<b>Août</b>	39	34	30	51	32	18	31	18	-
<b>Septembre</b>	36	31	27	59	39	24	35	22	-
<b>Octobre</b>	34	29	25	58	38	23	29	17	-
<b>Novembre</b>	29	25	21	55	38	26	26	16	-
<b>Décembre</b>	25	21	17	56	41	27	23	13	-

Climate Consultant 5.2 (Build 2, Oct 25, 2011)  
File Criteria Charts Help

**LOCATION: Sharm El-Sheikh, -EGY** :GY  
**Latitude/Longitude:** 27.15° North, 33.72° East, **Time Zone from Greenwich 2**  
**Data Source:** ETMY 624630 WMO Station Number, **Elevation** 14 m

MONTHLY MEANS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)	426	505	564	619	645	680	670	637	592	525	431	401
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)	587	608	592	611	594	645	625	616	615	579	551	583
Diffuse Radiation (Avg Hourly)	103	131	155	157	182	182	184	168	146	142	112	91
Global Horiz Radiation (Max Hourly)	827	981	1091	1223	1234	1139	1225	1109	1188	962	876	867
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	1286	1277	1342	1409	1292	1235	1257	1322	1283	1224	1242	1380
Diffuse Radiation (Max Hourly)	1286	1277	1342	1409	1292	1235	1257	1322	1283	1224	1242	1380
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)	3910	4699	5690	6938	7317	7734	7562	7168	6352	5034	4063	3703
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)	5409	5781	6171	6927	6858	7491	7120	7060	6697	5694	5254	5417
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)	988	1260	1604	1805	2129	2133	2141	1936	1620	1432	1112	883
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)	17	17	20	24	28	31	32	32	30	26	22	18
Dew Point Temperature (Avg Monthly)	6	5	7	9	11	13	14	15	14	14	11	7
Relative Humidity (Avg Monthly)	49	44	44	40	35	35	35	38	38	50	50	50
Wind Direction (Monthly Mode)	300	270	280	300	350	340	0	340	310	340	300	290
Wind Speed (Avg Monthly)	4	5	5	6	5	7	6	6	6	6	5	5
Ground Temperature (Avg Monthly of 3 Depths)	20	20	21	23	26	29	29	29	27	25	22	21

Back Next

**Tableau 4.10:** Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville de Charm El-Cheikh dans la zone côtière du Sud (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

La température air maximum dans cette zone climatique varie entre 24°C et 39°C, et le minimum entre 16°C et 30°C. Pendant l'été, le maximum varie entre 30°C et 39°C, et le minimum entre 22°C et 30°C minimum. Une étude montre que la température opérative maximale pendant l'été varie entre 39°C et 42°C, et la température opérative minimale pendant la même période oscille entre 19° et 22°C. [Ayman, 2011, 606]. Ce climat est considéré comme le plus chaud dans la région du Sinaï. La figure 4.32 atteste que du mois de Mai au mois d'Octobre, les températures moyennes mensuelles sont chaudes et en dehors la zone de confort.

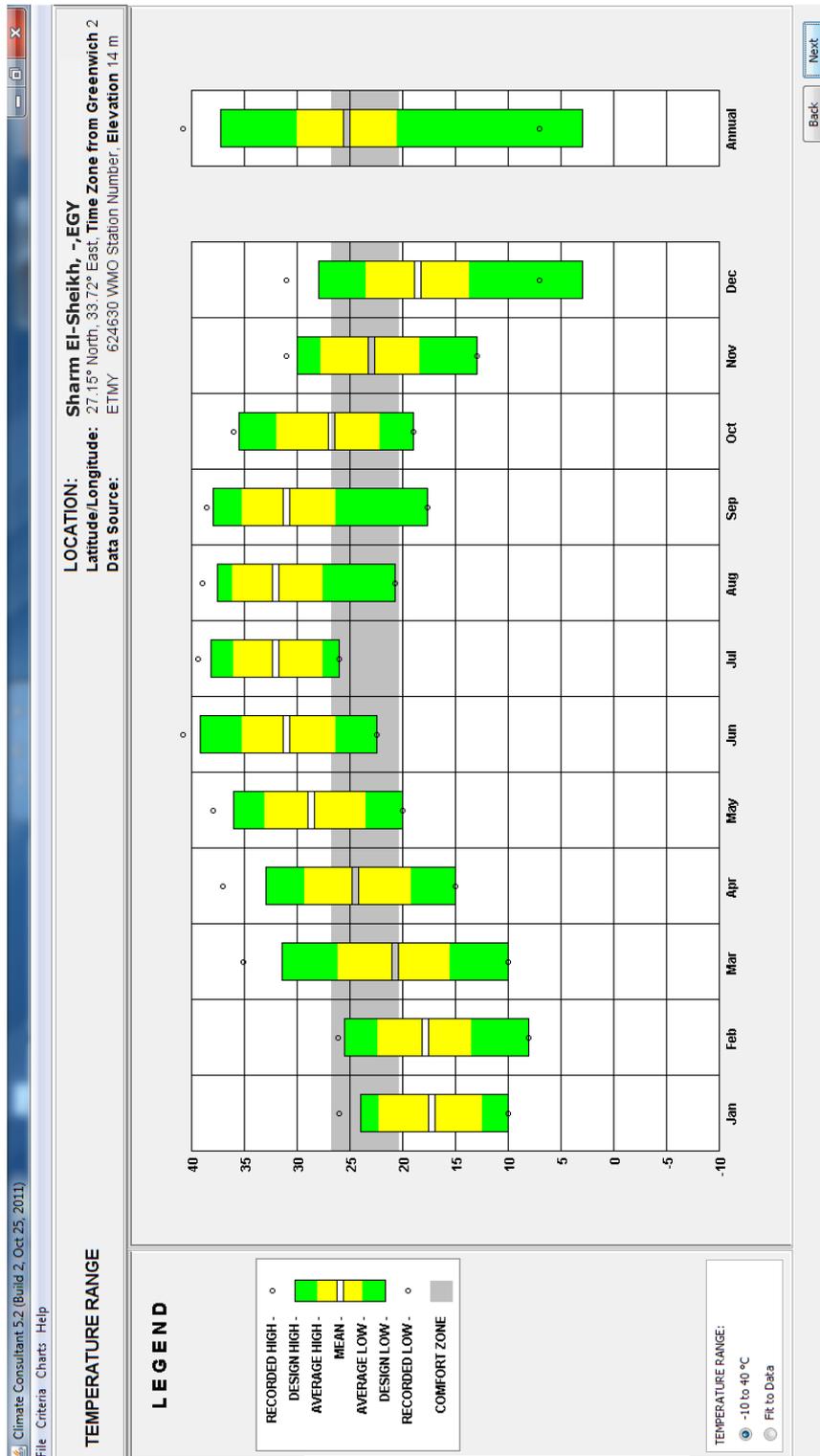
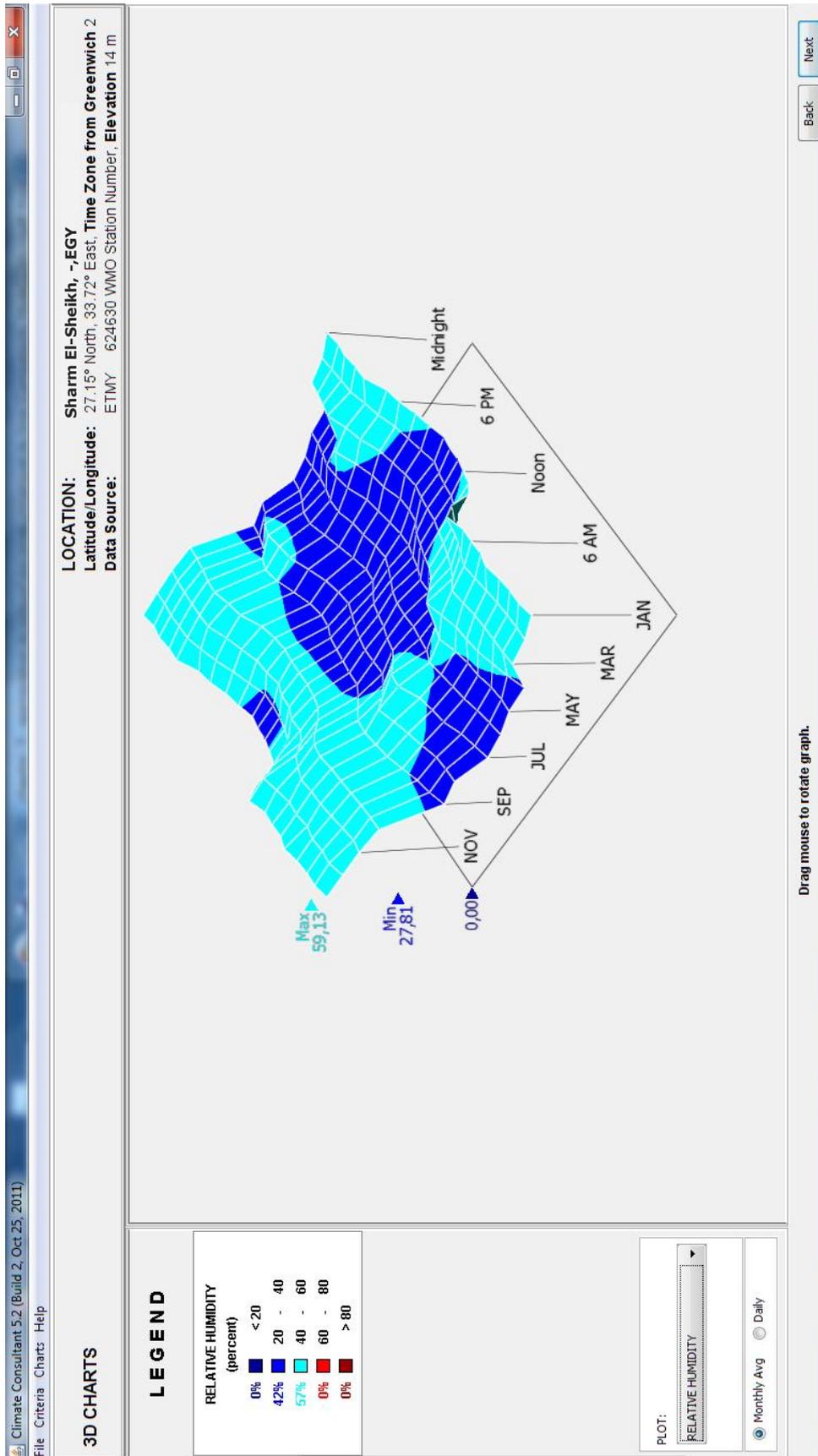


Figure 4.32: La gamme des températures à Charm El-Cheikh (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

L'humidité relative dans cette région varie entre 51% et 66% maximum et entre 17% et 35% minimum avec une moyenne entre 26% et 50%. L'analyse montre que l'humidité relative est entre 20% et 60% pendant 99% de l'année (figure 4.33).



**Figure 4.33:** Le pourcentage de l'humidité relative par rapport au temps dans la région côtière du Sud (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

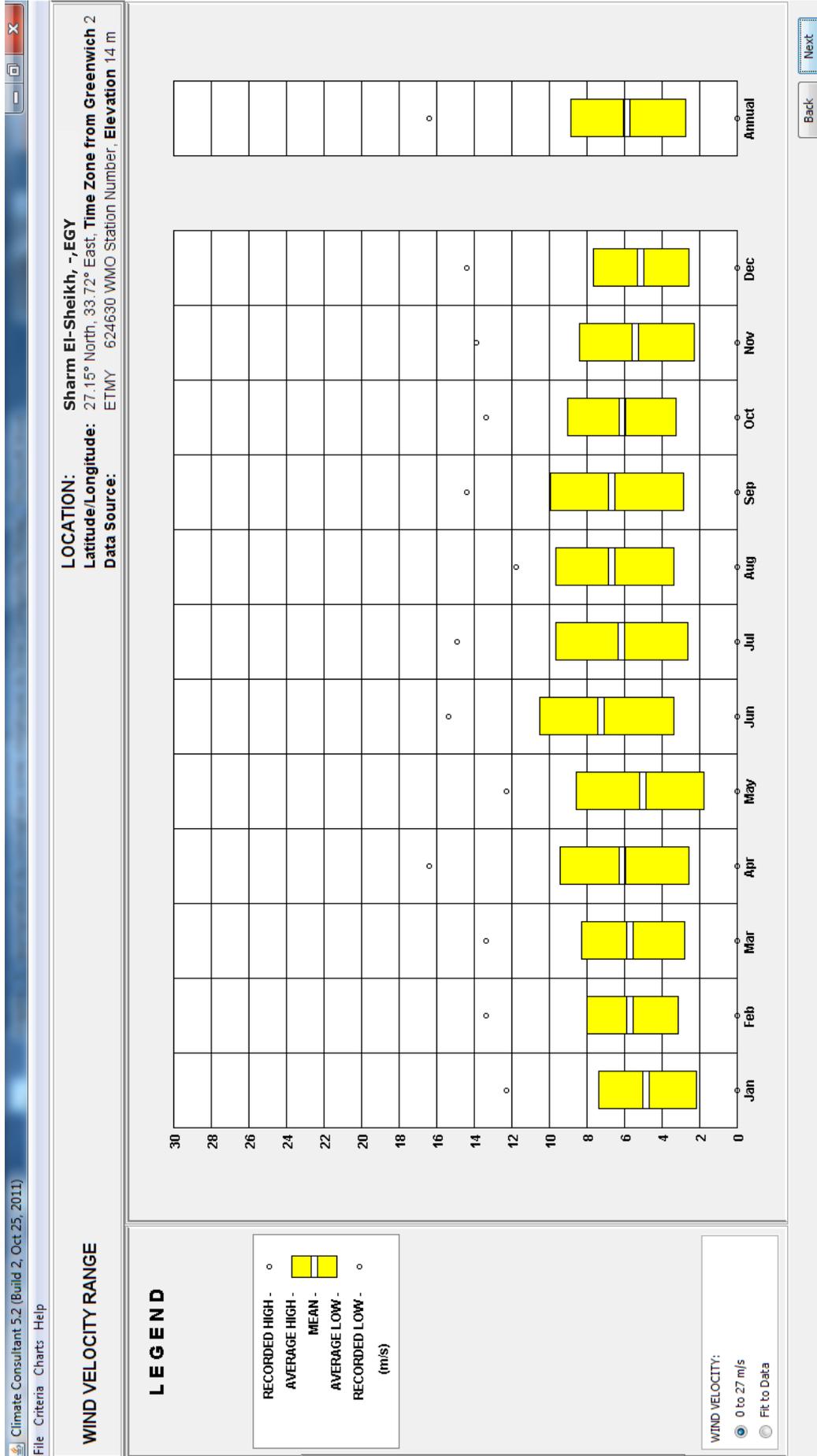
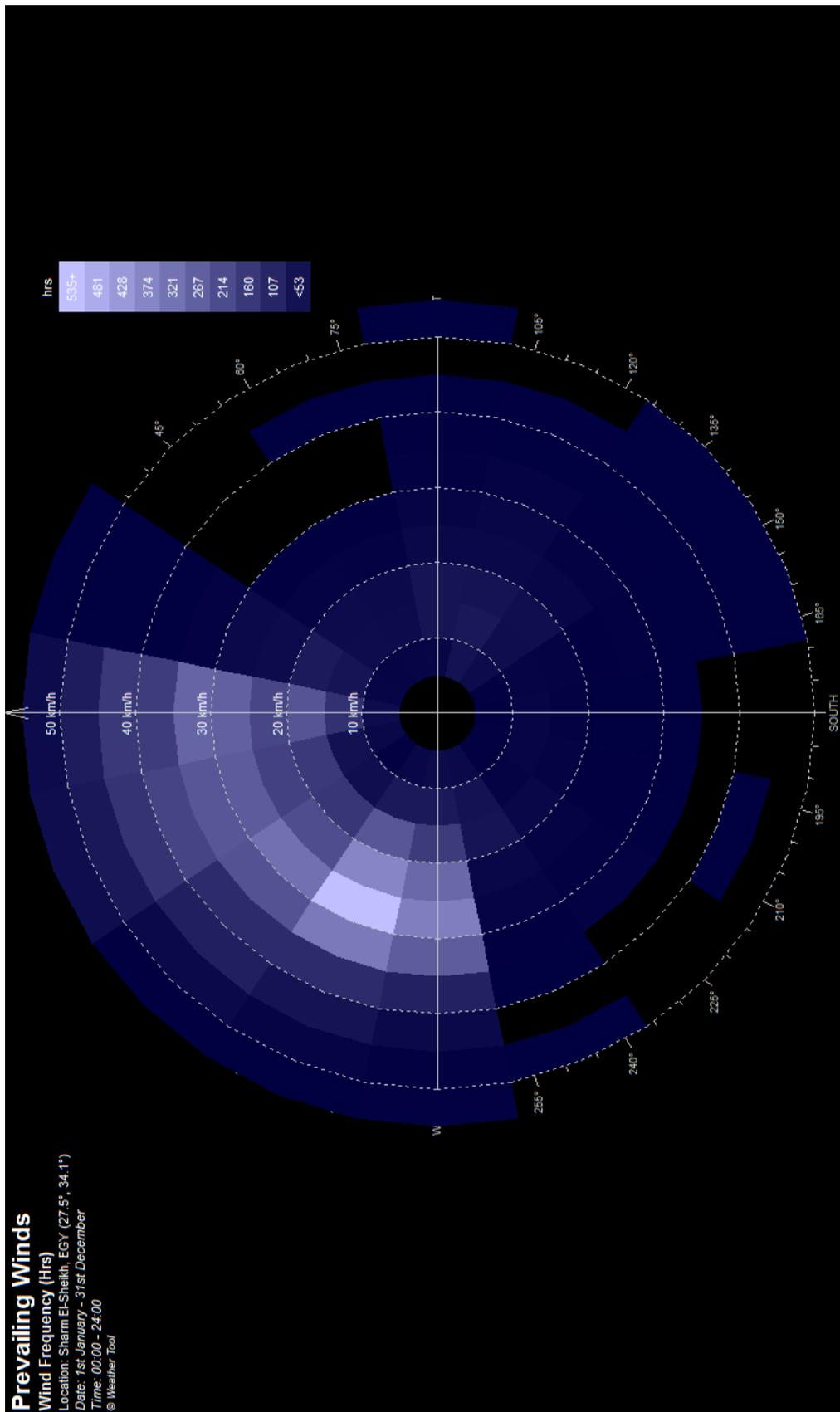


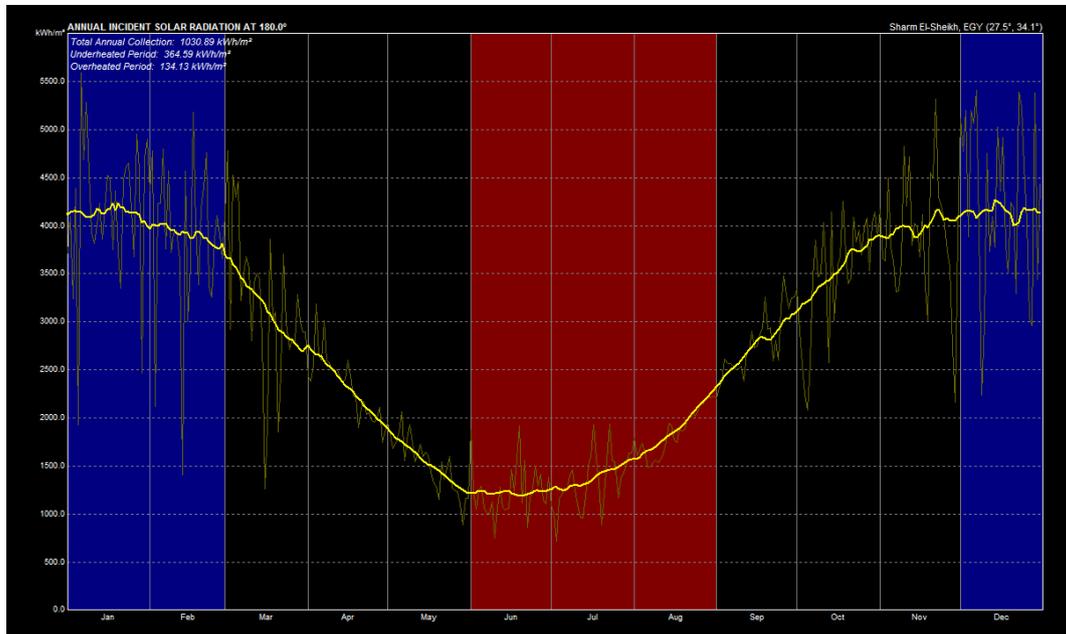
Figure 4.34: La vitesse du vent dans la région côtière du Sud(l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

La vitesse du vent arrive jusqu'à 16,2 m/s, mais la moyenne est entre 4,8 et 7,3 m/s. Ces moyennes sont considérées comme des maxima dans le Sinaï. Les directions du vent dominant sont le Nord-Ouest et le Nord (figures 4.34&4.35).

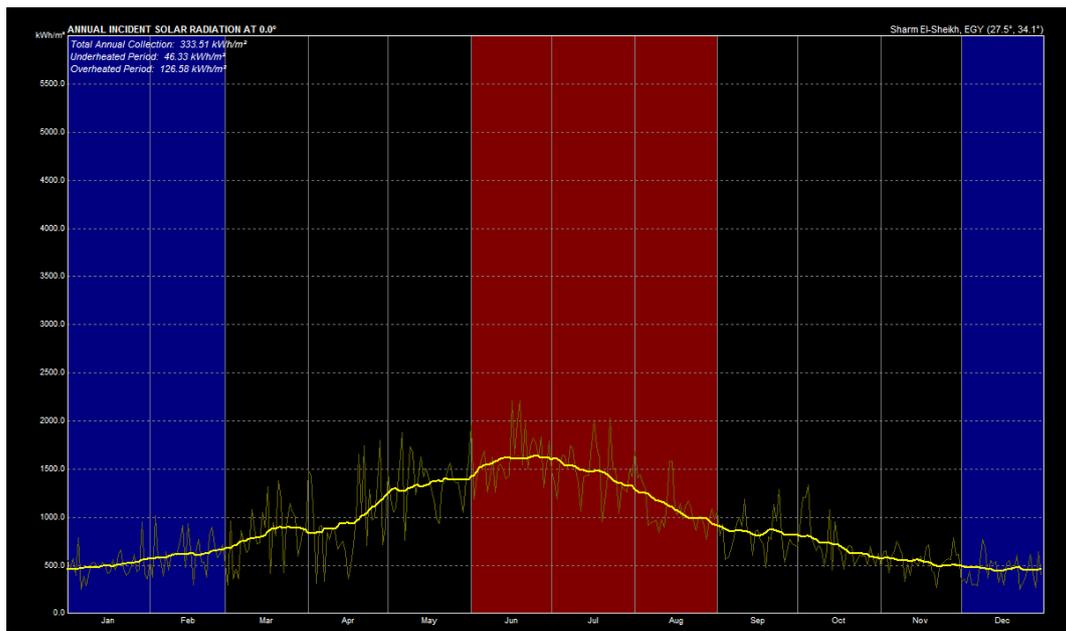


**Figure 4.35:** La rose des vents à Sharm El-Sheikh (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

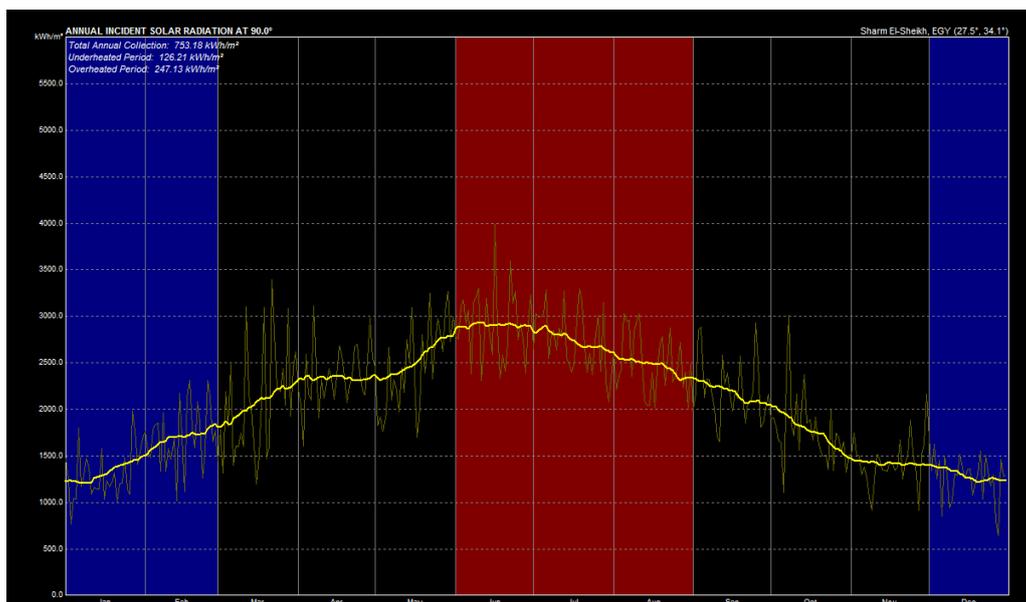
L'énergie solaire est de 950 à 1000 W/m<sup>2</sup> pendant l'été et de 670 à 880 W/m<sup>2</sup> pendant l'hiver. Un mètre carré d'une surface verticale reçoit une énergie solaire entre 1200 et 4200 kWh/m<sup>2</sup> sur une façade Sud, et entre 450 et 1600 kWh/m<sup>2</sup> sur une façade Nord, et de 1800 à 3500 kWh/m<sup>2</sup> sur une façade Ouest et finalement de 1200 à 2900 sur une façade Est. Ces valeurs expliquent le vrai besoin d'une protection solaire afin d'éviter le problème de surchauffe des bâtiments (figure 4.36).



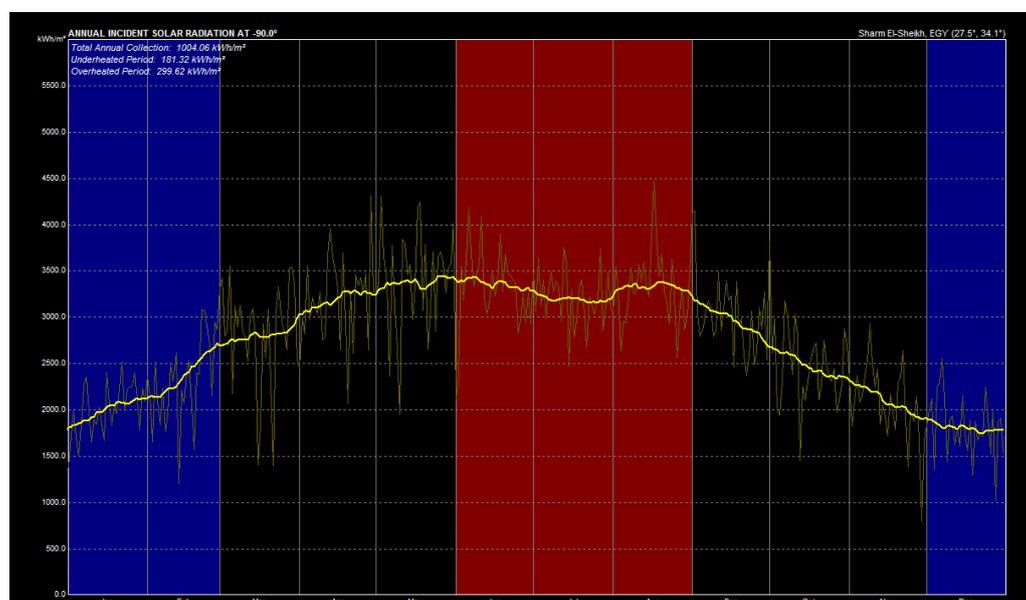
Énergie solaire reçue par une 1m<sup>2</sup> de façade Sud



Énergie solaire reçue par une 1m<sup>2</sup> de façade Nord



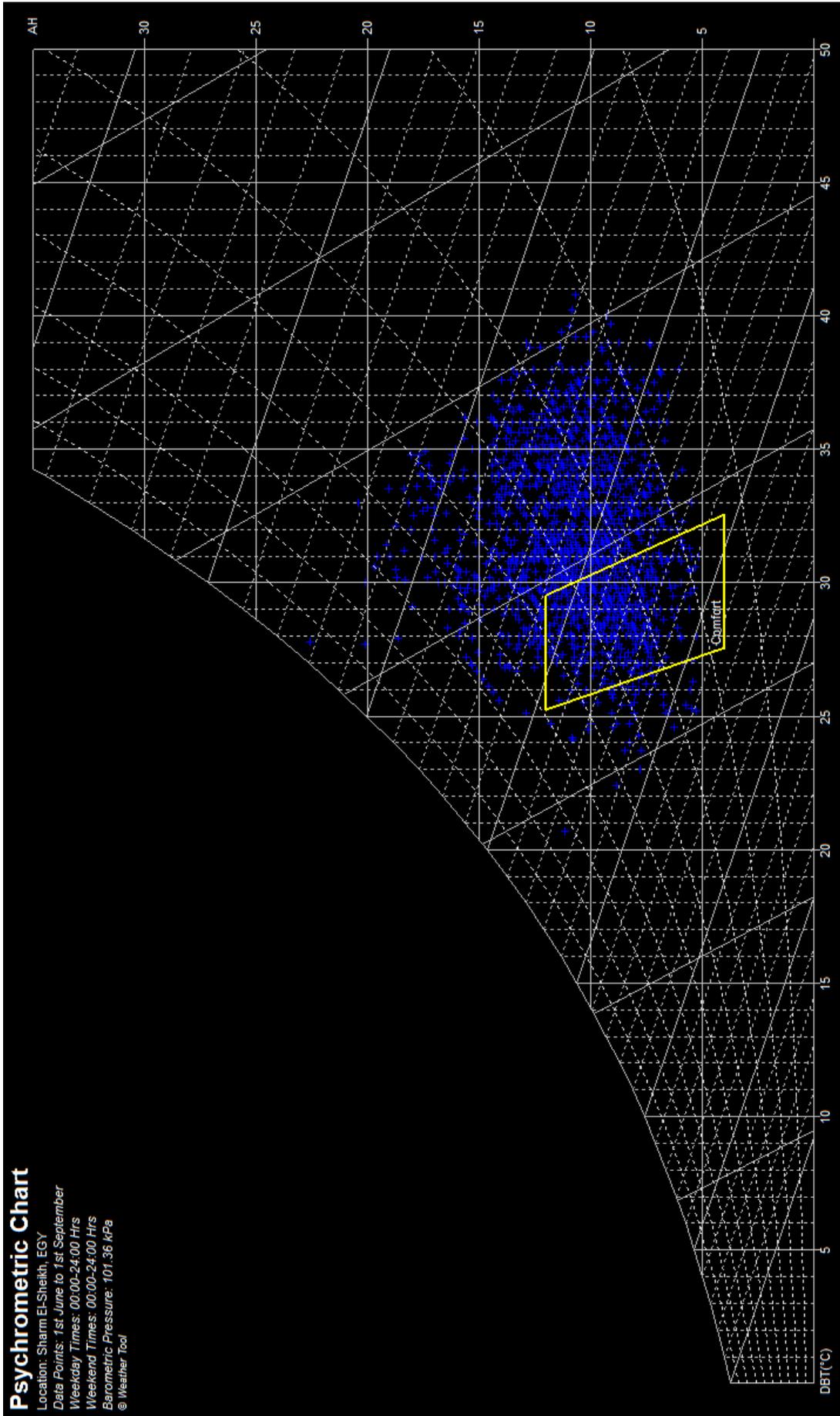
Énergie solaire reçue par une 1m2 de façade Est



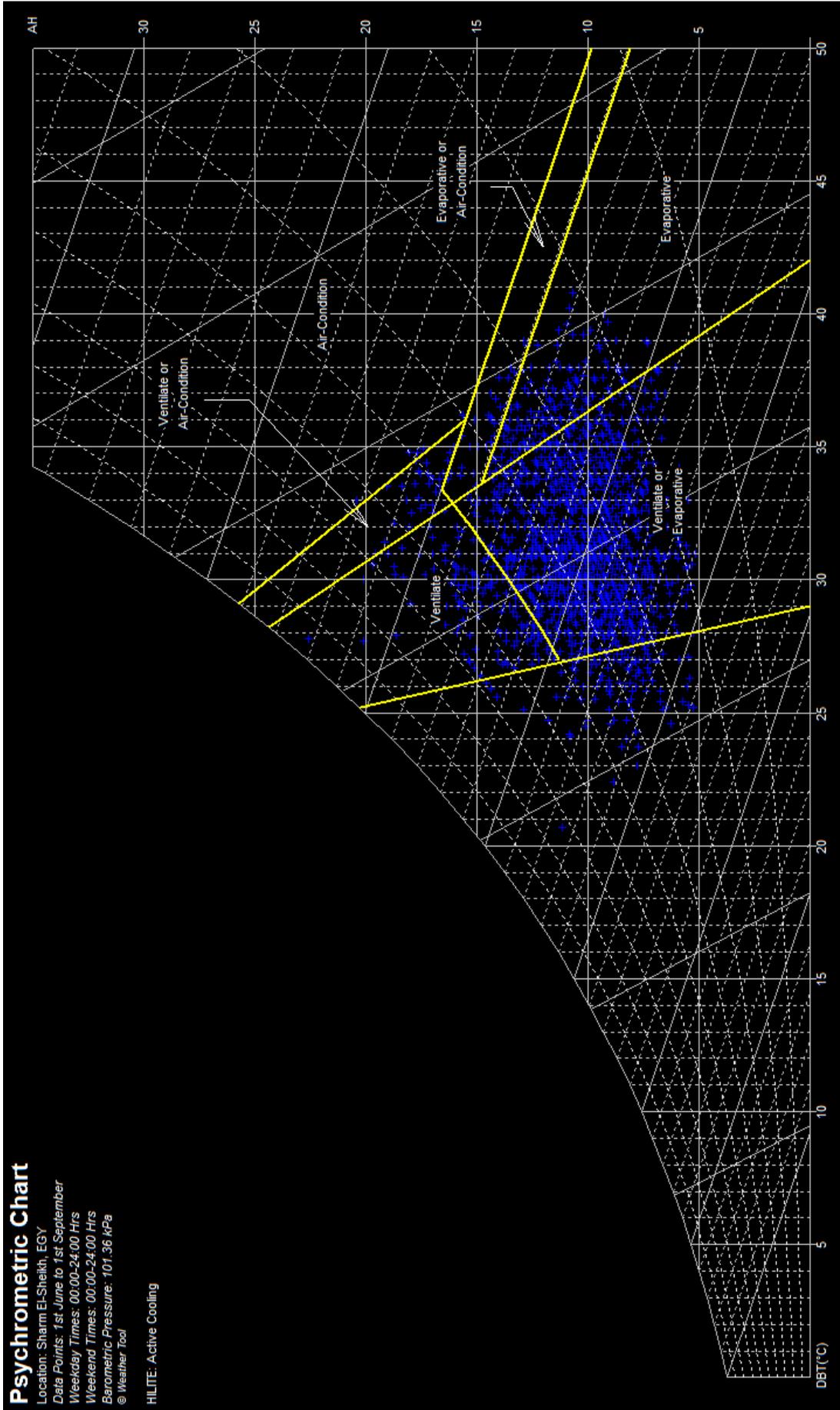
Énergie solaire reçue par une 1m2 de façade Ouest

**Figure 4.36:** L'énergie solaire reçue par 1m2 verticale à Charm El-Cheikh (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

L'analyse du diagramme psychrométrique pour la zone côtière du Sud montre (figure 4.37) que plus de 25% des heures d'été sont à l'intérieur de la zone de confort. Il montre aussi que le climat est considéré chaud et semi-aride. La figure 4.38 analyse les stratégies les plus appropriées à la zone côtière du sud. Elle montre que les systèmes de refroidissement par évaporation et par ventilation naturelle peuvent fournir un niveau de confort acceptable dans cette zone climatique. Les figures 4.39 & 4.40 affirment que ces stratégies accompagnées par l'utilisation d'une construction ayant masse et inertie, avec un refroidissement nocturne peuvent augmenter le pourcentage de temps confortable, surtout pendant l'été.



**Figure 4.37:** Le diagramme psychrométrique de la zone côtière du sud (pendant l'été) (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).



**Figure 4.38:** Stratégies de refroidissement appropriées à la zone côtière du Sud (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

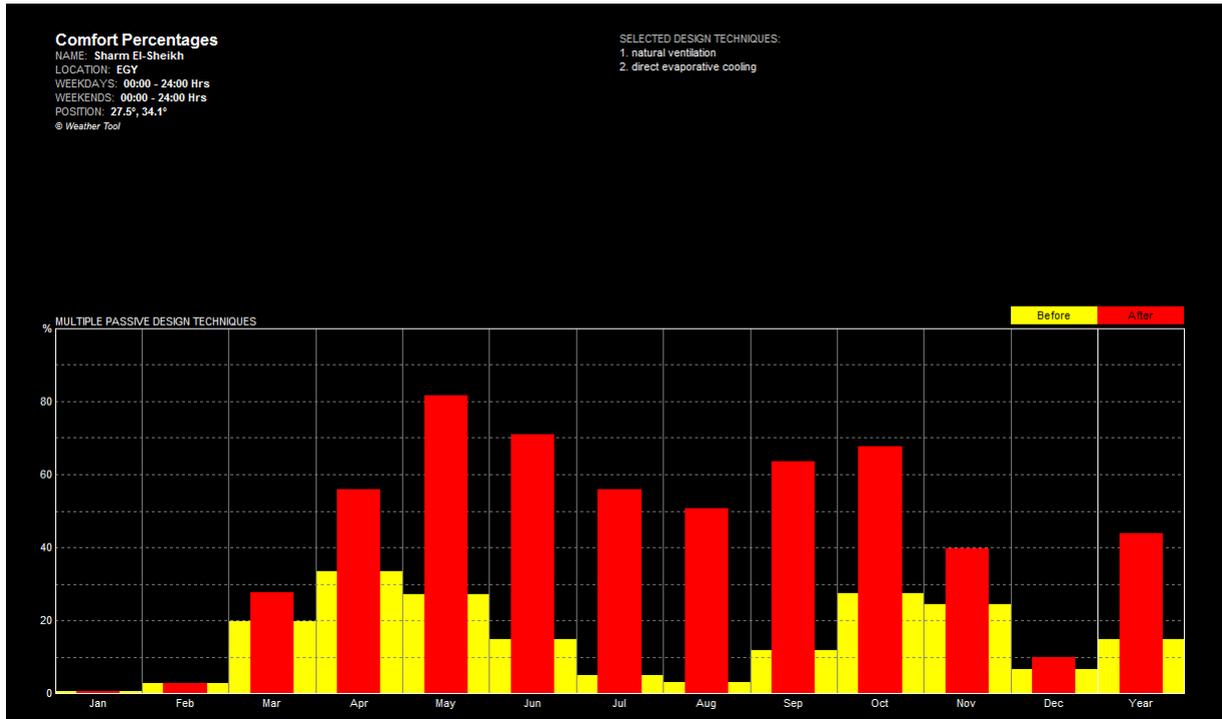


Figure 4.39: Le pourcentage du confort en utilisant les techniques de refroidissement par évaporation et ventilation naturelle dans la zone côtière du sud (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

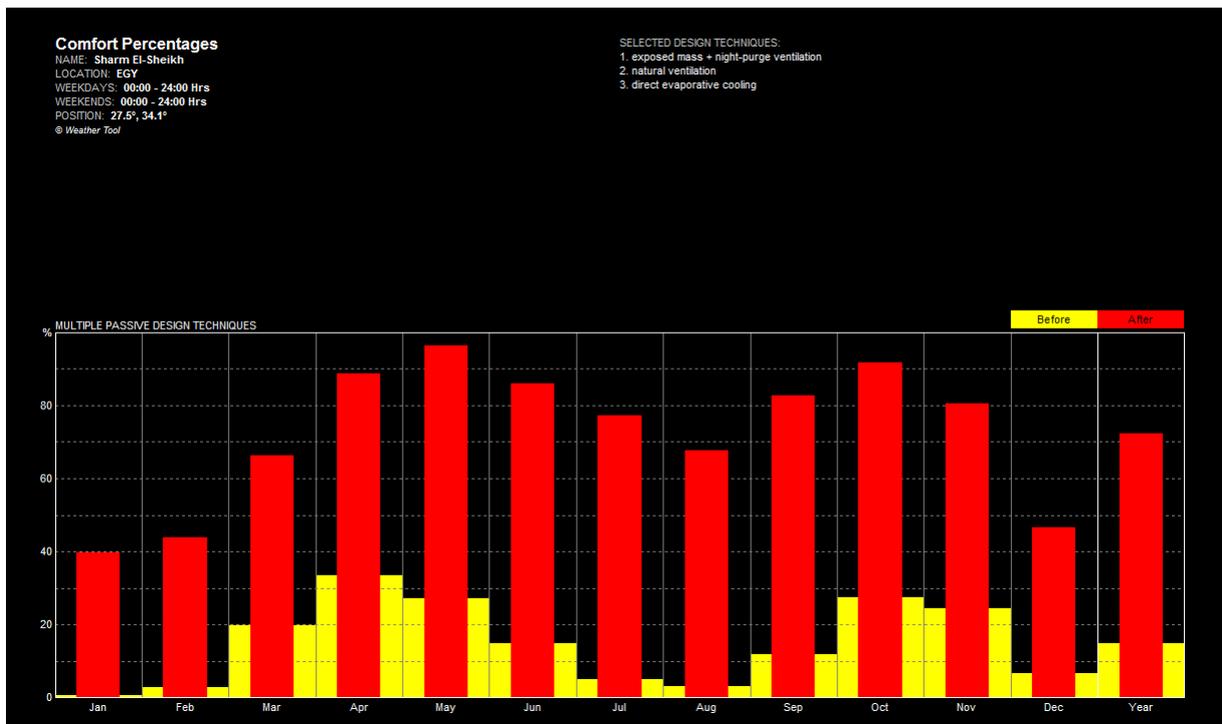


Figure 4.40: Le pourcentage du confort en utilisant les techniques de refroidissement par évaporation, la ventilation naturelle et l'inertie avec un refroidissement nocturne dans la zone côtière du sud (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

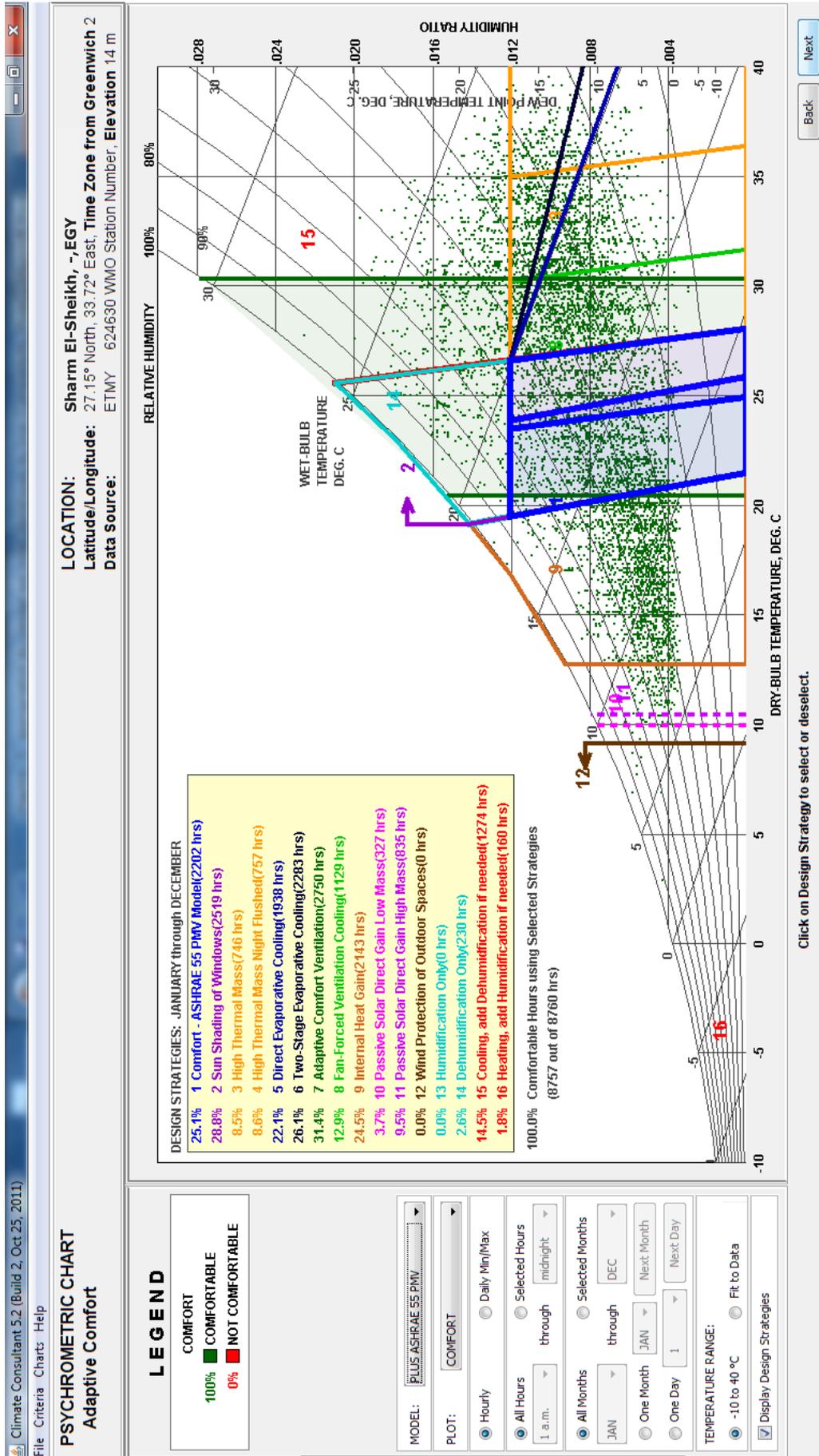


Figure 4.41: Évaluation des systèmes de refroidissement dans la zone côtière du Sud (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

Le refroidissement par évaporation joue un rôle considérable pour atteindre le confort dans cette zone climatique. Plus de 22% du temps, nous pouvons obtenir le confort par l'utilisation d'un système de refroidissement par évaporation directe, et plus de 26% du temps par un système d'évaporation indirecte pour ne pas augmenter l'humidité relative. La ventilation naturelle et la protection solaire sont aussi des techniques majeures dans la zone côtière du sud. Plus de 14% du temps ces techniques ne fournissent pas le confort pour les usagers, il faut utiliser un autre système de refroidissement comme le geocooling en bénéficiant de la température de sol (figure 4.42).

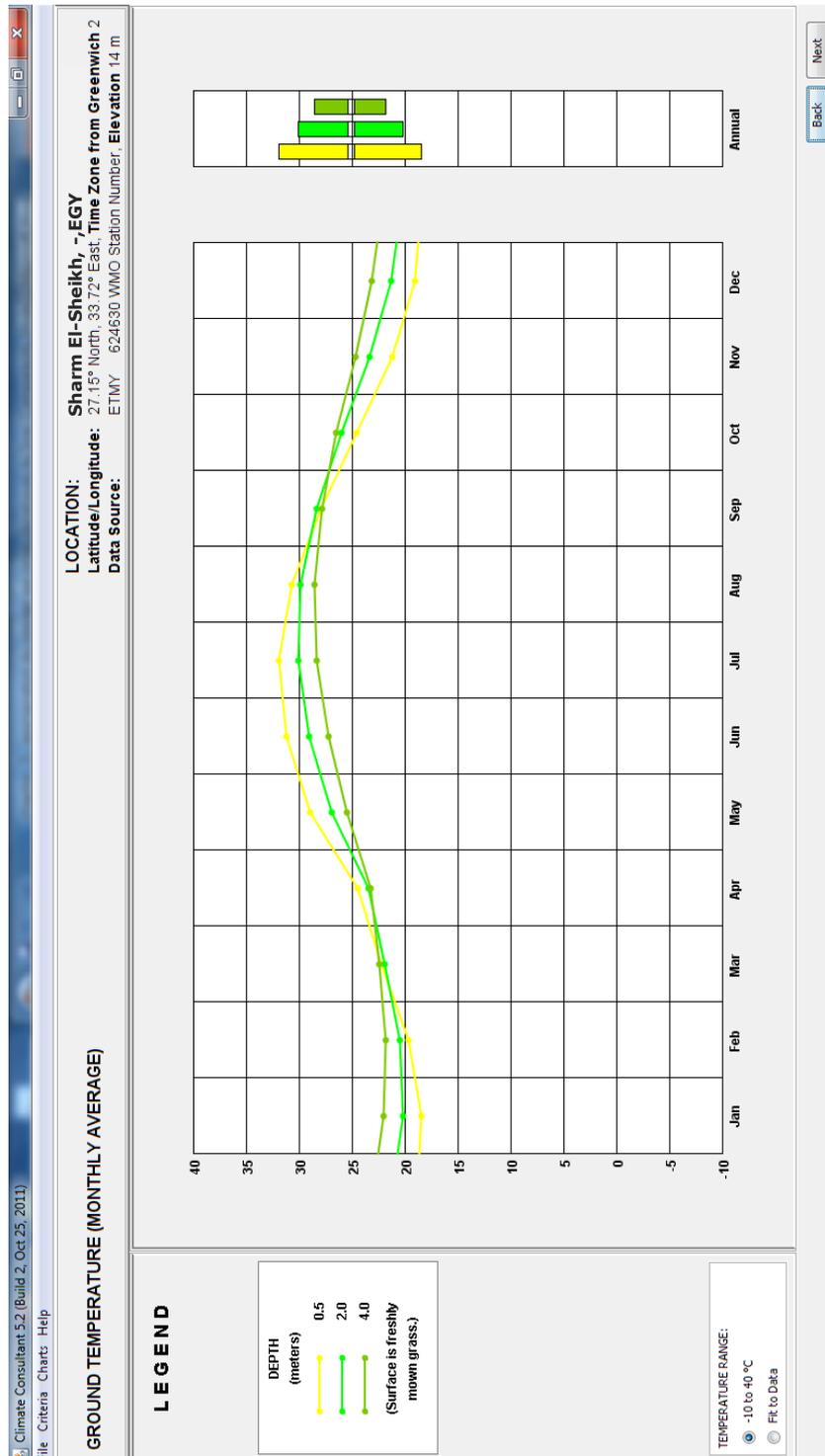


Figure 4.42: Moyennes mensuelles des températures du sol aux niveaux -0,5m, -2,0m et -4,0m à Charm El-Cheikh (l'analyse est faite sur le logiciel « climate consultant 5.2 » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

## 4.3 Evaluation de la compatibilité du concept des murs respirants aux microclimats du Sinaï

L'analyse du climat était la première étape vers la validation du concept de mur respirant. Cette analyse nous aide à modifier la conception de base du mur respirant proposée à la fin de la partie théorique. Cette modification vise à créer des versions plus appropriées aux différents microclimats du Sinaï. Ces versions modifiées du modèle de mur respirant pourront être validées dans la réalité par des expérimentations in-situ.

Selon la conception proposée, le mur respirant se compose de trois couches principales offrant des systèmes différents de refroidissement. Ces systèmes dépendent de la ventilation naturelle, de la protection solaire, du refroidissement par évaporation et du refroidissement par geocooling. Par l'analyse bioclimatique des différentes zones climatiques dans la région du Sinaï, nous pouvons préciser les systèmes de refroidissement qui sont appropriés à chaque climat, et concevoir donc une version du modèle de mur respirant plus appropriée. La détermination d'une version plus appropriée au climat aide à choisir les systèmes de refroidissement les plus adéquats et par conséquent améliore l'efficacité du mur, ce qui permet de déterminer la compatibilité de chaque modèle de mur respirant aux microclimats existants dans le Sinaï.

Le tableau suivant 4.11 présente chaque solution passive et son potentiel d'usage au cours de l'année. Chaque pourcentage représente le temps pendant lequel cette solution est utilisable et peut offrir un niveau de confort thermique acceptable par rapport à la période totale.

**Tableau 4.11:** les pourcentages des besoins (par rapport aux temps) de chaque stratégie de refroidissement pour chaque zone climatique du Sinaï

Système de refroidissement	Zone climatique		
	Côtière de Nord	Côtière de Sud	Désertique au centre
Confort ASHRAE 55 PMV	14,9	25,1	25,8
Protection solaire	32,2	28,8	27,1
Masse thermique (inertie)	5,4	8,5	13,3
Masse thermique (inertie) + ventilation nocturne	6,2	8,6	14,9
Refroidissement par évaporation directe	3,8	22,1	31,4
Refroidissement par évaporation indirecte	4,3	26,1	34,6
Ventilation naturelle	31,6	31,4	25,5
Ventilation mécanique	2,5	12,9	10,8
Refroidissement (climatisation ou autres systèmes)	18,5	2,6	3,6
Déshumidification	29,5	14,5	0

Le tableau précédant montre que la protection contre le rayonnement direct du soleil et la ventilation naturelle sont les éléments les plus importants dans les trois zones climatiques étudiées dans le Sinaï. Ils peuvent participer à l’obtention du confort thermique nécessaire pendant à peu près le tiers du temps de la période chaude dans toutes les zones. Cette remarque démontre l’importance générale du concept de mur respirant qui dépend de ces techniques de refroidissement pour atteindre le confort thermique

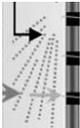
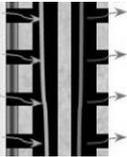
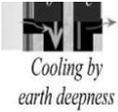
La vitesse du vent est suffisante dans la zone côtière du Nord pour ventiler les bâtiments naturellement et sans l’utilisation d’un système de ventilation mécanique, tandis que, dans les autres zones, la ventilation mécanique est nécessaire pendant 10,8% du temps dans la zone centrale et 12,9% du temps dans la zone côtière du Sud.

Le refroidissement par évaporation soit directe ou indirecte joue un rôle important dans les zones désertique et côtière du Sud et il n’est pas du tout judicieux au nord du Sinaï où le taux d’humidité est déjà élevé.

La masse thermique est un facteur des plus importants dans la zone centrale et désertique où l’écart entre les températures du jour et de la nuit est grand, mais elle joue un rôle minime dans les autres zones climatiques.

La ventilation naturelle, le refroidissement par évaporation et la protection solaire ne peuvent pas résoudre tous les problèmes de confort thermique dans le Sinaï. Dans la zone côtière du Nord par exemple, il faut trouver d’autres solutions soit mécaniques soit passives qui n’augmentent pas les taux d’humidité, ce qui est un vrai problème dans cette zone. Nous avons besoin d’utiliser un système de déshumidification pour 29,5% du temps. Le refroidissement par conduction avec la terre (geocooling) peut donc devenir un élément essentiel dans la conception du mur respirant dans cette zone climatique.

**Tableau 4.12:** Compatibilité des fonctions du mur respirant aux zones climatiques du Sinaï

Zone	Protection contre le soleil 	Refroidissement par évaporation 	Ventilation naturelle 	Autres solutions de refroidissement  <i>Cooling by earth deepness</i>
Zone côtière du Nord				
Zone désertique au centre				
Zone côtière du Sud				

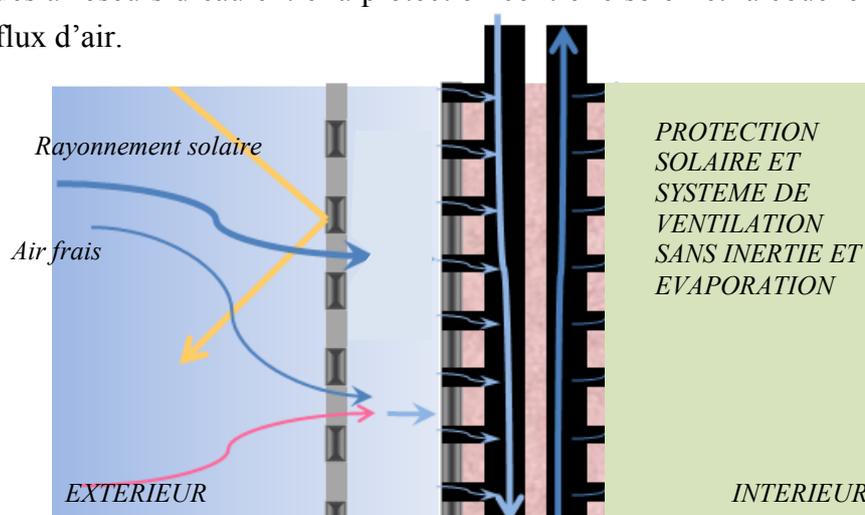
D’après l’analyse climatique de différentes zones climatiques du Sinaï, nous allons proposer des versions adaptées de notre modèle. Chacune étant la plus appropriée à sa zone et aux conditions climatiques spécifiques.

### 4.3.1 Ajustement des éléments du mur respirant au microclimat de la zone côtière du Nord.

**Tableau 4.13:** les pourcentages des besoins (par rapport au temps) de chaque stratégie de refroidissement pour la zone côtière du Nord dans le Sinai.

Système de refroidissement	Zone climatique
	Côtière de Nord
Confort ASHRAE 55 PMV	14,9
Protection solaire	32,2
Masse thermique (inertie)	5,4
Masse thermique (inertie) + ventilation nocturne	6,2
Refroidissement par évaporation direct	3,8
Refroidissement par évaporation indirect	4,3
Ventilation naturelle	31,6
Ventilation mécanique	2,5
Refroidissement (climatisation ou autres systèmes)	18,5
Déshumidification	29,5

L'analyse bioclimatique de la zone côtière du Nord nous montre que la conception du mur respirant est appropriée à ce microclimat à l'exclusion de l'utilisation du refroidissement par évaporation qui augmenterait le taux d'humidité déjà très élevé, tandis que les autres éléments tels que la couche de protection solaire, le système de refroidissement par geocooling et le système de ventilation naturelle sont validés. Il n'est pas nécessaire dans cette région d'utiliser des murs ayant des masses thermiques importantes, mais par contre il est essentiel d'avoir un système de déshumidification. La conception appropriée pour cette zone climatique est donc composée des trois couches que nous avons proposées mais sans utilisation des arroseurs d'eau entre la protection contre le soleil et la couche qui contient les entrées du flux d'air.



**Figure 4.43:** Version du mur respirant appropriée à la zone côtière du Nord.

### 4.3.2 Ajustement des éléments du mur respirant au climat de la zone désertique au centre.

Tableau 4.14: les pourcentages des besoins (par rapport au temps) de chaque stratégie de refroidissement pour la zone désertique au centre dans le Sinai.

Système de refroidissement	Zone climatique
	Désertique au centre
Confort ASHRAE 55 PMV	25,8
Protection solaire	27,1
Masse thermique (inertie)	13,3
Masse thermique (inertie) + ventilation nocturne	14,9
Refroidissement par évaporation direct	31,4
Refroidissement par évaporation indirect	34,6
Ventilation naturelle	25,5
Ventilation mécanique	10,8
Refroidissement (climatisation ou autres systèmes)	3,6
Déshumidification	0

Dans cette zone désertique chaude, la protection solaire, le système de refroidissement par évaporation, le système de ventilation naturelle, sont indispensables. De temps en temps et surtout tôt le matin, le taux élevé d’humidité relative nécessite d’arrêter la fonction des arroseurs d’eau. Le manque d’eau aussi, dans cette zone aride, conduit à n’utiliser de l’eau que pendant une courte période pendant la journée. Le geocooling est un système possible pour remplacer le système de refroidissement par évaporation en cas de manque d’eau ou si le pourcentage du taux d’humidité est élevé. La conception complète du mur respirant avec les quatre moyens de refroidissement est donc conforme aux objectifs et compatible avec le climat de cette zone.

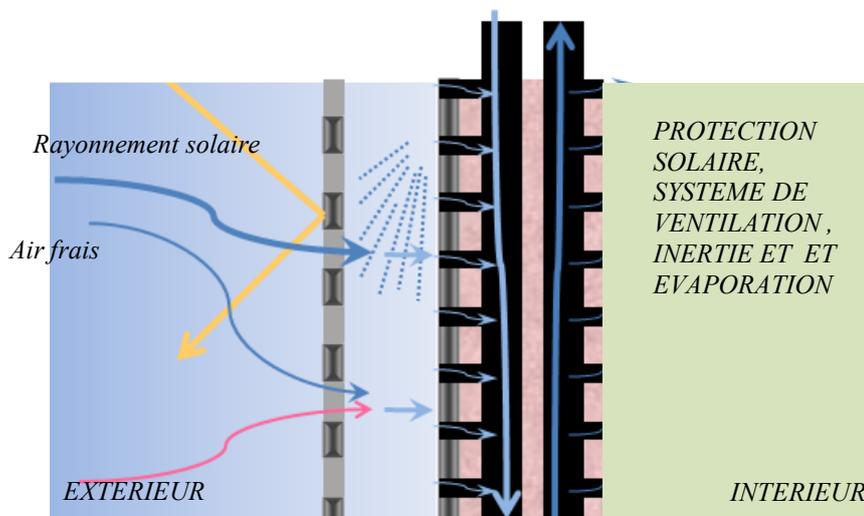


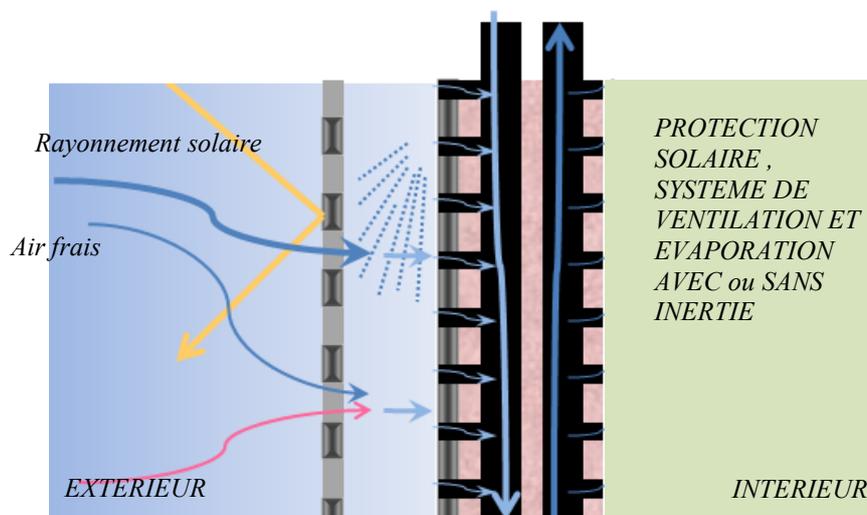
Figure 4.44: Version complète du mur respirant appropriée à la zone désertique au centre.

### 4.3.3 Ajustement des éléments du mur respirant au climat de la zone côtière du Sud.

**Tableau 4.15:** les pourcentages des besoins (par rapport au temps) de chaque stratégie de refroidissement pour la zone côtière du Sud dans le Sinaï.

Système de refroidissement	Zone climatique
	Côtière de Sud
Confort ASHRAE 55 PMV	25,1
Protection solaire	28,8
Masse thermique (inertie)	8,5
Masse thermique (inertie) + ventilation nocturne	8,6
Refroidissement par évaporation direct	22,1
Refroidissement par évaporation indirect	26,1
Ventilation naturelle	31,4
Ventilation mécanique	12,9
Refroidissement (climatisation ou autres systèmes)	2,6
Déshumidification	14,5

La conception du mur respirant favorable pour cette zone climatique ressemble beaucoup à celle de la zone désertique où il faut garder les quatre moyens de refroidissement en limitant l'utilisation de l'eau pendant la période humide. La couche de protection contre le soleil est l'élément le plus important parce que l'énergie solaire globale reçue sur 1 m<sup>2</sup> est très élevée et atteint jusqu'à 1000W/m<sup>2</sup>, ce qui implique d'éviter le rayonnement direct du soleil. Il faut aussi activer l'effet de cheminée ou utiliser un système de ventilation mécanique pour 12% du temps en été, parce que la vitesse du vent est insuffisante pour créer une ventilation transversale ou bien bénéficier de l'effet de cheminée.



**Figure 4.45:** Version du mur respirant appropriée à la zone côtière du Sud.

## **4.4 Conclusion**

L'analyse des données climatiques de la région du Sinaï montre que le modèle complet du mur respirant n'est pas approprié à toutes les zones climatiques. Nous avons proposé dans ce chapitre trois versions différentes du mur respirant. Chaque version est en adéquation avec conditions climatiques de chaque zone.

La version complète du mur respirant qui utilise la protection solaire, le refroidissement par évaporation, une inertie thermique importante et un système de ventilation naturelle est légitime pour la zone désertique au centre. La même version peut-être utilisée pour la zone côtière du Sud sauf que l'inertie thermique est moins importante. La zone côtière du Nord ne favorise pas le refroidissement par évaporation, c'est pourquoi, le modèle de mur respirant approprié pour cette zone dépend du système de ventilation naturelle. Dans ce modèle le geocooling peut jouer un rôle conséquent dans le processus de refroidissement. Dans le chapitre suivant, nous allons expérimenter une de ces versions de mur respirant afin de valider le concept dans la réalité et voir son comportement thermique. L'expérimentation in situ pourra affirmer notre analyse climatique et montrer l'efficacité de notre proposition.

## 5. Mesurer l'efficacité du modèle réel des murs respirants

La recherche suppose que la proposition du mur respirant change le comportement thermique du bâtiment. Par l'application de ce concept, nous posons l'hypothèse que le mur respirant pourrait améliorer le confort thermique en baissant la température et ventilant l'espace intérieur. Afin de valider ce concept dans la réalité, la recherche réalise une expérimentation in-situ qui vise à convertir les idées, tirées de la première partie théorique de la recherche, en concepts pratiques. Elle veut tester la validité des idées théoriques dans la pratique.

Nous avons proposé dans le chapitre précédant des modèles différents appropriés aux zones climatiques du Sinaï. Dans la phase d'expérimentation, nous allons tester un de ces modèles dans le site en observant son comportement thermique. L'expérience compare deux modèles miniatures, le premier traditionnel avec des murs solides ressemblent aux murs utilisés dans les bâtiments courants du site, le deuxième modèle applique le concept du mur respirant. Cette comparaison est nécessaire pour quantifier l'efficacité des nouvelles techniques dans l'objectif d'une amélioration du confort thermique dans les bâtiments en zones chaudes.

## 5.1 Protocole de l'expérimentation

Le but de l'expérience est de mesurer l'efficacité de la technique proposée à travers l'observation des températures et les taux d'humidité relative à l'intérieur des deux modèles miniatures au cours de journées chaudes, pour cela, l'expérimentation a eu lieu pendant le mois de juillet 2010. Afin de réaliser cette expérience, la recherche a proposé un protocole qui regroupe la description des conditions et du déroulement du test. Ce protocole précise la conception des deux modèles, la description technique, le site, la période d'expérimentation, les appareils de mesure et les différentes phases de mesure.

*Tableau 5.1: Protocole de l'expérimentation*

### PROTOCOLE DE L'EXPERIMENTATION

#### Le lieu et la version du modèle respirant expérimentée

<b>Modèle du mur respirant utilisé</b>	Modèle complet approprié à la zone chaude et aride.
<b>Lieu de l'expérience</b>	Zone côtière du Sud ou zone désertique au centre, Sinäi, Égypte.

#### La période et les étapes de l'expérimentation

<b>La période de l'expérimentation</b>	Été 2010, pendant les mois les plus chauds.
<b>Décalage de mesure</b>	Commencer la mesure deux jours après la construction des modèles afin d'éviter l'humidité produite pendant la construction.
<b>Étapes de mesure</b>	3 étapes différentes afin d'observer les comportements thermiques des : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modèle traditionnel avec des murs solide, séparément.</li> <li>• Modèle respirant, séparément.</li> <li>• Deux modèles simultanément.</li> </ul>

## La conception des modèles

<b>Dimensions</b>	Chaque modèle a un volume de $1\text{m}^3$ , avec des dimensions de 1m de largeur, 1m de longueur et 1m de hauteur.
<b>Matériaux de construction</b>	Les deux modèles utilisent les mêmes matériaux de construction qui sont utilisés couramment dans le site (les briques et le béton armé).

## La phase de mesure

<b>Appareils de mesure</b>	Deux appareils de mesure des températures, des taux d'humidité relative, et un appareil de mesure pour la vitesse d'air.
<b>Emplacement des appareils</b>	À l'intérieur : au centre du modèle avec une hauteur de 50 cm du niveau de sol. À l'extérieur : accroché au mur extérieur dans une zone ombrée
<b>La durée de l'expérience</b>	3 jours de mesures
<b>Cadence de mesure</b>	Une demi-heure pendant les trois phases.

## 5.2 Conception des modèles

Deux modèles miniatures ont été proposés pour l'expérimentation qui les compare du point de vue thermique (figures 5.1 & 5.2). Les deux modèles sont identiques dans leurs dimensions internes, avec 1 mètre de longueur, 1 mètre de largeur et 1 mètre de hauteur. L'épaisseur du mur en brique est de 15 cm. La même épaisseur est utilisée pour le mur respirant en ajoutant la couche externe à une distance de 10 cm de la façade en brique. Chaque modèle a une ouverture qui a été pratiquée sur la façade orientée au sud, façade la moins exposée au vent en Égypte (les vents dominants en Égypte viennent du nord, nord-ouest et nord-est). Ces ouvertures ont les mêmes dimensions (de 80cm de hauteur et 60 cm de largeur). Ces ouvertures qui sont nécessaires pour l'accès à l'espace intérieur ont été fermées

pendant les mesures avec des planches en bois de 1cm d'épaisseur. Les dessins suivants présentent les plans, les coupes verticales et les façades des deux modèles en indiquant leurs dimensions.

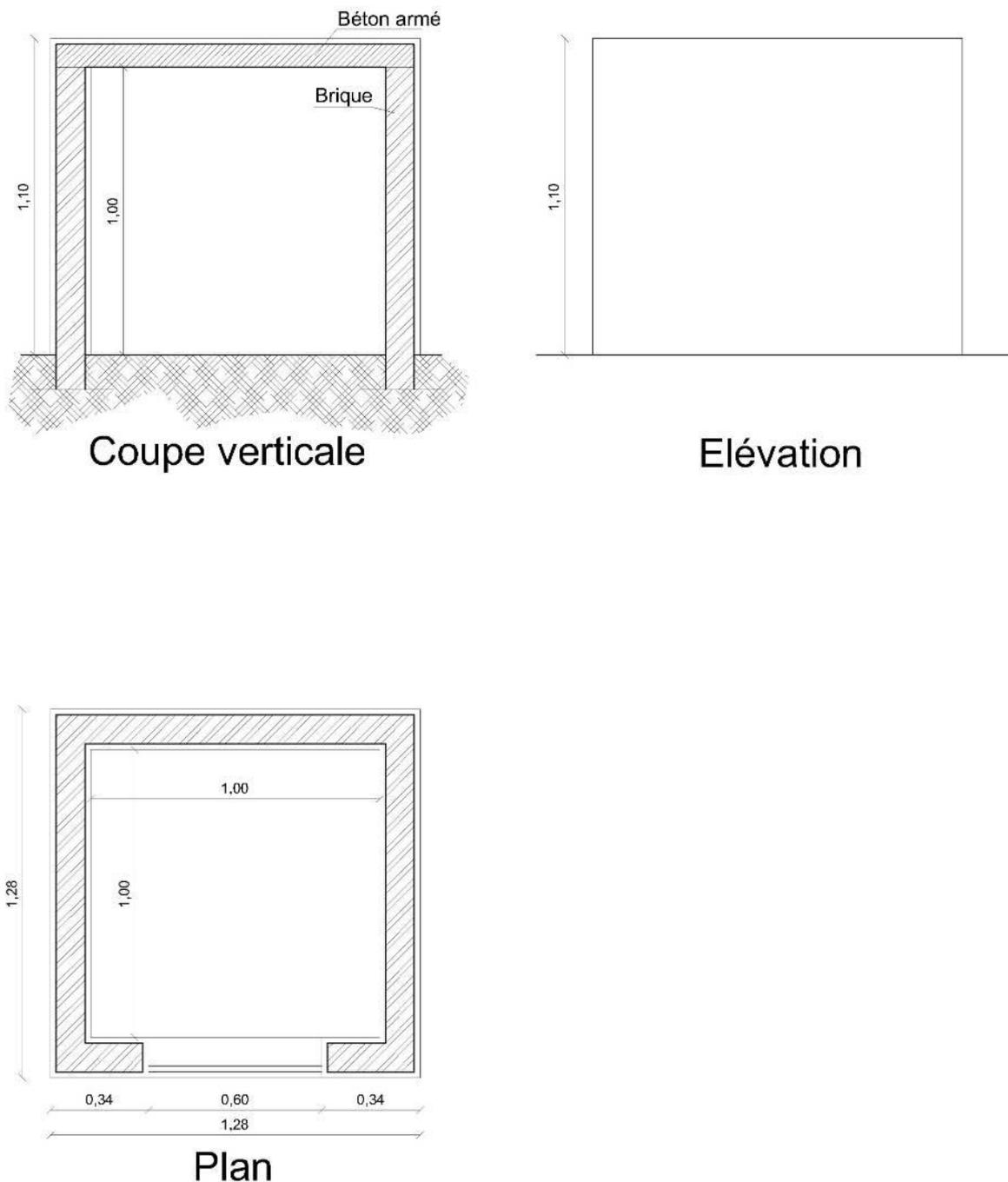


Figure 5.1 : La conception du modèle traditionnel

Le deuxième modèle repose sur la même base à laquelle ont été ajoutés des orifices de ventilation, une couche externe en coton et un système d'arrosage pour le refroidissement par évaporation sur ses façades. Les dessins du deuxième modèle montrent aussi les deux types d'ouvertures contrôlant la ventilation naturelle, des ouvertures horizontales directes entre

l'espace interne et l'air à l'extérieur, et des ouvertures verticales passant sous terre en bénéficiant de la géothermique pour refroidir l'air. Ces tuyaux verticaux vont jusqu'à 2m sous terre et remontent en conduisant l'air vers le haut pour rafraîchir l'intérieur du modèle par ce système indirect. Chaque façade de ce modèle respirant a 49 bouches d'air dont 28 sur 4 lignes verticales pour la ventilation naturelle directe et 21 bouches d'air pour la ventilation naturelle indirecte sur 3 lignes verticales. L'espacement entre les lignes des entrées est de 20 cm horizontalement et verticalement (entre les centres des entrées). La surface de chaque bouche d'air est de  $0,0019 \text{ m}^2$  avec un diamètre de 5 cm.

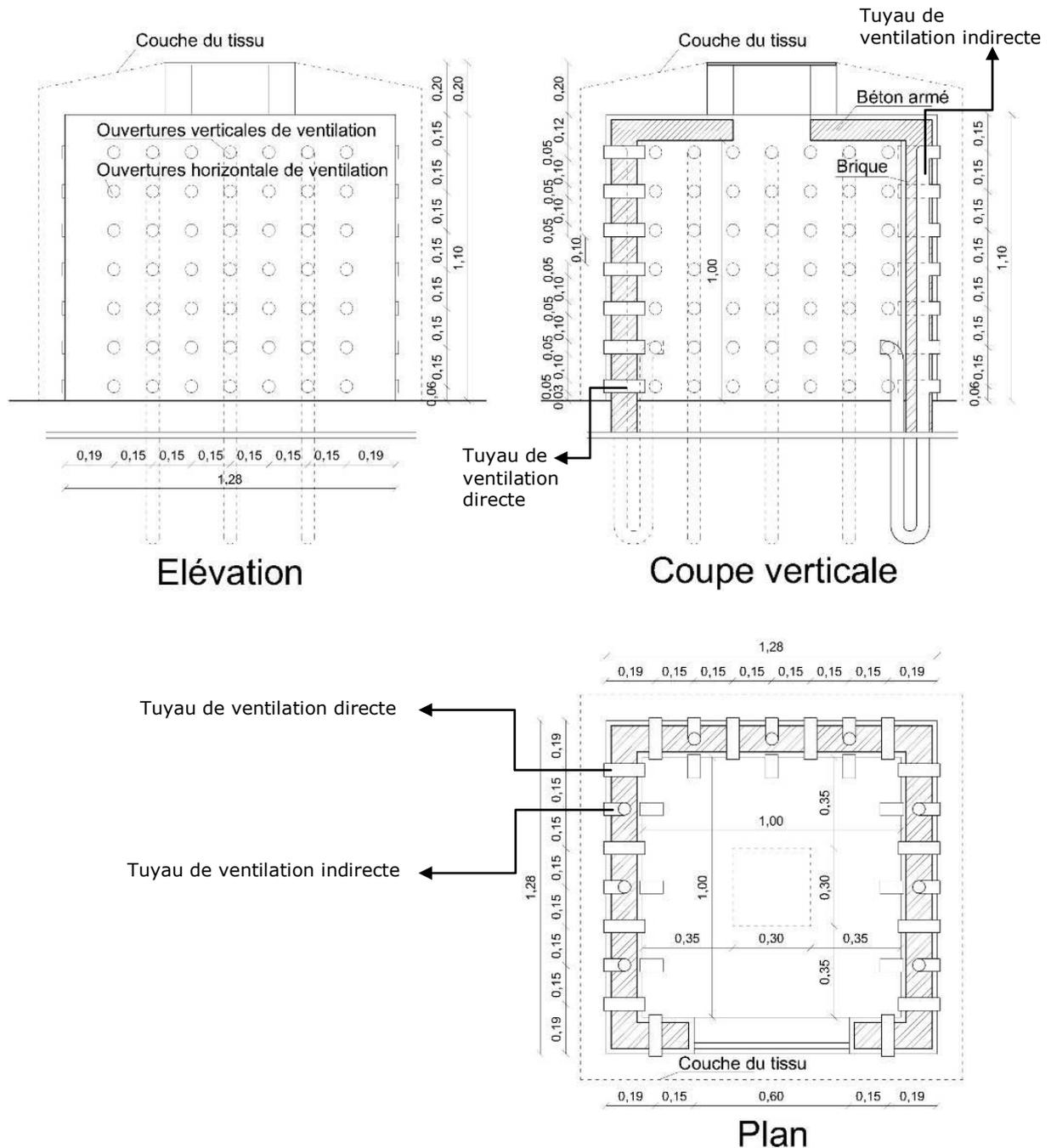


Figure 5.2: La conception du modèle respirant

L'illustration suivante 5.3 montre la conception du mur respirant avec ses trois couches proposées, la couche externe légère (en coton dans cette expérimentation), la couche intermédiaire avec des bouches d'air et la couche interne avec des sorties d'air.

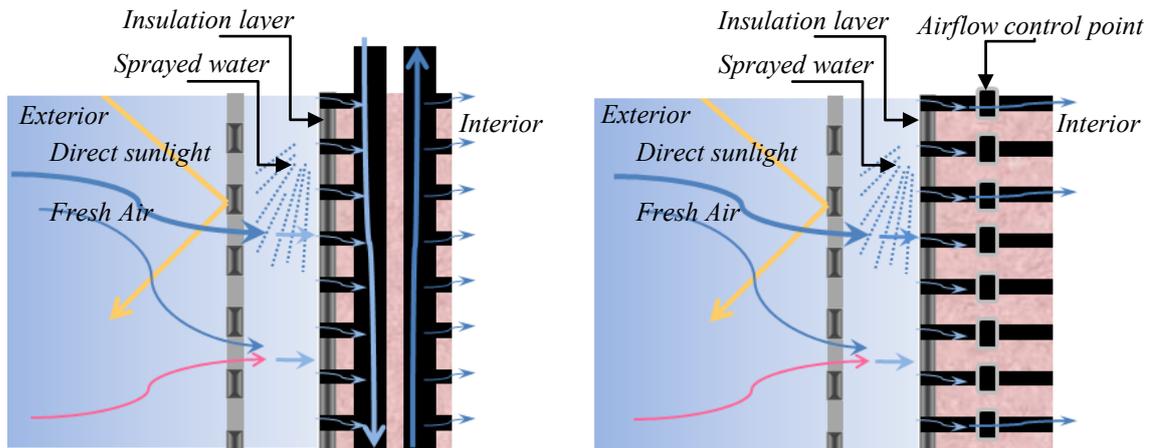


Figure 5.3 : Dans l'expérimentation in situ, deux systèmes de ventilation (directe et indirecte) ont été appliqués.

## 5.3 Réalisation de l'expérimentation

L'expérimentation a été faite pendant le mois de juillet 2010. Ce mois de l'année a été choisi pour ses températures élevées, ce qui fournit des mesures appropriées à notre étude des fortes températures. Elle a duré 10 jours. Les deux modèles ont été construits en cinq jours, suivi par cinq jours de mesures. La construction des modèles a commencé le 11/07/2010, le début des mesures a commencé le 18/07/2010 et a duré jusqu'au 21/07/2010.

### 5.3.1 Le site choisi et l'orientation géographique des modèles

Au début, notre recherche a proposé la zone côtière du sud pour réaliser l'expérimentation, mais à cause d'une difficulté administrative, l'expérimentation a été réalisée dans une zone désertique à proximité du canal de Suez, en face de la ville d'Ismaïlia (figure 5.4). Une autorisation a été demandée par la police nationale, raisons de sécurité, pour réaliser l'expérimentation dans le sud du Sinaï. Cette autorisation a mis longtemps à être obtenue, ce qui pouvait entraîner l'annulation de l'expérimentation. Ce nouveau lieu a été choisi parce qu'il ressemble beaucoup aux conditions climatiques existantes dans la zone côtière de sud.

Le tableau 4.9 (page 178) concernant les données climatiques de la zone côtière du Sud montre une température moyenne varie entre 19°C en Janvier et 34°C en Juin, Juillet et Août, tandis que la température moyenne dans le site choisi (tableau 4.6 - page 164, concernant les données climatique de la ville d'Ismaïlia) montre une température moyenne à peu près parelle varie entre 16°C et 30°C. Les taux d'humidité relative dans les deux zones se ressemblent aussi avec une humidité relative un peu basse dans la zone côtière de sud. Ces taux varient de 31% à 50% (40.5%) dans la zone sud, tandis qu'elles varient de 45% à 62% (53.5%) dans la

ville d'Ismaïlia. La direction du vent dominant est le Nord et Nord-ouest dans les deux zones (figures 4.35 - page 183 & 6.4 – page 228) et la vitesse moyenne du vent varie entre 12 et 22m/s dans la zone sud, tandis qu'elle varie entre 10 et 16m/s à la ville d'Ismaïlia.

Les deux modèles ont été orientés vers les points cardinaux, comme indiqué sur les cartes ci-jointes (figure 5.5).



Figure 5.4 : Le site où l'expérimentation s'est déroulée



Figure 5.5: L'orientation des modèles

### 5.3.2 Matériaux de construction

Les deux modèles ont été construits avec les mêmes matériaux qui sont considérés comme les matériaux de construction les plus répandus et couramment utilisés en Égypte. La même épaisseur de murs a été utilisée dans les deux modèles afin d'unifier leur conductance et leur résistance thermique. Ils ont été construits en brique rouge de 12 cm d'épaisseur, tandis que les plafonds en béton armé ont une épaisseur de 8 cm. Le sol est en terre battue.

La construction a été enduite à l'extérieur et à l'intérieur avec une couche de ciment de 1,5 à 2 cm d'épaisseur. Les conduites verticales et horizontales dans le deuxième modèle sont des tuyaux en plastique de 2 pouces de diamètre (5 cm). La couche de tissu qui couvre le deuxième modèle est en coton blanc.



*Figure 5.6: Briques rouges, béton armé et tuyaux en plastique sont les matériaux de construction utilisés*

### 5.3.3 La réalisation des modèles

La construction des deux modèles a duré 5 jours du 11 au 16 juillet 2010. Les mesures ont commencées deux jours après l'exécution afin d'éviter l'humidité relative élevée qui peut être produite par les matériaux humides pendant la phase de construction. Les images suivantes montrent les deux modèles pendant l'exécution des travaux de construction.



Construire les fondations des murs



Surelever les murs en briques



Construire la dalle en béton



Faire l'enduite en ciment



*Figure 5.7: Le premier modèle (le modèle solide) pendant l'exécution – phases de construction*



Creuser le terrain



Mettre les tuyaux de ventilation indirecte



Comblé le terrain et construire les fondations des murs



Surelever les façades en intégrant les tuyaux directs et indirectes de ventilation



Construire la dalle (en béton armé) et faire l'enduite en ciment



Mettre les arroseurs d'eau et la couche en coton à 10 cm du mur

*Figure 5.8 : Le deuxième modèle (le modèle respirant) pendant l'exécution – phases de construction*

Trois appareils ont été utilisés pour mesurer la température, l'humidité et la vitesse du vent (figure 5.9 & 5.10):

- Deux appareils (Datalogger Testo 175-H2) pour mesurer et enregistrer la température et l'humidité. L'appareil peut être programmé pour déterminer la date et l'heure de début et de fin des enregistrements, et la fréquence des mesures.
- Un appareil (Multifonctions LM/F1 20) pour mesurer la température, l'humidité et la vitesse du vent en temps réel et les relever manuellement.



*Figure 5.9 : L'appareil de mesure (Testo 175-H2) qui a été utilisé pendant l'expérimentation pour mesurer les températures et les taux d'humidité relative.*



*Figure 5.10 : L'appareil de mesure (Multifonctions LM/F1 20) qui a été utilisé pendant l'expérimentation pour mesurer les vitesses du vent.*

Les appareils d'enregistrement qui ont été utilisés pour mesurer la température et l'humidité ont été placés au milieu de l'espace interne des modèles. Les figures suivantes montrent la position des appareils à l'intérieur des deux modèles à une hauteur de 40 cm du sol. Cependant, pour le premier modèle, l'appareil de mesure extérieur a été placé sur la façade orientée au nord, à une hauteur de 1 m du sol avec une protection contre les rayons solaires directs.

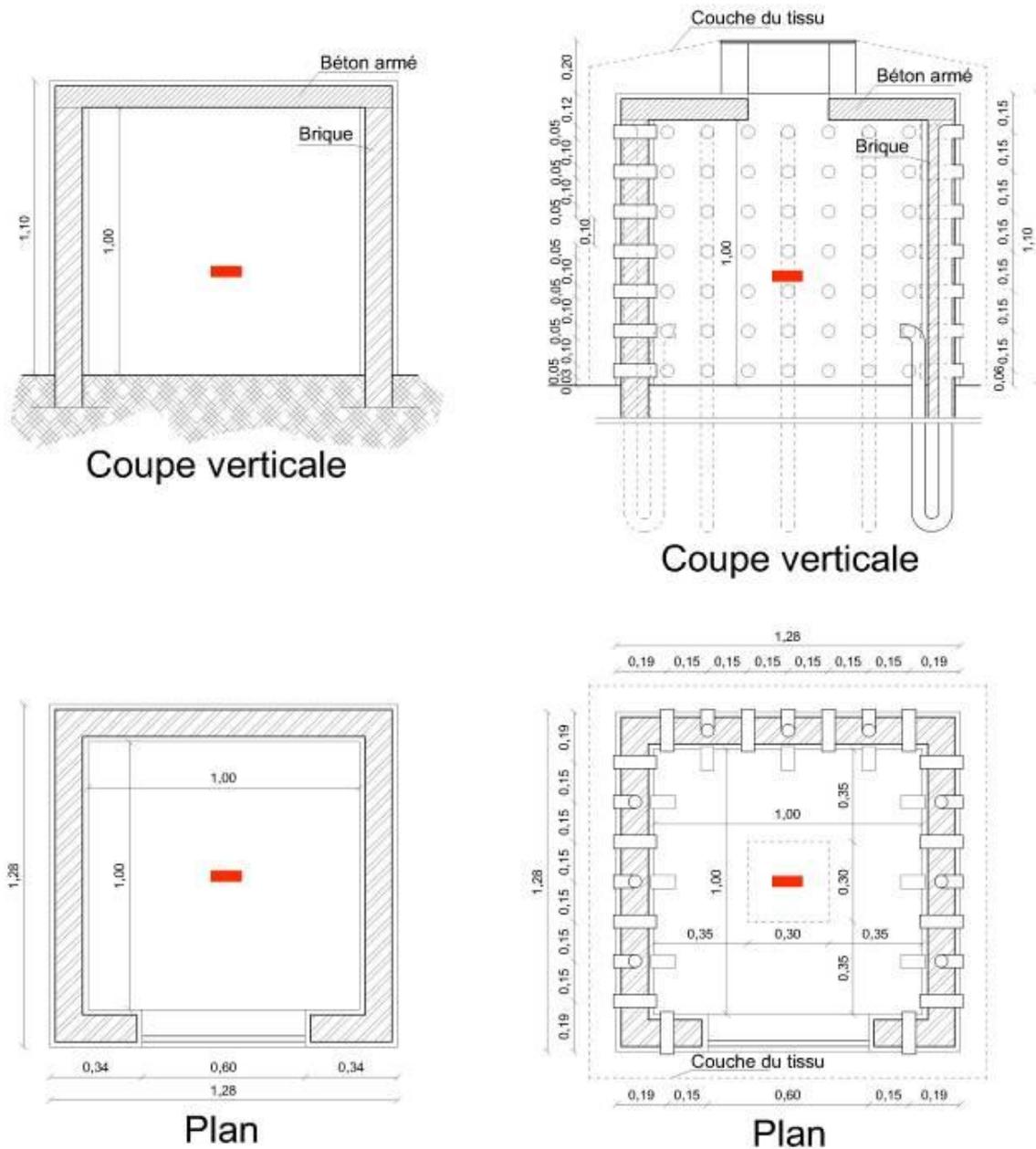


Figure 5.11: Les emplacements des appareils de mesure (en rouge)

### 5.3.5 Différentes étapes de la mesure

La première phase de l'expérimentation consiste en l'enregistrement de la température et de l'humidité pour les deux modèles, successivement. Cette phase sera suivie par d'autres mesures sur les deux modèles simultanément.

Les mesures ont été prises à différentes périodes :

- Dans la première étape de l'expérience, les mesures ont été prises sur le modèle traditionnel pendant 24 heures. Les mesures ont été enregistrées chaque demi-heure. Cette phase a duré du 17/07/2010 à 19h00 jusqu'au 18/07/2010 à 18h30.
- La deuxième étape de l'expérimentation a consisté en la mesure du deuxième modèle respirant pendant 24 heures, avec une cadence d'une demi-heure. Les mesures ont été prises à l'intérieur et à l'extérieur du modèle, avec toutes les ouvertures en fonctionnement, les arroseurs d'eau et en mettant la couche de tissu à une distance de 10 cm des murs. L'expérimentation a duré de 19h00 le 19/07/2010 à 18h30 le 20/07/2010.
- La troisième étape est une comparaison des deux modèles (traditionnel et respirant) pendant 24 heures, avec une cadence des mesures d'une demi-heure. J'ai lancé la mesure le 20/07/2010 à 19h00, et elle était terminée le 21/07/2010 à 19h30. Cette étape a été réalisée sans l'utilisation des arroseurs.

### 5.3.6 Résultats prévus et des expérimentations complémentaires

Le but de cette expérimentation est de comparer le comportement thermique du modèle traditionnel et du modèle respirant au cours d'une journée chaude. Les résultats prévus seront donc des températures et des taux d'humidité relative pour les deux modèles, à l'extérieur et à l'intérieur. Par cette comparaison nous montrons le degré de besoin d'un système de refroidissement dans les deux modèles au cours d'une journée - c'est-à-dire le nombre d'heures dans une journée pour obtenir un confort thermique à l'intérieur de chaque modèle. Les premiers critères sont donc les conditions du confort thermique - telles que la température et l'humidité relative. Nous comparerons les températures et l'humidité relative mesurées pendant l'expérimentation avec la zone de confort proposée par Givoni sur le logiciel d'Ecotech. Le deuxième critère sera la vitesse et la répartition de l'air autour et à l'intérieur du modèle respirant, nous utiliserons dans cette phase un logiciel de simulation aérodynamique en appliquant les données climatiques réelles. Avec cette simulation nous montrons comment l'air se déplace et quelle est sa participation pour améliorer la sensation de confort thermique des utilisateurs. Le calcul mathématique (voir partie théorique) peut nous donner une image sur la quantité d'air captée par les murs respirants en utilisant les données climatiques réelles de la vitesse et de la direction du vent.

## 5.4 Résultats

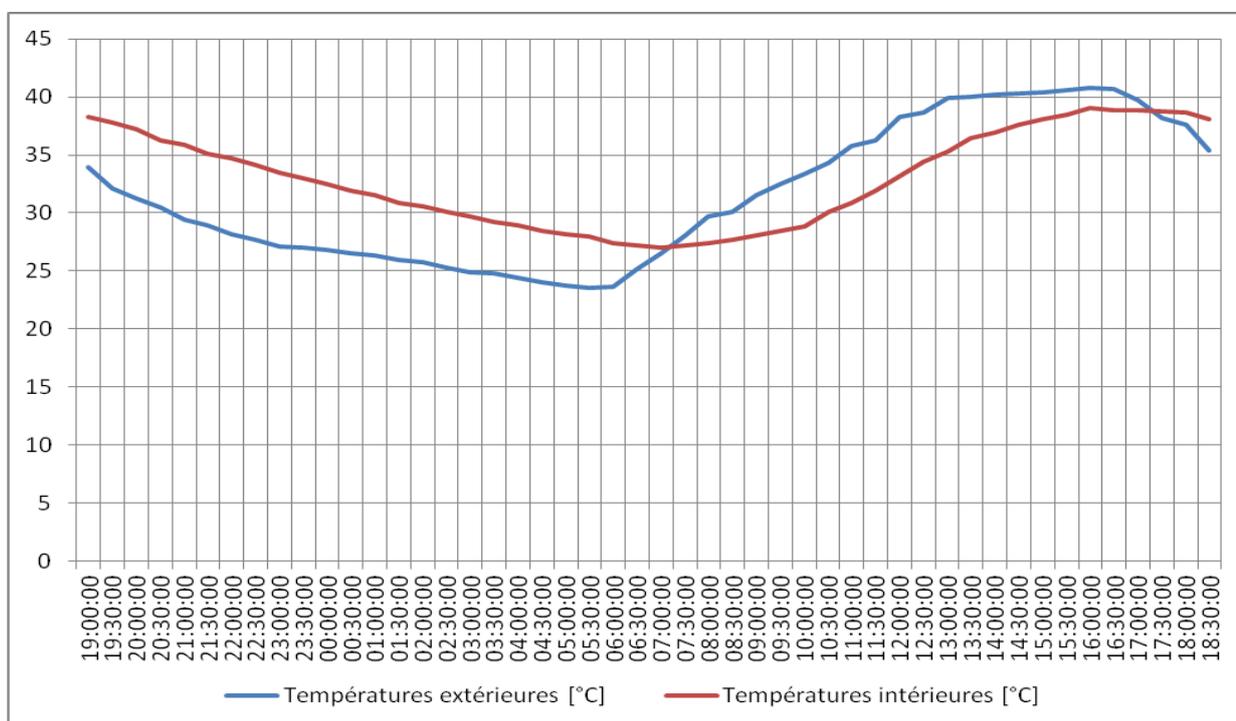
Les mesures suivantes ont été enregistrées selon les quatre phases initiales déjà mentionnées au paragraphe précédent:

### 5.4.1 Première étape: le modèle traditionnel

*Tableau 5.2 : Les températures et les taux d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du modèle traditionnel au cours d'une journée (première phase)*

	Date	Heure	EXTERIEUR		INTERIEUR	
			Humidité relative [%HR]	Températures [°C]	humidité relative [%HR]	Températures [°C]
1	17/07/2010	19:00:00	19	33,9	18,3	38,3
2	17/07/2010	19:30:00	24	32,1	20,2	37,8
3	17/07/2010	20:00:00	29,5	31,2	23,6	37,2
4	17/07/2010	20:30:00	32,3	30,5	25,3	36,3
5	17/07/2010	21:00:00	33,2	29,4	27,1	35,9
6	17/07/2010	21:30:00	34,5	28,9	29,7	35,1
7	17/07/2010	22:00:00	35,9	28,2	30,7	34,7
8	17/07/2010	22:30:00	35,3	27,7	32	34,1
9	17/07/2010	23:00:00	36,3	27,1	33,2	33,5
10	17/07/2010	23:30:00	38	27	33,3	33
11	18/07/2010	00:00:00	43,1	26,8	35,8	32,5
12	18/07/2010	00:30:00	43,8	26,5	37	31,9
13	18/07/2010	01:00:00	44,3	26,3	37,2	31,5
14	18/07/2010	01:30:00	44,4	26	38,6	30,9
15	18/07/2010	02:00:00	44,5	25,8	39	30,6
16	18/07/2010	02:30:00	45,2	25,3	39,4	30,1
17	18/07/2010	03:00:00	47,5	24,9	40	29,7
18	18/07/2010	03:30:00	48,1	24,8	40,1	29,2
19	18/07/2010	04:00:00	48,9	24,4	40,2	28,9
20	18/07/2010	04:30:00	49,2	24	40,6	28,5
21	18/07/2010	05:00:00	49,6	23,7	40,8	28,2
22	18/07/2010	05:30:00	50,1	23,5	41	28
23	18/07/2010	06:00:00	51,1	23,6	41,1	27,4
24	18/07/2010	06:30:00	49,1	25,2	42,1	27,2
25	18/07/2010	07:00:00	48,5	26,5	42,8	27
26	18/07/2010	07:30:00	47,2	28,1	43	27,2
27	18/07/2010	08:00:00	46,3	29,7	44,3	27,4
28	18/07/2010	08:30:00	45,4	30,1	44	27,7
29	18/07/2010	09:00:00	45,4	31,5	44,2	28,1
30	18/07/2010	09:30:00	43,7	32,5	42,6	28,5
31	18/07/2010	10:00:00	41,4	33,4	42,7	28,8

32	18/07/2010	10:30:00	31	34,3	39,2	30,1
33	18/07/2010	11:00:00	25,3	35,8	38,3	30,9
34	18/07/2010	11:30:00	24,3	36,3	36,1	31,9
35	18/07/2010	12:00:00	21,4	38,3	34,7	33,2
36	18/07/2010	12:30:00	20,1	38,7	30,2	34,4
37	18/07/2010	13:00:00	17,8	39,9	29,7	35,3
38	18/07/2010	13:30:00	17,8	40	27,8	36,4
39	18/07/2010	14:00:00	17,6	40,2	26,6	36,9
40	18/07/2010	14:30:00	16	40,3	24,3	37,6
41	18/07/2010	15:00:00	15,9	40,4	20,7	38,1
42	18/07/2010	15:30:00	15,2	40,6	18,2	38,5
43	18/07/2010	16:00:00	12,3	40,8	17,6	39
44	18/07/2010	16:30:00	12,2	40,7	15	38,9
45	18/07/2010	17:00:00	12,2	39,7	13,5	38,9
46	18/07/2010	17:30:00	15,3	38,2	12,8	38,8
47	18/07/2010	18:00:00	17,8	37,6	13,5	38,7
48	18/07/2010	18:30:00	21,3	35,4	14,8	38,1



*Figure 5.12: Les Températures mesurées pendant la première phase de l'expérimentation*

La température à l'extérieur varie entre 23,5°C et 40,8°C et la température à l'intérieur varie entre 27°C au minimum et 39°C au maximum. La température interne moyenne est de 32,9°C et celle externe est de 33,5°C. La température à l'intérieur de ce modèle traditionnel est moins élevée que la température à l'extérieur pendant 10 heures de 7h00 jusqu'à 17h00, et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur arrive à un maximum de 5,1 degrés

à 12h00. Alors que la température à l'intérieur devient plus élevée pendant la nuit, la différence atteint le maximum de 6,5 degrés à 21h00. Cette situation dure environ 14 heures.

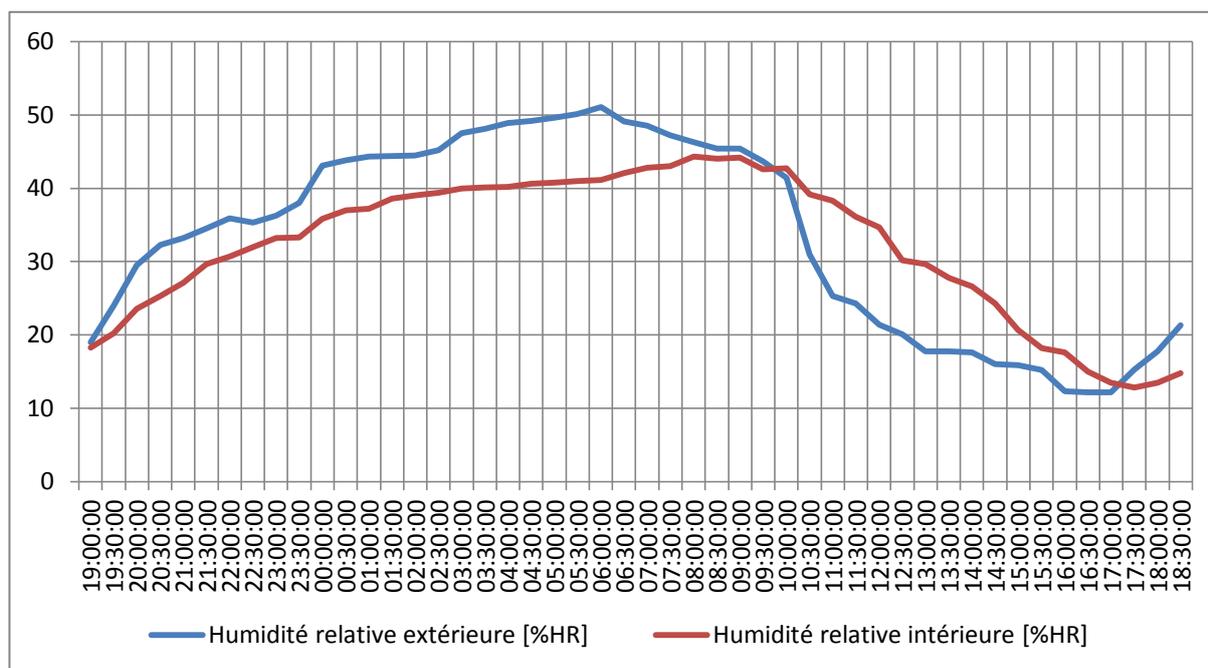


Figure 5.13: Les taux d'humidités relatives mesurées pendant la première phase de l'expérimentation

Les courbes d'humidité fonctionnent en sens inverse, pendant la matinée l'humidité est plus élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur, et la différence arrive au maximum de 13,3%, à 12h00, alors qu'elle est supérieure à l'extérieur pendant la nuit avec une différence de 10% à 6h00.

Les taux d'humidité relative à l'extérieur varient entre 12,2% et 51,1% avec une moyenne de 33,5%, tandis qu'elles varient entre 12,8% et 44,3% à l'intérieur du modèle avec une moyenne de 32,1%. Le taux d'humidité à l'intérieur est presque égal celui à l'extérieur ce qui est montré par la différence entre la moyenne de l'humidité relative à l'extérieur et à l'intérieur qui est de 1,3%.

### 5.4.2 Deuxième étape : le modèle respirant avec la fonction d'arroseur

La deuxième phase de l'expérience est de mesurer le comportement thermique du modèle respirant avec le fonctionnement de la ventilation, en mettant la couche de tissu et en faisant fonctionner les arroseurs d'eau. Le tableau suivant présente les températures et les taux d'humidité relative mesurées au cours de la journée du 19 Juillet à 19h00 jusqu'au 20 Juillet à 18h30.

**Tableau 5.3 :** Les températures et les taux d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du modèle respirant au cours d'une journée (deuxième phase)

	Date	Heure	EXTERIEUR		INTERIEUR	
			Humidité relative [%HR]	Températures [°C]	humidité relative [%HR]	Températures [°C]
1	19/07/2010	19:00:00	13	34,3	11,9	35,8
2	19/07/2010	19:30:00	17,5	33,1	10,8	35,4
3	19/07/2010	20:00:00	20,8	32,2	22,5	31,1
4	19/07/2010	20:30:00	24,6	31,2	18,5	32,7
5	19/07/2010	21:00:00	29,1	30,3	20,2	33,1
6	19/07/2010	21:30:00	30,5	29,9	21,4	33,4
7	19/07/2010	22:00:00	31,6	29,3	32,4	28,7
8	19/07/2010	22:30:00	33,4	29	29,1	30,2
9	19/07/2010	23:00:00	33,6	29,1	27,3	30,8
10	19/07/2010	23:30:00	32,7	29,2	26,2	31,5
11	20/07/2010	00:00:00	33,1	29,1	40,2	27,2
12	20/07/2010	00:30:00	32,6	28,7	33,5	28,9
13	20/07/2010	01:00:00	32,4	27,9	31,2	29,4
14	20/07/2010	01:30:00	34,2	27,3	27,1	30
15	20/07/2010	02:00:00	35,5	26,9	42,6	25,6
16	20/07/2010	02:30:00	37,5	26,5	35,7	27,3
17	20/07/2010	03:00:00	39,4	26,1	33,2	28
18	20/07/2010	03:30:00	40,9	25,8	30,3	28,7
19	20/07/2010	04:00:00	41,9	25,4	48,3	24,4
20	20/07/2010	04:30:00	42,7	25,1	38,3	26,1
21	20/07/2010	05:00:00	43,1	24,6	34,9	26,7
22	20/07/2010	05:30:00	43,4	24,3	32	27,4
23	20/07/2010	06:00:00	45,2	24,1	51,6	23,2
24	20/07/2010	06:30:00	46,5	24,2	43,1	25,1
25	20/07/2010	07:00:00	44,6	24,8	39,1	26,1
26	20/07/2010	07:30:00	40,4	26,4	37,9	27,1
27	20/07/2010	08:00:00	33,6	27,8	47,8	23,2
28	20/07/2010	08:30:00	27,8	28,9	45,1	25,5
29	20/07/2010	09:00:00	24	30	41,4	27
30	20/07/2010	09:30:00	21,4	30,8	38,8	28,2
31	20/07/2010	10:00:00	17,8	31,2	57,3	24,4
32	20/07/2010	10:30:00	15,7	31,8	48	26,6
33	20/07/2010	11:00:00	12,9	32,8	39,7	28,2
34	20/07/2010	11:30:00	11,9	33,8	33,1	29,5
35	20/07/2010	12:00:00	11,5	34,9	48,4	26,1
36	20/07/2010	12:30:00	11,4	36	35,2	28,7
37	20/07/2010	13:00:00	11,1	37	32,6	29,4
38	20/07/2010	13:30:00	10,3	37,9	27,6	31,3

39	20/07/2010	14:00:00	10,6	38,8	39,4	28
40	20/07/2010	14:30:00	10,7	39	29,1	30,3
41	20/07/2010	15:00:00	12,3	39,2	28,3	31,2
42	20/07/2010	15:30:00	12,8	39,7	23,9	32,5
43	20/07/2010	16:00:00	13,1	40,3	32,7	28,9
44	20/07/2010	16:30:00	13,3	40,7	27,1	31,1
45	20/07/2010	17:00:00	12,6	40,2	21,9	32
46	20/07/2010	17:30:00	11,8	39,1	15,7	33
47	20/07/2010	18:00:00	13,2	37,7	23,3	28,1
48	20/07/2010	18:30:00	18,1	34,3	19,2	29,5

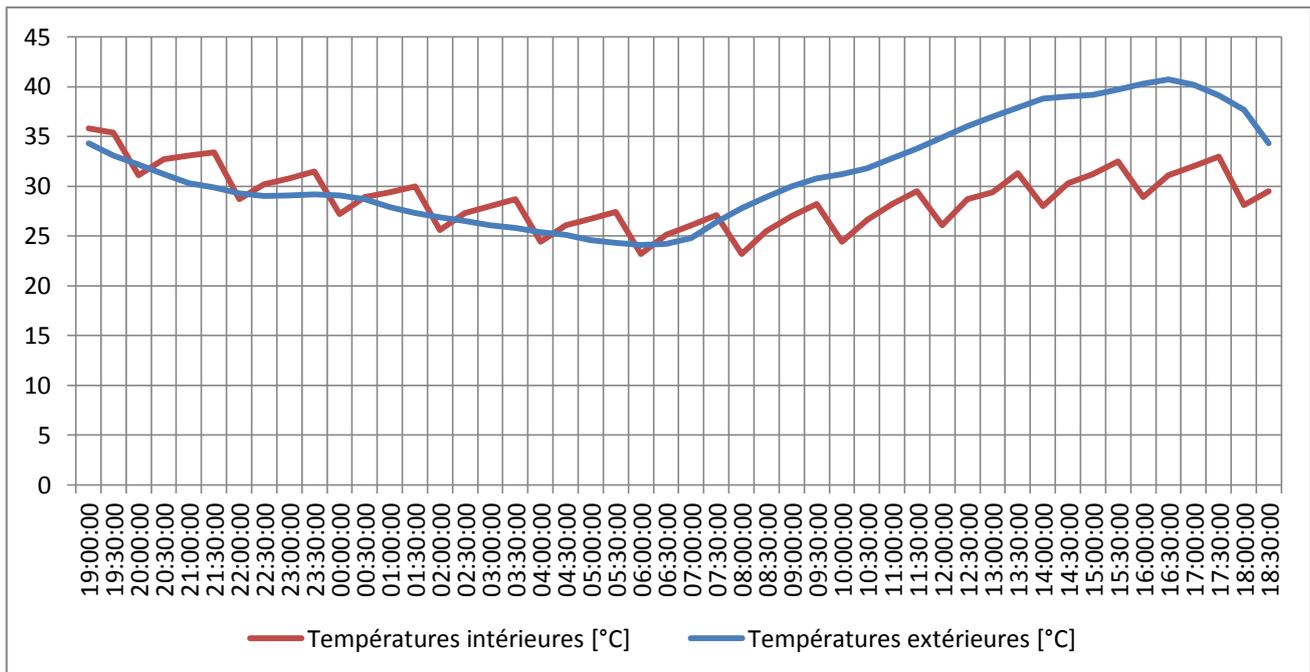


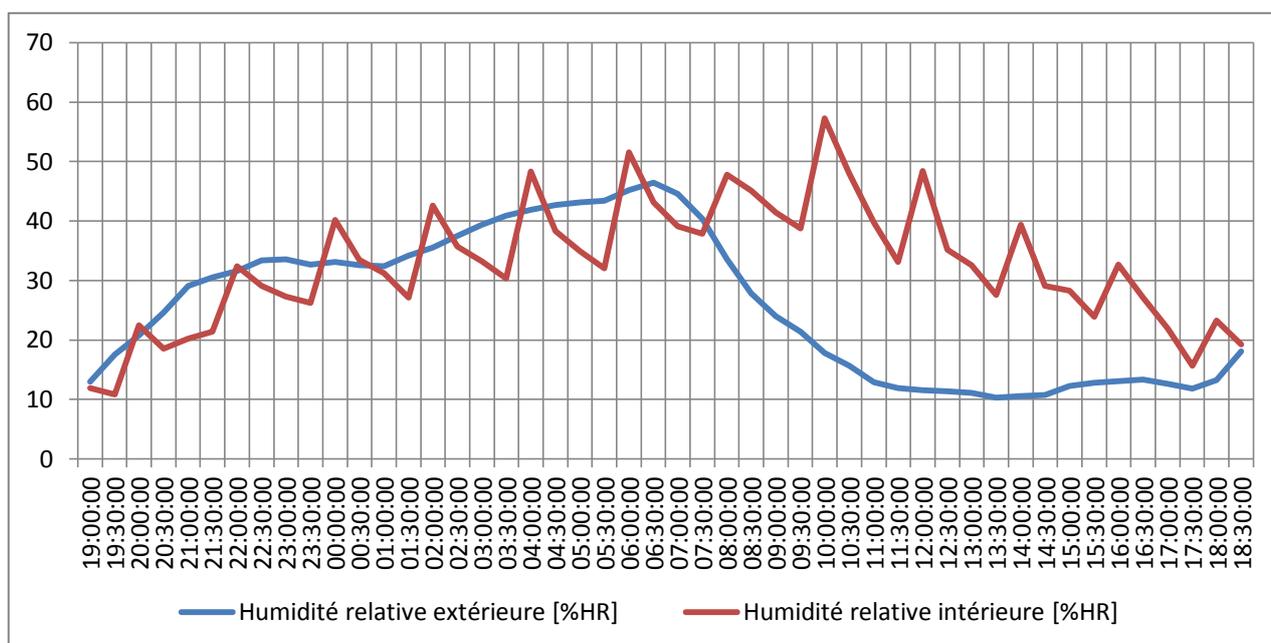
Figure 5.14: Les Températures mesurées pendant la deuxième phase de l'expérimentation

Au cours de l'expérimentation, la température externe varie entre 24,1°C et 40,7°C, ce qui ressemble beaucoup la température externe pendant la première phase qui était de 23,5°C à 40,8°C, tandis que la température interne varie entre 23,2°C et 35,8°C dans cette phase et elle était de 27°C à 39°C dans la première phase (le modèle traditionnel). Au cours de la journée, la moyenne des températures internes est de 28,8°C et celle de la température externe est de 31,4°C. Les températures internes prennent la forme d'une courbe en zigzag représentant les variations des températures à l'activation du système de refroidissement par évaporation. L'activation des arroseurs a eu lieu toutes les deux heures, en commençant à 20h00.

La température interne est inférieure à la température externe pendant à peu près 12 heures (10 heure dans le modèle traditionnel), et la différence maximale arrive à 11,4 degrés à 16h00 (dans le modèle traditionnel elle était de 5,1 degrés à 12 heures), tandis que la température

interne est plus élevée qu'à l'extérieur pendant 12 heures, et la différence maximale est de 3,5 degrés à 21h30 (dans le modèle traditionnel elle était de 6,5 degrés à 21h00).

A 19h00 le 19/07 au début de l'expérience, la température externe était de 34,3 degrés, soit la même que le jour suivant à 18h30. On remarque que la température interne était de 35,8 degrés le premier jour, alors qu'elle était de 29,5 degrés le jour suivant. C'est-à-dire que la température interne a diminué de 6,3 degrés, quand les températures externes sont restées les mêmes. Cela peut s'expliquer par le fait que, au début de l'expérimentation au premier jour, le modèle a accumulé de la chaleur pendant la journée précédant l'expérience, alors que l'utilisation du système respirant et le refroidissement par évaporation permet d'accumuler moins de chaleur. On est dans un processus thermique non plus statique mais dynamique.



**Figure 5.15:** Les taux d'humidités relatives mesurées pendant la deuxième phase de l'expérimentation

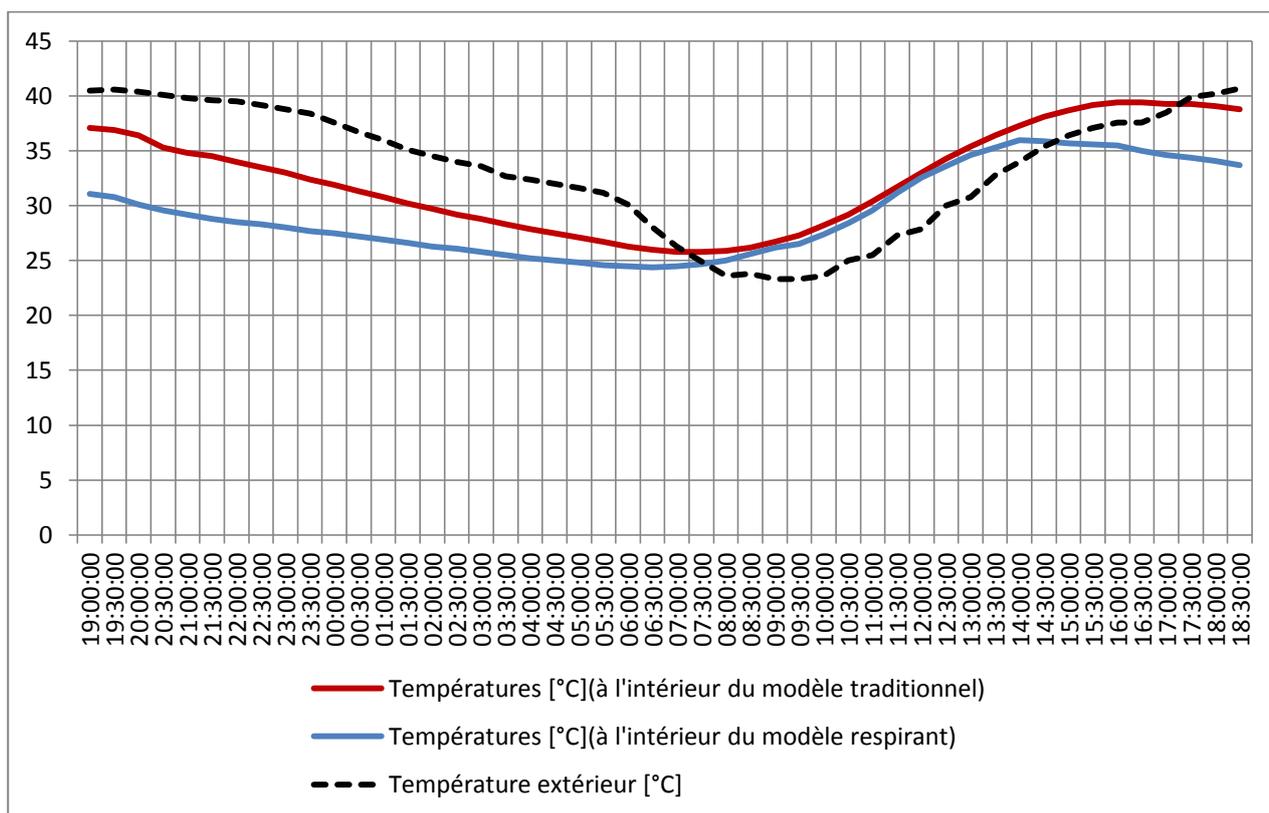
Le taux d'humidité était inférieur à l'intérieur par rapport à l'extérieur, pendant la nuit, alors que le taux d'humidité à l'intérieur est plus élevé qu'à l'extérieur le matin et en activant les arroseurs d'eau. Les taux d'humidité relative à l'extérieur varient de 10,3% à 46,5% avec une moyenne de 25,8%, tandis qu'ils varient de 10,8% à 57,3% à l'intérieur avec une moyenne de 32,8%. L'augmentation dans les moyennes de l'humidité relative est de 7% entre l'extérieur et l'intérieur (1,3% dans la première phase). Cette augmentation est causée par l'évaporation d'eau ajoutée en activant les arroseurs.

### 5.4.3 Troisième phase : comparaison des deux modèles simultanément et sans utilisation d'arroseur

*Tableau 5.4 : Les températures et les taux d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur des 2 modèles au cours d'une journée (Troisième phase)*

	Date	Heure	A l'intérieur du modèle traditionnel		A l'intérieur du modèle respirant	
			Humidité relative [%HR]	Températures [°C]	Humidité relative [%HR]	Températures [°C]
1	20/07/2010	19:00:00	24,8	37,1	29,5	31,1
2	20/07/2010	19:30:00	26,6	36,9	30,2	30,8
3	20/07/2010	20:00:00	28,5	36,4	31,8	30,1
4	20/07/2010	20:30:00	29	35,3	35,8	29,6
5	20/07/2010	21:00:00	30,1	34,8	37,8	29,2
6	20/07/2010	21:30:00	30,3	34,5	40,6	28,8
7	20/07/2010	22:00:00	31,4	34	43	28,5
8	20/07/2010	22:30:00	32,4	33,5	44,9	28,3
9	20/07/2010	23:00:00	33,1	33	45,7	28
10	20/07/2010	23:30:00	34	32,4	47,2	27,7
11	21/07/2010	00:00:00	34,8	31,9	47,8	27,5
12	21/07/2010	00:30:00	35,6	31,3	48,4	27,2
13	21/07/2010	01:00:00	36,1	30,8	49	26,9
14	21/07/2010	01:30:00	36,6	30,2	49,5	26,6
15	21/07/2010	02:00:00	37,8	29,7	50,3	26,3
16	21/07/2010	02:30:00	38,4	29,2	50,6	26,1
17	21/07/2010	03:00:00	38,7	28,8	50,7	25,8
18	21/07/2010	03:30:00	39	28,3	50,3	25,5
19	21/07/2010	04:00:00	39,5	27,9	50,6	25,2
20	21/07/2010	04:30:00	39,9	27,5	51,3	25
21	21/07/2010	05:00:00	40,3	27,1	51,8	24,8
22	21/07/2010	05:30:00	40,8	26,7	51,8	24,6
23	21/07/2010	06:00:00	42	26,3	52,9	24,5
24	21/07/2010	06:30:00	43,4	26	54	24,4
25	21/07/2010	07:00:00	44,4	25,8	55,8	24,5
26	21/07/2010	07:30:00	45,7	25,8	56,8	24,7
27	21/07/2010	08:00:00	46	25,9	58,8	25
28	21/07/2010	08:30:00	46,8	26,2	56,6	25,6
29	21/07/2010	09:00:00	47	26,7	54,3	26,2
30	21/07/2010	09:30:00	46,8	27,3	52,9	26,5
31	21/07/2010	10:00:00	46,2	28,2	49,3	27,4
32	21/07/2010	10:30:00	43,9	29,2	46,6	28,4
33	21/07/2010	11:00:00	41,9	30,4	43,7	29,6
34	21/07/2010	11:30:00	39,2	31,7	38,3	31,2
35	21/07/2010	12:00:00	37,1	33	32,6	32,6

<b>36</b>	21/07/2010	12:30:00	34,4	34,3	28,7	33,6
<b>37</b>	21/07/2010	13:00:00	31,7	35,4	27,7	34,6
<b>38</b>	21/07/2010	13:30:00	28,6	36,4	23,8	35,3
<b>39</b>	21/07/2010	14:00:00	27	37,3	22,3	36
<b>40</b>	21/07/2010	14:30:00	24,8	38,1	21,7	35,9
<b>41</b>	21/07/2010	15:00:00	23,2	38,7	20,9	35,7
<b>42</b>	21/07/2010	15:30:00	21,1	39,2	20	35,6
<b>43</b>	21/07/2010	16:00:00	20,9	39,4	22,2	35,5
<b>44</b>	21/07/2010	16:30:00	21,7	39,4	24,5	35
<b>45</b>	21/07/2010	17:00:00	21,9	39,3	26,6	34,6
<b>46</b>	21/07/2010	17:30:00	22,4	39,3	27,8	34,4
<b>47</b>	21/07/2010	18:00:00	22,8	39,1	28,1	34,1
<b>48</b>	21/07/2010	18:30:00	23,2	38,8	29	33,7



*Figure 5.16 : Les Températures mesurées pendant la troisième phase de l'expérimentation*

La température à l'intérieur du modèle respirant reste toujours plus basse que la température interne du modèle traditionnel même sans utilisation d'eau pour le refroidissement, ce qui pourrait rafraîchir encore plus le modèle respirant. La différence de température atteint 6,3 degrés à 20h00, alors que les températures dans les deux modèles étaient proches à 12H00, la différence étant de 0,4 degrés. La température moyenne à l'intérieur du modèle respirant est de 29,3°C (sans l'utilisation de l'eau) et est inférieure à celle à l'intérieur du modèle traditionnel qui est de 32,4°C.

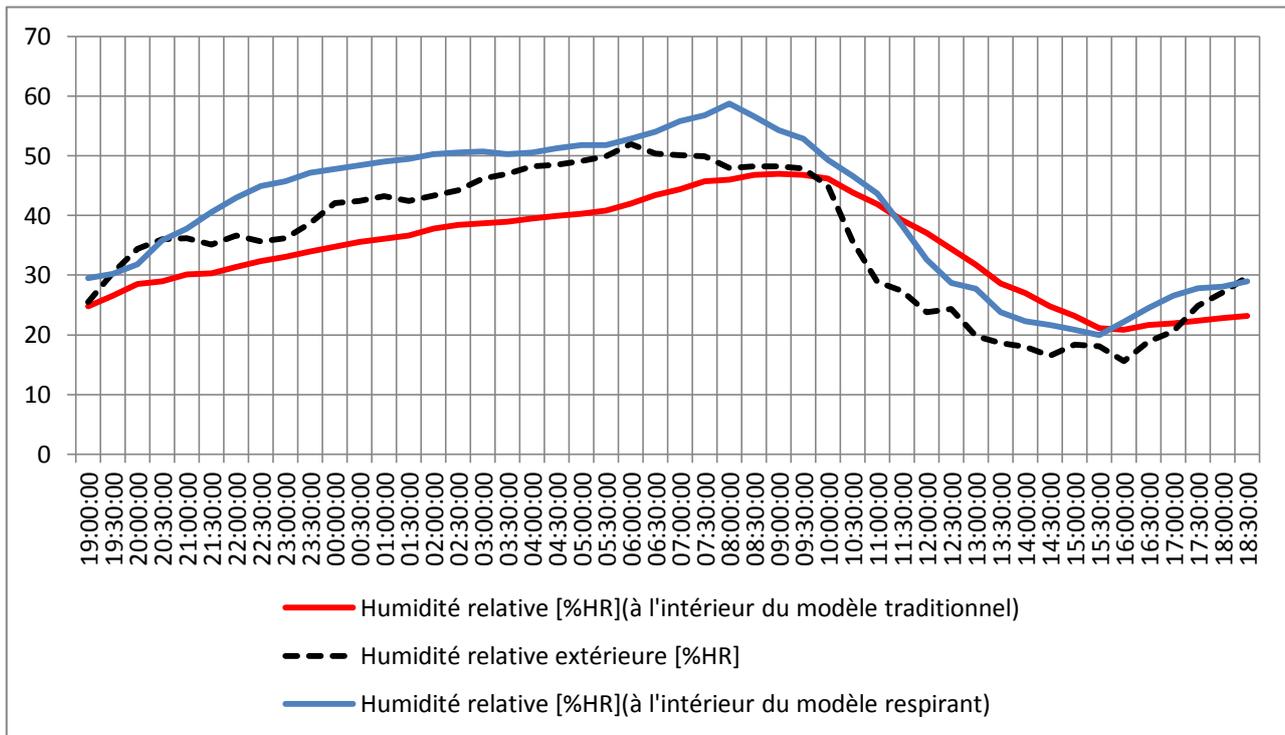


Figure 5.17: Les taux d'humidités relatives mesurées pendant la troisième phase de l'expérimentation

Le taux d'humidité du modèle respirant est plus élevé que celui du modèle traditionnel pendant la journée en général. Il suit le taux d'humidité à l'extérieur à cause de la ventilation directe qui est appliquée à ce modèle. Cette observation montre un problème qu'il faudra prendre en compte en utilisant le deuxième modèle. Toutefois, l'humidité du modèle respirant est moins élevée que le modèle traditionnel entre 11h30 et 15h30, où la ventilation naturelle élimine l'humidité à l'intérieur du modèle respirant.

## 5.5 Conclusion

L'expérimentation in-situ qui a été faite affirme l'hypothèse que le comportement thermique du modèle respirant est mieux que le comportement du modèle traditionnel. La température à l'intérieur du modèle respirant est inférieure à celle à l'intérieur du modèle traditionnel au cours de la journée. La différence entre la température interne du modèle respirant et du modèle traditionnel arrive jusqu'à 6,3°C sans l'activation du système de refroidissement par évaporation. Cette diminution de température n'assure pas un niveau de confort thermique, mais elle donne une bonne indication sur ce que ce concept biomimétique peut apporter sur le comportement thermique de nos bâtiments. Dans le chapitre suivant, nous allons discuter ces résultats afin de comprendre en détails les impacts de ce modèle sur l'aspect architectural et le confort thermique produit.

## 6. Discussion sur l'expérimentation et l'application du concept

Dans les derniers deux chapitres, nous avons présenté l'appropriation du modèle respirant proposé par notre recherche aux microclimats du Sinaï, ainsi que l'expérimentation in situ qui nous aide à tester l'efficacité du modèle respirant dans des conditions climatiques réelles. L'analyse rapide des résultats obtenus du modèle respirant nous montrait une amélioration des conditions du confort thermique dans le modèle proposé par rapport au modèle traditionnel, mais l'application de notre modèle biomimétique dans la réalité nécessite une discussion plus profonde et des études plus détaillées sur différents niveaux.

Une de ces études est l'étude de faisabilité, élément très important, mais qui n'entre pas dans le cadre de notre recherche actuelle qui se focalise sur le concept lui-même. Dans ce chapitre, la discussion se concentre sur l'analyse des résultats obtenus dans l'expérimentation afin de voir l'impact sur le confort thermique. Dans un deuxième temps, une discussion sur les déplacements de l'air à l'intérieur du modèle sera engagée. Cette discussion vise à montrer comment ces murs peuvent créer une ambiance dynamique et une variation de la vitesse de l'air qui accentue les sensations. Afin de visualiser le mouvement de l'air autour et à l'intérieur du modèle respirant, nous ferons une simulation aérodynamique numérique en utilisant le modèle respirant et en appliquant les données climatiques réelles de la région du

Sinaï sur cette simulation. La discussion sur la zone de confort (« l'approche traditionnelle du confort ») ainsi que celle sur le mouvement de l'air et les variations créées (« l'approche contemporaine du confort »), nous permettront de recouvrir les deux notions du confort thermique présentées dans le deuxième chapitre.

Dans un troisième temps, nous allons discuter de la ventilation naturelle en expliquant comment l'air se déplace naturellement, sans systèmes mécaniques et en calculant théoriquement le volume d'air qui peut-être capté par le modèle proposé. Une quatrième discussion sera évoquée autour de l'impact de notre proposition sur les bâtiments du point de vue architectural et urbain. Cette dernière vise à montrer comment notre proposition du mur respirant peut influencer sur les bâtiments hôteliers en brique et béton existants dans la région du Sinaï et comment cet effet sera accepté culturellement et visuellement.

Le chapitre actuel est divisé en quatre parties. La première partie présente le mur respirant et son impactsur les bâtiments du point de vue architectural. La deuxième partie traite de la ventilation naturelle dans le modèle respirant. La troisième partie discute de la notion contemporaine du confort et du mur respirant, et enfin dernièrement, du confort thermique par sa définition traditionnelle. Ces discussions mentionnées ici dans ce chapitre sont des ouvertures vers des études plus détaillées qui pourraient être menées prochainement dans des recherches post-doctorat. Ce chapitre avec ces prévisions d'études sont des étapes nécessaires afin de constituer un cahier des charges et puis de réaliser notre proposition du mur respirant sur le terrain.

## **6.1 Culture architecturale et logique thermique du mur respirant**

Dans le deuxième chapitre, l'analyse des bâtiments existants dans le Sinaï montrait qu'ils fonctionnent avec trois logiques thermiques différentes. Deux logiques ont été utilisées dans l'architecture vernaculaire. Ces bâtiments traditionnels de la région utilisent soit la logique de construction légère qui permet de ventiler régulièrement et rapidement l'espace bâti, soit la logique de construction avec une masse thermique importante afin de se protéger au cours du jour chaud et à l'inverse de garder la chaleur vers l'espace intérieur pendant la nuit froide. Ces deux logiques ne sont plus utilisées dans l'architecture d'aujourd'hui. Les pluparts des bâtiments d'aujourd'hui ignorent la conception bioclimatique et utilisent des climatisations. Ils appliquent donc la troisième logique qui est la logique de l'ignorance.

Dans notre proposition, nous avons introduit le concept du mur respirant qui fonctionne comme une couche d'adaptation thermique entre l'intérieure et l'extérieure. Il utilise donc une logique thermique mixte entre la logique des constructions légères et la logique de masse thermique. Lorsque le modèle respirant ouvre ses conduits de ventilation, il fonctionne comme une construction légère qui rafraîchit rapidement l'espace intérieur. Au contraire,

quand les conduits de ventilation sont fermés, les murs gardent la chaleur et fonctionnent comme une couche d'isolation ayant une inertie thermique importante amortissant l'écart des températures entre le jour et la nuit. En plus de la fonction de cette surface active qui respire et puis ventile les espaces intérieurs, il peut aussi 'transpirer' afin de diminuer la température et créer une ambiance thermique acceptable au cours de la période chaude de la journée.

L'application de ces murs actifs améliore d'un côté le comportement thermique des bâtiments, mais d'un autre côté, cela a un impact sur l'apparence des bâtiments. Le mur respirant avec ses trois couches est plus épais que le mur traditionnel en brique. Le changement d'épaisseur de 12 cm à 22 cm par exemple est important du point de vue architectural, mais n'a pas une grande influence sur les projets touristiques existants dans le Sinaï et c'est cela qui nous intéresse dans cette thèse. Ce type de projet avec les formes urbaines dispersées dans le terrain présente des surfaces suffisantes pour augmenter l'épaisseur des murs sans aucun problème et sans changement sur l'apparence visuelle des bâtiments.

L'élément qui changera vraiment l'apparence et aura un impact visuel important sera la couche externe du mur. Cette couche qui diminue le gain solaire sera faite en matériaux légers tels que le coton, les roseaux, les peaux d'animaux, etc. Du point de vue architectural, il est essentiel d'imaginer ce changement dans l'apparence que ce concept peut apporter sur l'architecture existante dans la région du Sinaï et de voir dans quelle mesure ce changement est accepté du point de vue architectural et culturel. À part cette couche externe légère, le mur peut être construit avec les mêmes matériaux utilisés dans la région tels que les briques rouges, les briques cuites, la pierre et le béton en ajoutant les conduits de ventilation. Ces matériaux et les entrées de ventilation ne changent pas visuellement l'apparence des bâtiments parce qu'ils seront cachés par la couche externe légère et cela peut donner une image assez différente de celle qui existe aujourd'hui. Cette couche impose une culture architecturale différente si elle est réalisée d'une manière sophistiquée et technologique, tandis qu'elle peut donner une image locale si elle est conforme aux matériaux utilisés dans l'architecture traditionnelle de la région comme la laine, le coton, les roseaux ou les peaux d'animaux, largement répandus depuis longtemps chez les bédouins qui habitent cette région dans leurs constructions légères.



*Figure 6.1: La perspective imaginaire d'un bâtiment hôtelier utilisant une couche externe en roseaux au lieu de la façade dénaturée par des systèmes de climatisation.*



**Figure 6.2 :** *La perspective imaginaire d'une maison utilisant une couche externe en roseaux fréquente dans les constructions touristiques entre la ville de Taba et la ville de Dahab, la région Sud-Est du Sinaï.*

À la place des bâtiments dénaturés par les unités des climatisations existantes, nous pouvons donner maintenant une image locale et culturelle par le mur respirant avec sa couche externe. Les peaux des animaux, la laine et le coton qui sont utilisés comme matériaux de construction traditionnels peuvent être utilisés pour la couche externe de notre mur respirant. Les roseaux utilisés dans les constructions légères d'aujourd'hui pour les projets touristiques peuvent être couverts les murs respirants en brique (Figure 6.1 et 6.2). La réutilisation des matériaux de l'architecture locale dans l'architecture moderne peut donner une image spéciale pour l'architecture de cette région acceptée culturellement par les usagers.

## 6.2 Déplacement d'air et volume capté par le mur respirant

L'étude de la ventilation naturelle et son influence sur la sensation de confort thermique nous montre que l'augmentation de la vitesse d'air permet, à l'être humain, de tolérer une température et un taux d'humidité plus élevés. Aucun mouvement d'air minimum n'est nécessaire pour assurer le confort thermique lorsque les températures se situent dans la zone de confort. La température opératoire peut, par contre, être augmentée jusqu'à 3°C au-dessus de la zone de confort si la vitesse de l'air est accrue au-dessus de 0,2 m/s<sup>1</sup>.

Selon une autre étude plus détaillée de l'influence de la ventilation sur la zone de confort, précise qu'une température maximale de 28°C, une humidité de 36 m bars et un air calme, cette température peut arriver jusqu'à 32,5°C, l'humidité jusqu'à 24 m bars avec une vitesse d'air importante, mais ne dépassant pas 1,5m/s, ce qui est inacceptable dans des espaces de bureau par exemple.

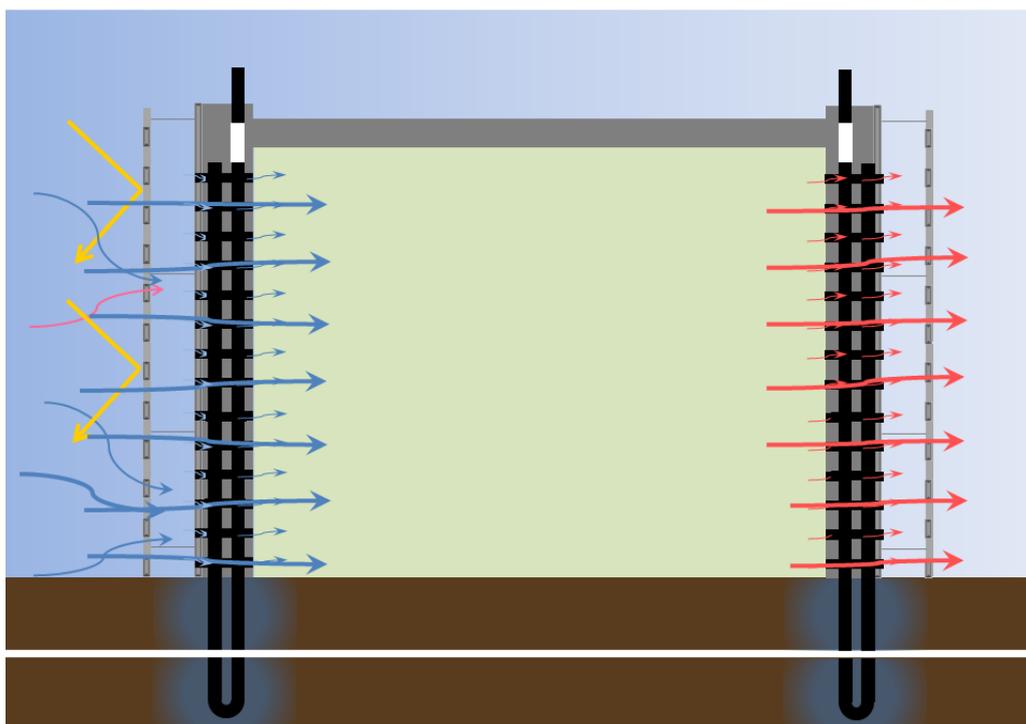
L'importance de la vitesse d'air sur la sensation du confort thermique nous incite à étudier comment le modèle respirant fonctionne pour assurer naturellement un déplacement d'air afin de créer une vitesse d'air dans l'espace intérieur. Il est important aussi de savoir la capacité du modèle respirant à capter du vent sans l'utilisation d'un système mécanique. C'est-à-dire de calculer le débit d'air possible à capter chaque heure.

### 6.2.1 Déplacement d'air – transversal et effet de cheminée

L'existence des entrées d'air distribuées sur les façades dans toutes les directions maximise la possibilité de capter le vent qui vient de n'importe quelle direction. La conception proposée du modèle respirant est capable de déplacer l'air naturellement avec l'effet du vent, l'effet de cheminée ou bien par une méthode combinée.

L'effet du vent (ventilation directe) se passe quand les bouches d'air qui se trouvent sur les murs exposés au vent et les sorties d'air sur les murs opposés sont ouvertes. Cette méthode peut être utilisée quand la vitesse d'air est suffisante et la température à l'extérieur inférieure à celle de l'intérieur, pendant la nuit par exemple (figure 6.3).

<sup>1</sup> Voir ([http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/C65728A6-9EE5-47F0-9066-45E9B16E594E/2961/dc\\_200\\_16183\\_3.pdf](http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/C65728A6-9EE5-47F0-9066-45E9B16E594E/2961/dc_200_16183_3.pdf)).



**Figure 6.3:** Fonctionnement supposé du système de murs respirants en utilisant l'effet du vent pour ventiler l'espace.

La ventilation naturelle par l'effet du vent, dans ce cas là, ne demande pas des bouches sur toutes les façades. Il suffit de concevoir des bouches sur les façades exposées au vent dominant et sur les façades opposées.

Le vent dominant dans la région étudiée où nous avons fait l'expérimentation in situ vient de Nord (voir tableau suivant : 86.2% du vent vient du Nord, du Nord-est et du nord-ouest) la plus part du temps, ce qui nous incite à transformer les façades Nord et Sud en murs respirants, tandis que les murs Ouest et Est sont négligeables dans ce cas là.

**Tableau 6.1 :** Directions du vent et ses pourcentages et les moyennes de vitesse annuelles, Ismaïlia, Égypte ( Ces pourcentages sont obtenues depuis les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

	Pourcentage du vent	Moyenne de la vitesse du vent	
<b>NORD</b>	63.5%	25 KM/H	6.94 M/S
<b>NORD-OUEST</b>	18.6%	20 KM/H	5.55 M/S
<b>OUEST</b>	4.7%	15 KM/H	4.16 M/S
<b>SUD-OUEST</b>	1.3%	15 KM/H	4.16 M/S
<b>SUD</b>	3.6%	18 KM/H	5.0 M/S
<b>SUD-EST</b>	3.1%	15 KM/H	4.16 M/S
<b>EST</b>	1.1%	15 KM/H	4.16 M/S
<b>NORD-EST</b>	4.1%	20 KM/H	5.55 M/S

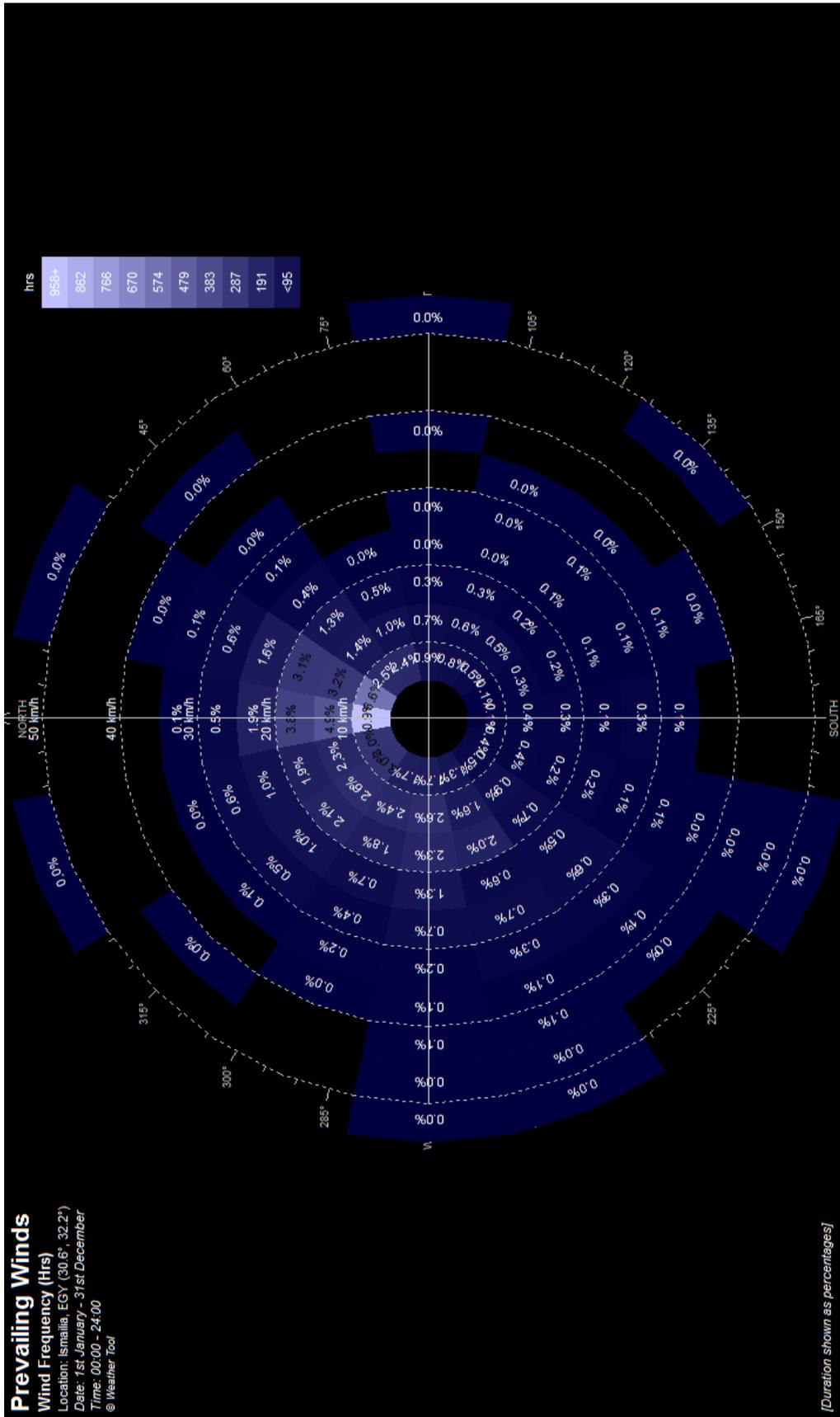
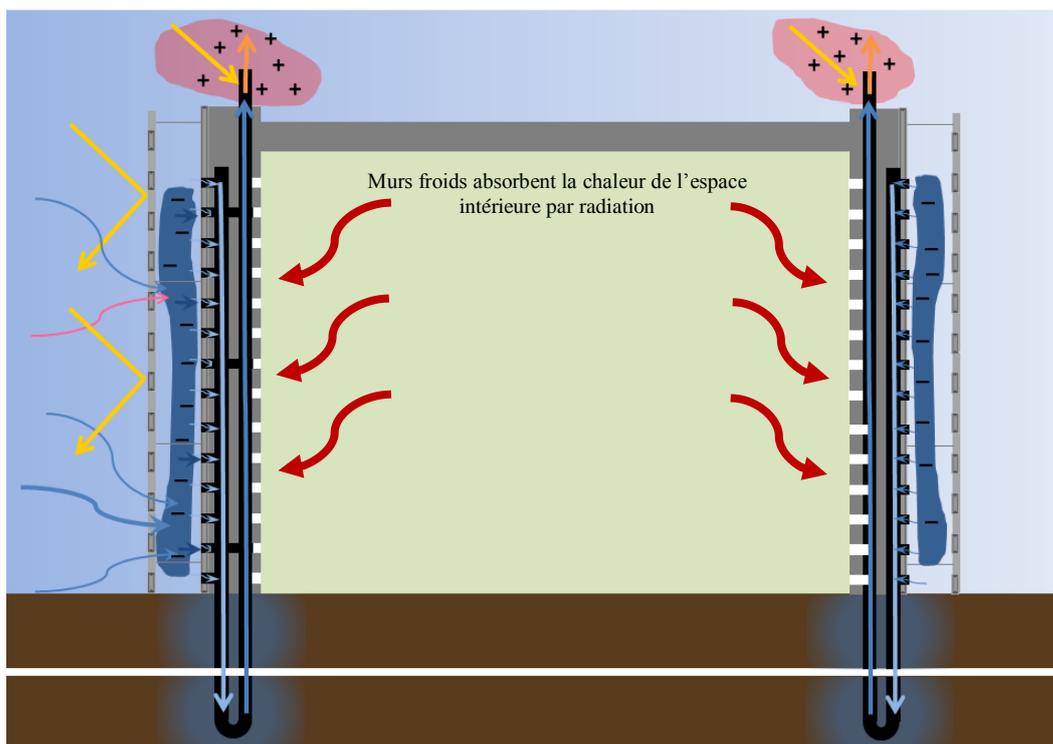


Figure 6.4: La rose des vents à Ismailia montre le vent et ses pourcentages au cours de l'année (l'analyse est faite sur le logiciel « Eco-tech » en utilisant les données climatiques présentées par l'AEER en format numérique).

Au contraire de l'effet de vent, l'effet de cheminée est utile quand le temps est calme. La ventilation se déroule par des conduites indirectes. L'air entre par des bouches sur les façades froides (pression négative) et sort par des sorties tempérées au niveau du toit (pression positive). Les façades deviennent froides par l'évaporation d'eau et la couche de protection contre les rayonnements directs du soleil, tandis que le toit s'échauffe à cause de l'exposition directe au soleil. Ce phénomène naturel se déroule par la différence des pressions entre l'entrée et la sortie d'air. Il peut être utilisé soit pour refroidir les murs eux-mêmes où les échanges thermiques se passent par radiation entre l'espace intérieur et les murs (figure 6.5), soit pour ventiler l'espace intérieur et dans ce cas la plupart des échanges thermiques se passent par convection (figure 6.6).

Le refroidissement des murs est approprié quand l'humidité relative est haute. Dans ce cas là, c'est préférable d'utiliser l'air froid et humide pour refroidir les murs qui absorbent en conséquence la chaleur de l'espace intérieur par radiation. Cette méthode affecte la température ambiante qui est la plus importante pour la sensation de confort thermique. Elle est efficace au cours de la journée en utilisant l'évaporation et sans avoir comme problème des taux d'humidité élevés.

Au contraire, ventiler l'espace intérieur par l'effet de cheminée est utile dans le cas du climat externe sec. Dans ce cas là, nous pouvons refroidir l'air par le passage sous terre et l'humidification par les arroseurs.



*Figure 6.5: Fonctionnement du système de murs respirants en utilisant l'effet de cheminée pour refroidir les murs sans ventiler l'espace intérieur.*

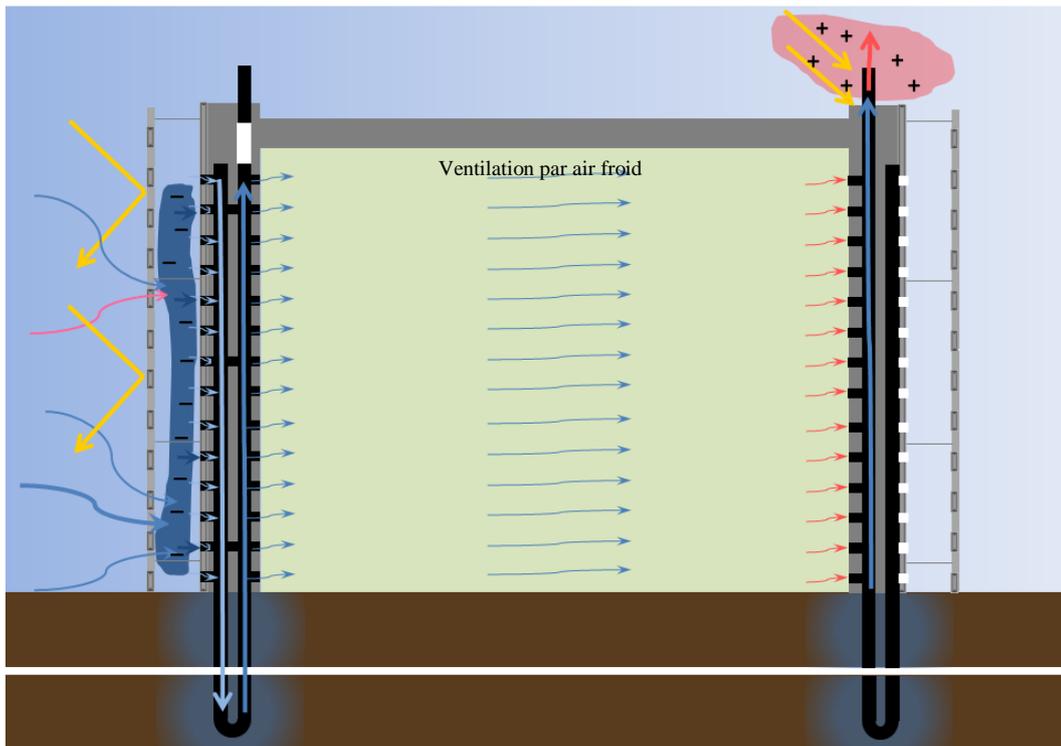


Figure 6.6: Fonctionnement supposé du système de murs respirants en utilisant l'effet de cheminée pour ventiler l'espace intérieur.

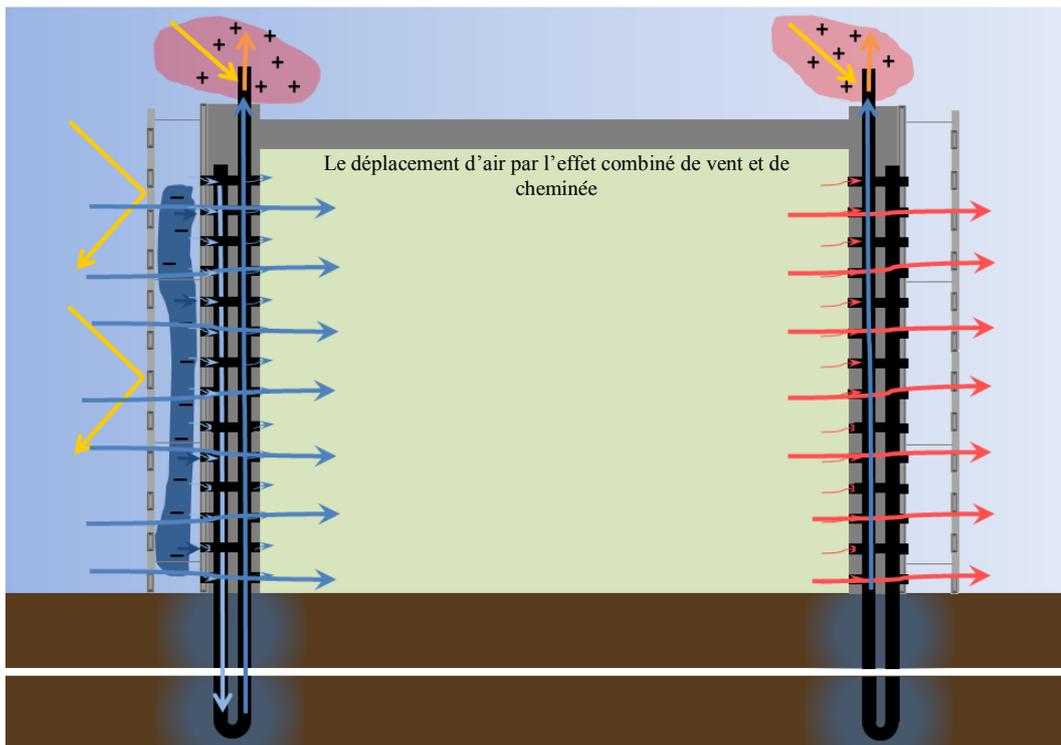


Figure 6.7: Fonctionnement supposé du système de murs respirants en utilisant un effet combiné de vent et d'effet de cheminée pour refroidir les murs et ventiler l'espace.

Dans le modèle respirant, le modèle est capable de déplacer l'air naturellement par un effet combiné du vent et l'effet de cheminée. Dans chaque façade du modèle, il y a deux types de conduits de ventilation. Pour chaque mètre carré de façade, il y a 28 bouches d'air liées aux conduits directs qui permettent la ventilation transversale, et 21 bouches d'air pour la ventilation indirecte en passant sous terre avant de ventiler l'espace intérieur.

Cette analyse montre que la façade orientée vers le vent dominant et la façade opposée doivent être conçues avec des conduits mélangés directs et indirects en bénéficiant de l'effet de vent et de cheminée simultanément, tandis que les autres façades peuvent avoir des conduits indirects en déplaçant l'air par l'effet de cheminée.

## 6.2.2 Débat d'air capté par le modèle respirant

Le modèle respirant avec ses murs poreux a la capacité de capter le flux d'air afin de ventiler l'espace intérieur, mais combien de volume d'air peut-il capter sous l'effet du vent et l'effet de cheminée ? Selon la conception proposée et testée dans l'expérimentation, chaque mètre carré de façade contient 28 bouches d'air pour la ventilation directe et 21 bouches d'air pour la ventilation indirecte. La surface de chaque bouche d'air est de  $0,00196 \text{ m}^2$  (rayon =  $0,025 \text{ m}$ ). La surface des bouches de ventilation directe (responsable de la ventilation transversale) est donc de  $0,055 \text{ m}^2$ , tandis que la surface des bouches de ventilation indirecte qui est responsable du déplacement d'air sous l'effet de cheminée est de  $0,041 \text{ m}^2$  pour chaque mètre carré de façade.

### 6.2.2.1 Débat d'air capté par l'effet du vent (ventilation transversale)

En appliquant l'équation présentée dans le deuxième chapitre (2.2.3.1), nous pouvons calculer le débit d'air qui peut-être capté par les bouches d'entrée de la ventilation forcée par le vent [Hui, En ligne]<sup>2</sup>:

$$Q = C_v \cdot A \cdot v$$

Où :

Q = débit d'air ( $\text{m}^3 / \text{s}$ )

A = surface des ouvertures d'entrée ( $\text{m}^2$ )

v = vitesse du vent ( $\text{m} / \text{s}$ )

$C_v$  = efficacité des ouvertures (supposé être de 0,5 à 0,6 pour les vents perpendiculaires et de 0,25 à 0,36 pour les vents de diagonale)

En appliquant cette équation dans notre modèle et en estimant que les vitesses du vent sont équivalentes des vitesses moyennes au cours de l'année, nous pouvons capter un volume d'air à peu près entre  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0,209 \text{ m}^3/\text{s}$  (tableau 6.2). Ces valeurs énormes signifient que nous pouvons remplacer le volume d'air à l'intérieur du modèle ( $1 \text{ m}^3$ ) respirant en à peu près

<sup>2</sup> voir (<http://www.arch.hku.hk/teaching/lectures/airvent/sect03.htm>)

5 à 8 seconds, c'est-à-dire 450 fois le volume du modèle chaque heure. Par le contrôle de la fermeture et de l'ouverture des bouches d'air, nous pouvons réguler la quantité d'air requise naturellement et sous l'effet de vent.

Tableau 6.2 : Les débits d'air captés sous l'effet du vent par chaque façade.

	Pourcentage du vent	Moyenne de la vitesse du vent		Surface des bouches d'entrée responsable de la ventilation transversale		Débit d'air capté par un mètre carré
		Km/h	m/s	Perpendiculaires m <sup>2</sup>	Diagonales m <sup>2</sup>	
<b>NORD</b>	63.5%	25	6.94	0,055	0	0,209
<b>NORD-OUEST</b>	18.6%	20	5.55	0	0,11	0,183
<b>OUEST</b>	4.7%	15	4.16	0,055	0	0,125
<b>SUD-OUEST</b>	1.3%	15	4.16	0	0,11	0,137
<b>SUD</b>	3.6%	18	5.0	0,055	0	0,151
<b>SUD-EST</b>	3.1%	15	4.16	0	0,11	0,137
<b>EST</b>	1.1%	15	4.16	0,055	0	0,125
<b>NORD-EST</b>	4.1%	20	5.55	0	0,11	0,183

### 6.2.2.2 Débat d'air capté par l'effet de cheminée

Dans le cas du vent calme, le modèle peut déplacer l'air sous l'effet de cheminée. Dans ce cas là, le débit d'air dépend de la distance entre les bouches d'entrée et de sortie, la température de l'air entrant et la température d'air sortant.

Le débit d'air déplacé par tirage thermique s'exprime par l'équation suivante présentée dans le deuxième chapitre (2.2.3.2) [Hui, En ligne]<sup>3</sup>:

$$Q = K \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_i}} \quad \text{if } T_i > T_o$$

$$Q = K \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \frac{T_o - T_i}{T_o}} \quad \text{if } T_o > T_i$$

Où :

Q = débit d'air déplacé par tirage thermique, m<sup>3</sup>/s

A = surface du flux, m<sup>2</sup>

K = coefficient de décharge (ordinairement de 0.65 à 0.70)

<sup>3</sup> voir (<http://www.arch.hku.hk/teaching/lectures/airvent/sect03.htm>)

$g$  = accélération de la pesanteur, 9.81 m/s<sup>2</sup>

$h$  = hauteur ou distance, m

$T_o$  = température extérieure, en K

$T_i$  = température intérieure, en K

En appliquant cette équation sur le modèle respirant testé dans le chapitre précédant et en estimant que nous avons une différence de températures de 5 à 6°C entre l'entrée et la sortie à cause du refroidissement par évaporation, le passage du flux d'air sous terre et l'exposition du toit au soleil, nous allons avoir un débit d'air de 0,0032 m<sup>3</sup> par seconde. C'est-à-dire changer le volume d'air du modèle en à peu près 5 minutes et renouveler l'air 12 fois chaque heure.

$$Q = \text{coefficient de décharge} * 4 \text{ façades} * (3 * 0,019 \text{m}^2) \text{ surface des tuyaux} *$$

$$\sqrt{2} * \text{accélération de la pesanteur} * 0,5 \text{m d'hauteur en moyenne} * (T^o - T_i / T^o \text{ en K})$$

$$Q = 0,7 * 4 * 0,0058 * \sqrt{2} * 9,81 * 0,5 * 308 - 302 / 308$$

$$Q = 0,0032 \text{ m}^3$$

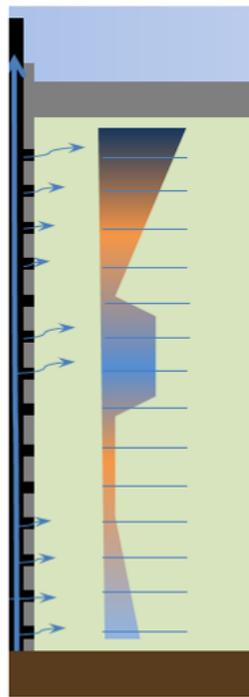
Ce volume d'air peut être utilisé pour refroidir les murs ou bien pour ventiler l'espace intérieur selon l'ouverture ou la fermeture des entrées et des sorties d'air du système de ventilation indirecte.

Une étude sur le refroidissement par ventilation montre qu'un rafraîchissement significatif peut être obtenu avec des débits largement plus faibles de l'ordre de 2 vol/h dans un très grand volume (atrium, halle...), de l'ordre de 4 à 6 vol/h dans des espaces intermédiaires (classe, restaurant..), et de 4 à 8 vol/h dans des pièces ou des logements. Selon le calcul, ces volumes peuvent être obtenus facilement par le modèle respirant. L'étude affirme aussi que la ventilation n'est pas suffisante pour un processus de refroidissement sans avoir une grande inertie thermique pour les murs, un écart de température entre l'intérieur et l'extérieur, une surface d'échange thermique importante et finalement une vitesse d'air élevée. Toutes ces conditions sont nécessaires pour que la ventilation soit efficace.

Dans le cas du modèle respirant, toutes les façades participent au processus d'échange thermique et elles peuvent être conçues avec une grande inertie thermique. La différence des températures entre l'extérieur et l'intérieur est faite par des méthodes de refroidissements passifs. Finalement, la vitesse d'air est fonction de la combinaison du vent et de l'effet de cheminé qui augmente la possibilité d'avoir un flux d'air suffisant au cours de la journée.

### 6.3 Question de variation de vitesse d'air

Les murs respirants et ses sorties d'air peuvent créer une variation des vitesses d'air dans l'espace. La vitesse du vent ainsi que le contrôle de ces bouches d'air aident à créer une fontaine aérienne qui enrichi la sensation des usagers. Ce contrôle peut être fait par l'ouverture ou la fermeture des sorties ou bien par des systèmes mécaniques afin de contrôler la vitesse d'air. Cette variation dans la vitesse et la distribution d'air crée un paysage dans l'invisible de l'espace intérieur en approchant l'idée du paysage thermique proposée par Philippe Rahm dans ses projets et présentée dans le chapitre 2.



*Figure 6.8: Le contrôle de la quantité et la vitesse d'air crée un paysage dans l'invisible.*

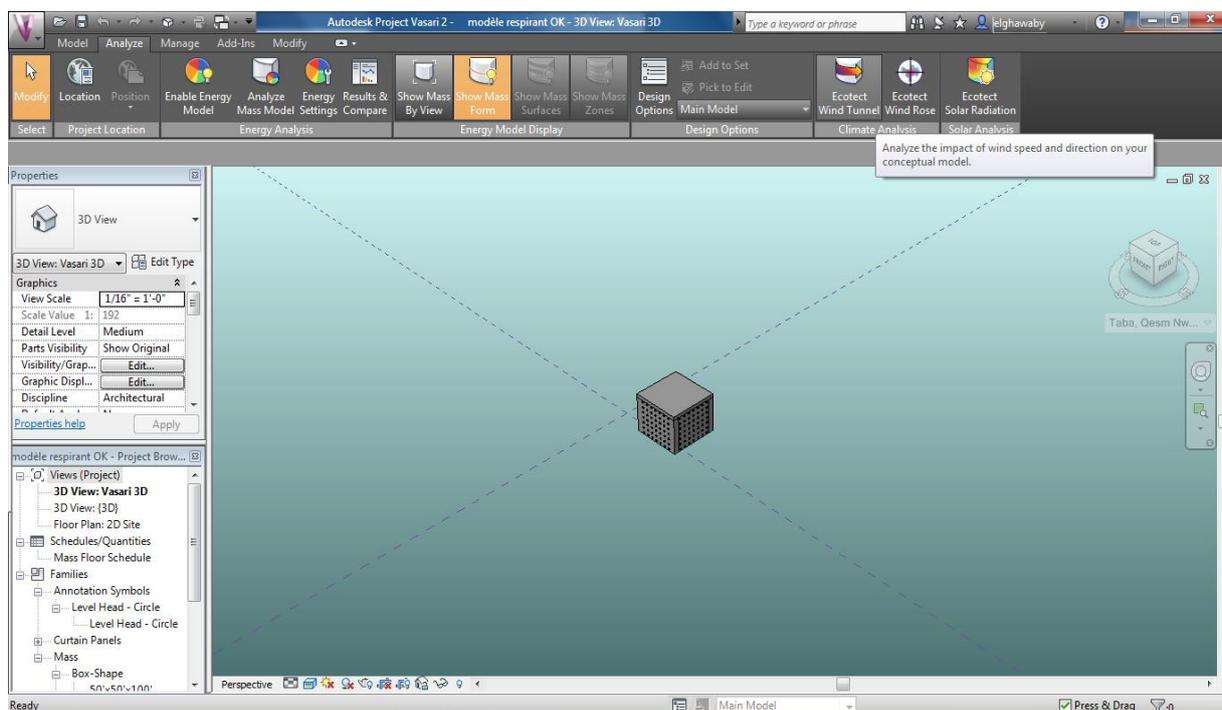
Dans l'expérimentation précédente, nous n'avons pas observé ce phénomène, mais une simulation numérique aérodynamique a été faite afin d'imaginer et de simuler les mouvements des flux d'air à l'intérieur d'un modèle respirant. Un logiciel d'Autodesk qui s'appelle « VASARI 2.5 » a été utilisé dans cette phase de simulation aérodynamique (figure 6.9). Ce logiciel a été choisi pour cette simulation pour deux raisons. La première est la facilité d'utilisation du logiciel et sa compatibilité avec Autodesk (AutoCAD utilisé pour le modèle 3D et Eco-tech utilisé dans l'analyse climatique du site). La deuxième raison est que ce logiciel accepte le format des fichiers présentés par l'AEER<sup>4</sup> pour les données climatiques du site. Ces données ont nous aidés dans la simulation du modèle respirant sous les mêmes conditions climatiques qui existent en réalité dans la région du Sinaï (vitesse et directions du vent).

<sup>4</sup>L'autorité d'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, le département d'énergie aux États-Unis.

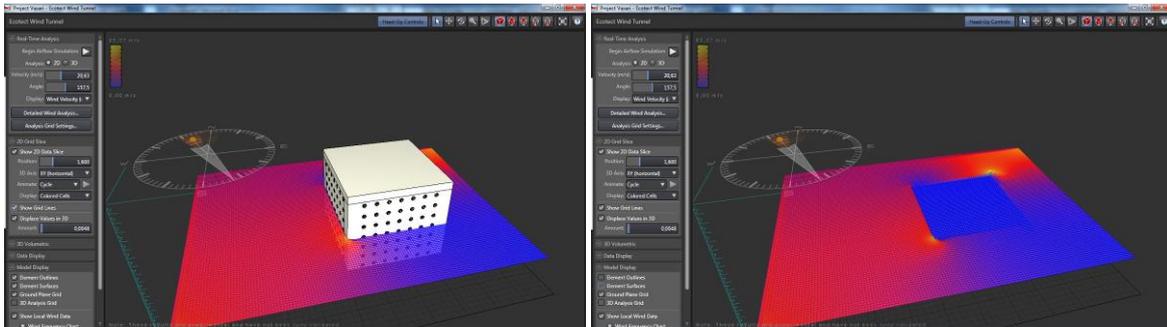
L'outil est facile à utiliser et flexible avec de nombreux onglets et touches facilités à utiliser notamment l'analyse du climat, du rayonnement solaire. Vasari et les fonctionnalités de modélisation conceptuelle ont une formation en modélisation et programmation paramétrique et permettent volumétrie organique. Les outils a est un paramétrique flexible et des outils de conception géométrique, permettant une variété de formes et de modèles 3D avec un architecte sympathique volumétrie 3D et outil de modelleur.

Les auteurs de ce logiciel (Projet Vasari 2013-Autodesk) affirme la précision des résultats obtenus par une étude d'analyse aérodynamiques 3D. Cette analyse a été appliquée à certain nombre de cas. La mesure de la traînée aérodynamique de l'objet, dans chacun de ces cas a pu s'installer sur une valeur qui correspond étroitement aux valeurs publiées. Selon une deuxième étude faite par Attia S., 2011 (Attia S., 2011, p. 20), la précision de ce logiciel est défini comme « haute », ce qui signifie des résultats précis et acceptables. Attia affirme que vasari a été largement revu et validé en utilisant le protocole d'évaluation ASHRAE et de BESTEST, les résultats dans tous les bâtiments de test situaient dans la fourchette acceptable (norme ANSI / ASHRAE 140-2001).

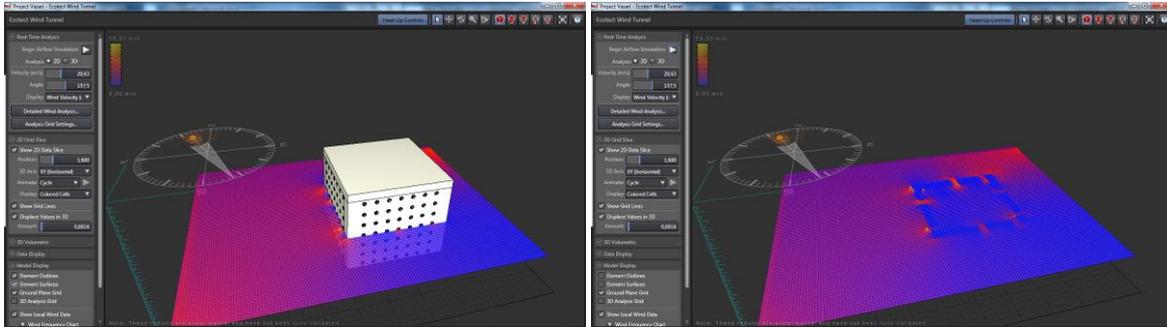
Dans cette expérimentation numérique, la même conception du modèle respirant réel expérimentée dans le site a été utilisée pour cette simulation numérique en utilisant les conditions climatiques préenregistrées de la zone centrale du Sinaï. Les conditions climatiques pendant la simulation montre une direction du vent Nord-ouest « 10° du Nord vers l'Ouest » qui est la direction du vent dominant dans la région du Sinaï avec une moyenne de vitesse d'air entre 5 et 25 Km/h.



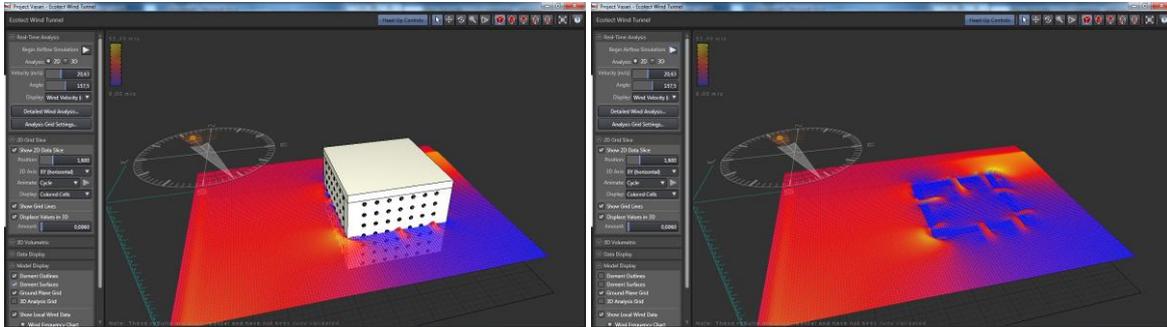
**Figure 6.9 :** L'interface du logiciel d'« Autodesk - Vasari 2,5 » qui a été utilisé pour la simulation aérodynamique du modèle respirant.



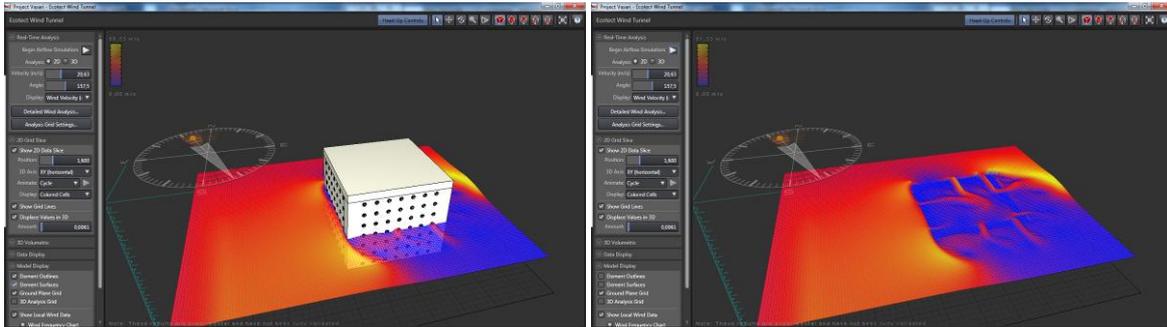
La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 5 km/h)



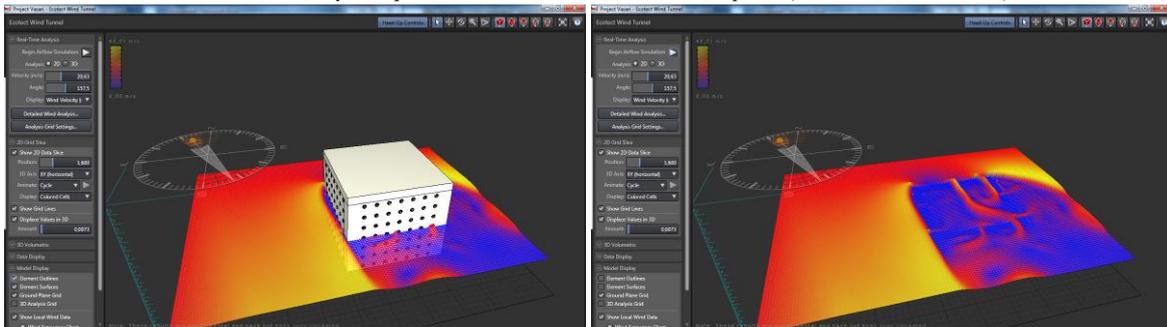
La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 10 km/h)



La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 15 km/h)

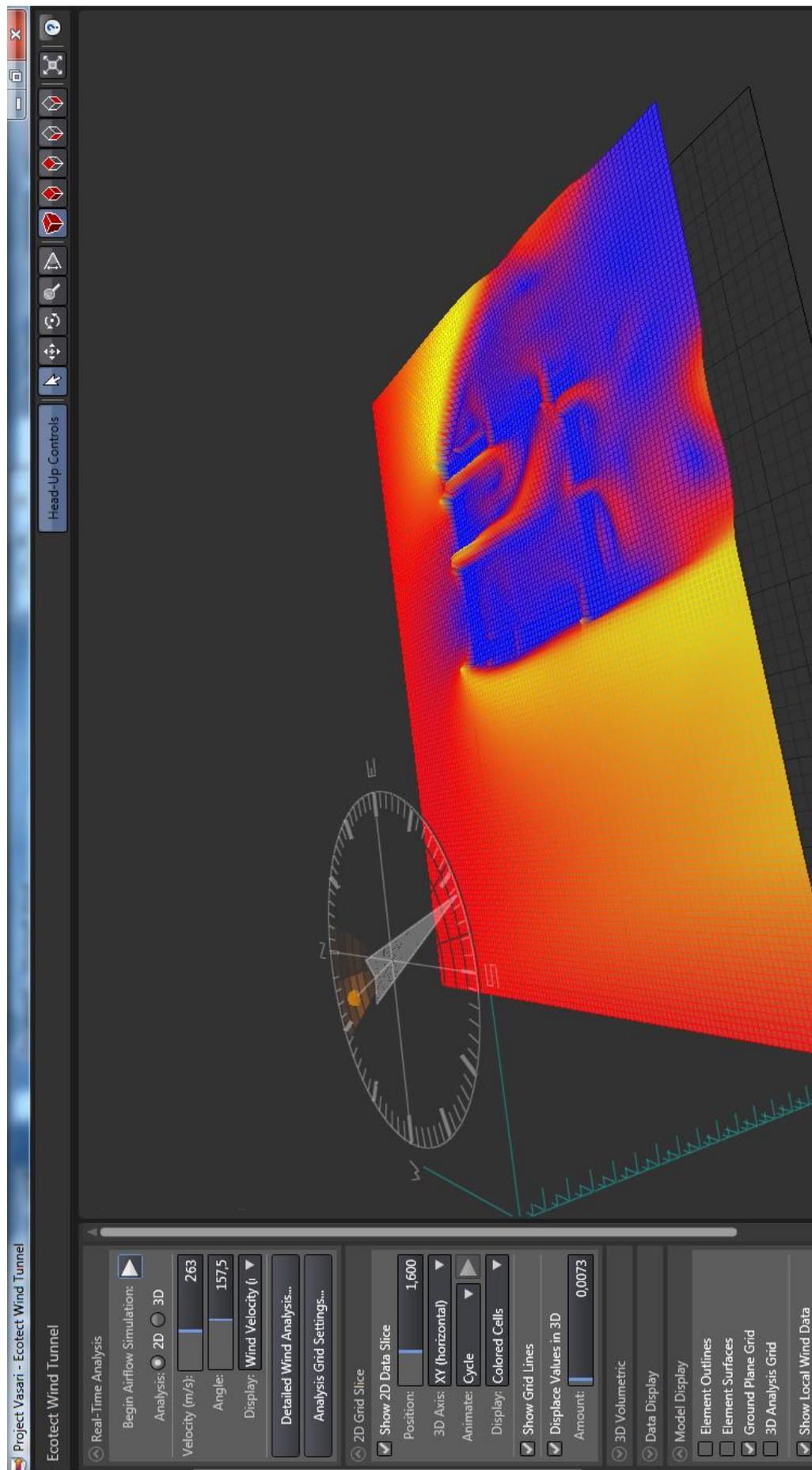


La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 20 km/h)



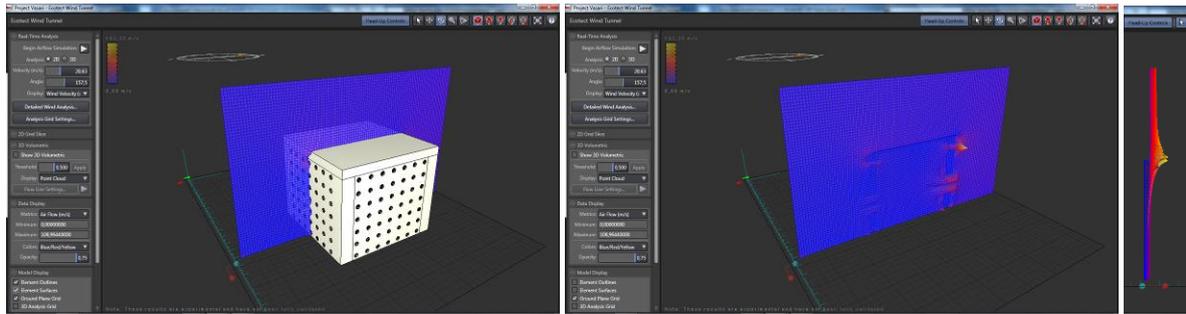
La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 25 km/h)

Figure 6.10 : La simulation aérodynamique du mouvement d'air du modèle respirant sur un plan horizontal.

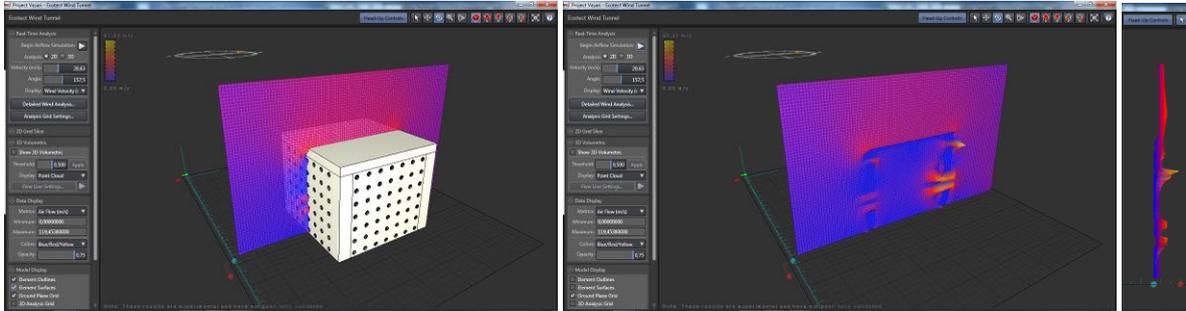


La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 25 km/h)

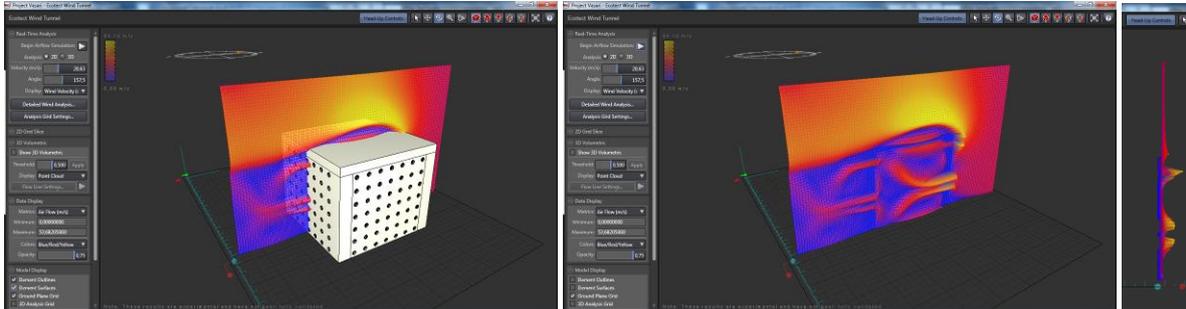
**Figure 6.11** : Variation dans les l'invisible : variation des vitesses d'air à l'intérieur du modèle respirant



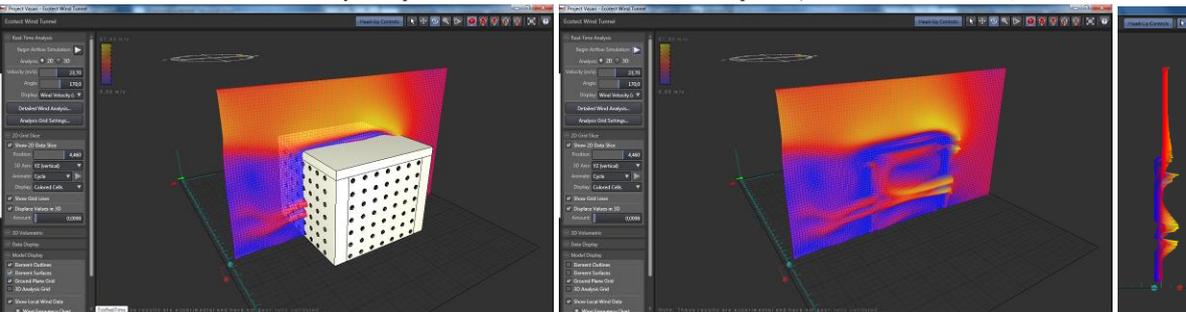
La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 5 km/h)



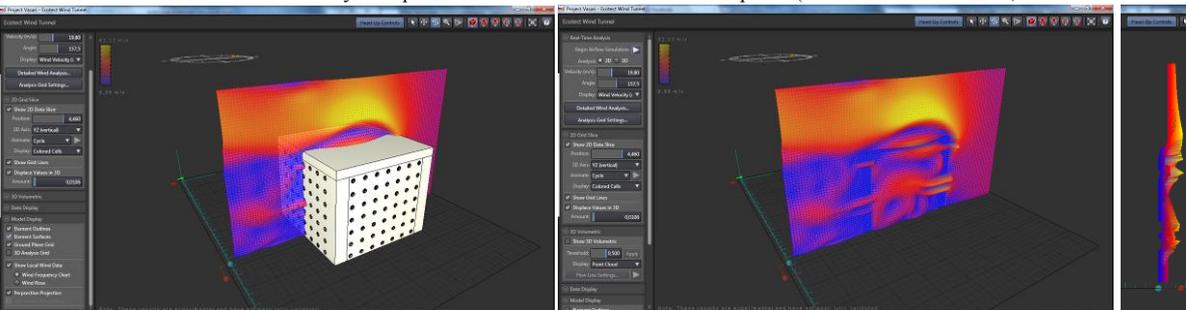
La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 10 km/h)



La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 15 km/h)



La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 20 km/h)



La simulation aérodynamique autour et à l'intérieur du modèle respirant (Vitesse du vent 25 km/h)

Figure 6.12: La simulation aérodynamique du mouvement d'air du modèle respirant sur un plan vertical.

Les images précédentes 6.10, 6.11 & 6.12 montrent les écoulements d'air autour et à l'intérieur d'un modèle respirant. Les images montrent cet écoulement sur un plan horizontal et un plan vertical au centre du modèle. Elles présentent la simulation aérodynamique en 5 phases commençant par du vent calme jusqu'à la vitesse dominante dans le site.

L'expérimentation numérique confirme que nous pouvons assurer d'une part, une ventilation naturelle à l'espace intérieur qui améliore les conditions du confort thermique, d'autre part, une variation des vitesses d'air qui construit une fontaine aérienne et engendre un paysage dans l'invisible de cet espace. Cette variation est claire dans les plans horizontaux et verticaux à l'intérieur du modèle expérimenté.

Cette variation est générée par deux facteurs, des vitesses d'air différentes et une distribution irrégulière dans l'espace. Par ces deux facteurs, nous pouvons concevoir le paysage thermique et assurer une asymétrie dans l'invisible de l'espace intérieur. Cette asymétrie qui est créée par ce mur respirant ou cette surface poreuse, ajoute une nouvelle valeur sur la définition traditionnelle du XXème siècle de confort thermique qui dépend normalement des températures et des taux d'humidités bien déterminés. Cette valeur est la variation des ambiances thermiques qui enrichi la sensation des usagers et rend l'ambiance plus agréable. Dans ce cas là, la porosité devient un nouveau caractère des façades dans les zones chaudes. Cette porosité des murs contrôle le mouvement du flux d'air en créant des ambiances variables. Par cette approche, nous allons donc parler de la porosité du mur en plus de sa résistance ou sa conductivité thermique.

## 6.4 Question du confort thermique

Les résultats sortis des méthodes d'Olgay, de Givoni, de Vogt-Miller et des autres sont proches. Ces méthodes définissent une zone de confort thermique qui comprend une étendue de températures entre 18°C et 28°C, et des taux d'humidité relative entre 20% et 80%. La norme ISO 7730 donne des amplitudes plus réduites pour la température qui varie entre 20°C et 26°C, et pour l'humidité relative entre 30% et 70%. Les usagers peuvent accepter une température plus élevée qui atteint jusqu'à 32°C avec l'existence d'un courant d'air.

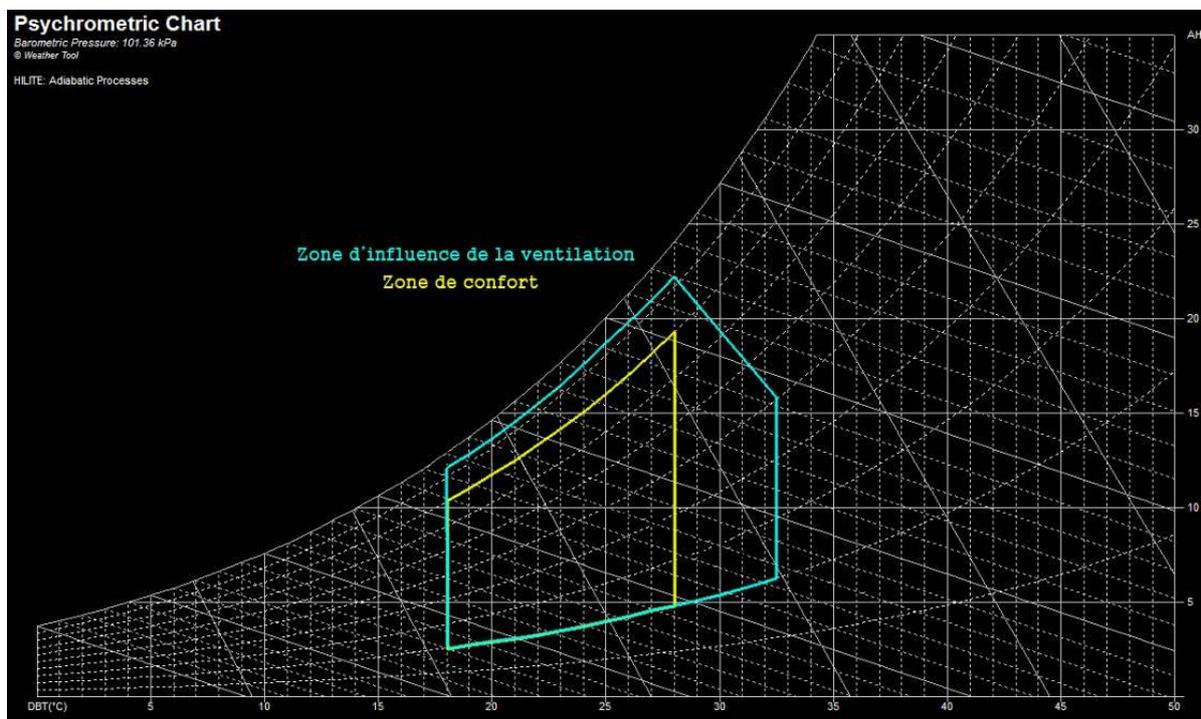


Figure 6.13: Zone de confort selon les méthodes d'Olgay, de Givoni et de Vogt-Miller.

Le modèle respirant expérimenté dans le chapitre précédant montre un changement du comportement thermique du bâtiment et une amélioration des conditions de confort. Regardant en détail ces résultats, nous aidera à évaluer sa capacité à assurer une zone de confort pour les usagers.

Le concept du mur respirant, ou le modèle proposé, contient plusieurs méthodes de refroidissement qui aident à baisser la température intérieure. Premièrement, ce modèle peut éviter l'exposition directe au soleil et le gain de chaleur par une couche externe de protection contre les rayonnements solaires. La fonction de cette couche ressemble au rôle thermique de nos vêtements, de la couche en matériaux cireux, de la peau velue des animaux. Cette couche avec sa capacité d'absorber l'humidité peut être mise en vibration mécaniquement ou naturellement par le vent pour accélérer le taux d'évaporation en imitant les systèmes de refroidissement trouvés chez les chiens et les fourmis.

La deuxième méthode de refroidissement est un système de refroidissement par évaporation qui imite les processus de sudation ou de transpiration existants pour la plupart des êtres vivants en régions chaudes. Cette méthode de refroidissement est utile si le climat est sec.

La troisième méthode de refroidissement utilisée est la géothermie. Cette méthode bénéficie de la température de la terre pour refroidir l'air avant d'entrer dans le bâtiment. L'utilisation de la terre et ses températures modérées est la logique de refroidissement utilisée par les rongeurs qui vivent dans le Sinaï.

L'analyse préliminaire du modèle proposé montre que ces méthodes de refroidissement aident à améliorer les conditions du confort thermique. Pendant la deuxième phase de l'expérimentation, nous avons mesuré le comportement thermique du modèle respirant avec l'activation de ces trois méthodes de refroidissement. Cette phase qui a été faite en utilisant les arroseurs d'eau chaque deux heures ce qui donne des températures plus basses, mais des taux d'humidité plus élevés. Cette remarque est claire et surtout sur les mesures qui ont été prises après les heures d'activation des arroseurs. La température intérieure moyenne pendant ces heures (à 20h00, 22h00, et chaque deux heures jusqu'à 18h00 le lendemain) est de 25,6°C, tandis que la température moyenne à 19h30 et chaque deux heures (les mesures qui ont été pris juste avant l'activation des arroseurs) est de 29,7°C. La température moyenne au cours de la journée est de 27,9°C par rapport une température extérieure moyenne de 31,4°C. D'un autre côté, le taux d'humidité relative moyen pendant ces heures d'arroseurs est de 50,5%, tandis que le taux d'humidité pendant les heures juste avant l'activation des arroseurs est en moyenne au cours de la journée de 37,1%. Le taux d'humidité relative moyen au cours de la journée est de 42,8%.

Les résultats obtenus pendant la deuxième phase de l'expérimentation (5.4.2 page 212) concernant le comportement thermique du modèle respirant montrent la diminution de la température intérieure moyenne à cause du refroidissement par évaporation (environ 4,0°C avant et après l'activation des arroseurs) avec une augmentation du taux d'humidité relative (d'environ 13%). La diminution obtenue par l'évaporation peut être plus efficace en augmentant les taux d'évaporation (soit par une quantité plus grande d'eau ou bien par une plus grande fréquence de pulvérisation d'eau), mais en même temps, il ne faut pas dépasser la limite maximum du taux d'humidité relative prédéfini par les méthodes du confort thermique qui est de 80%.

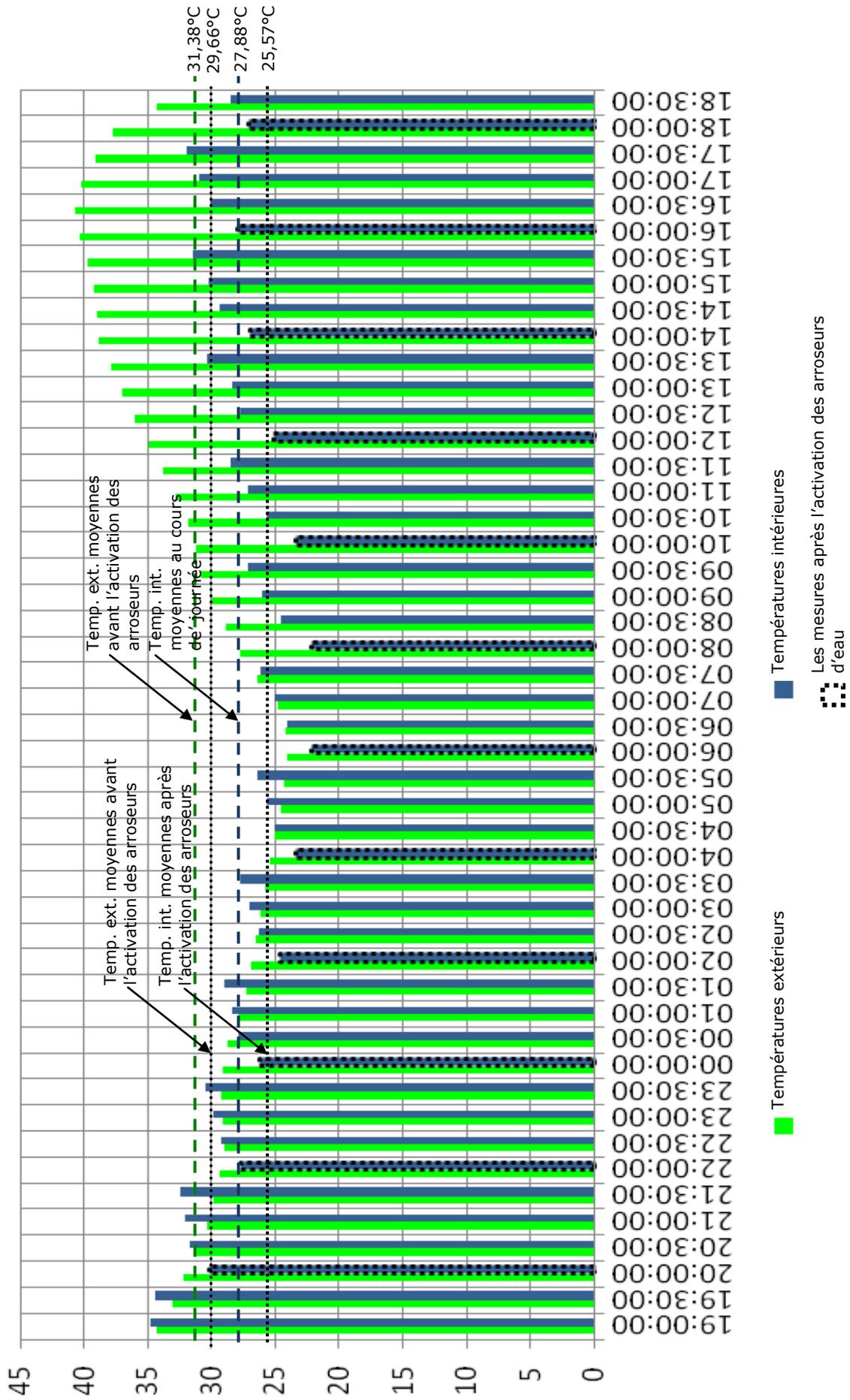
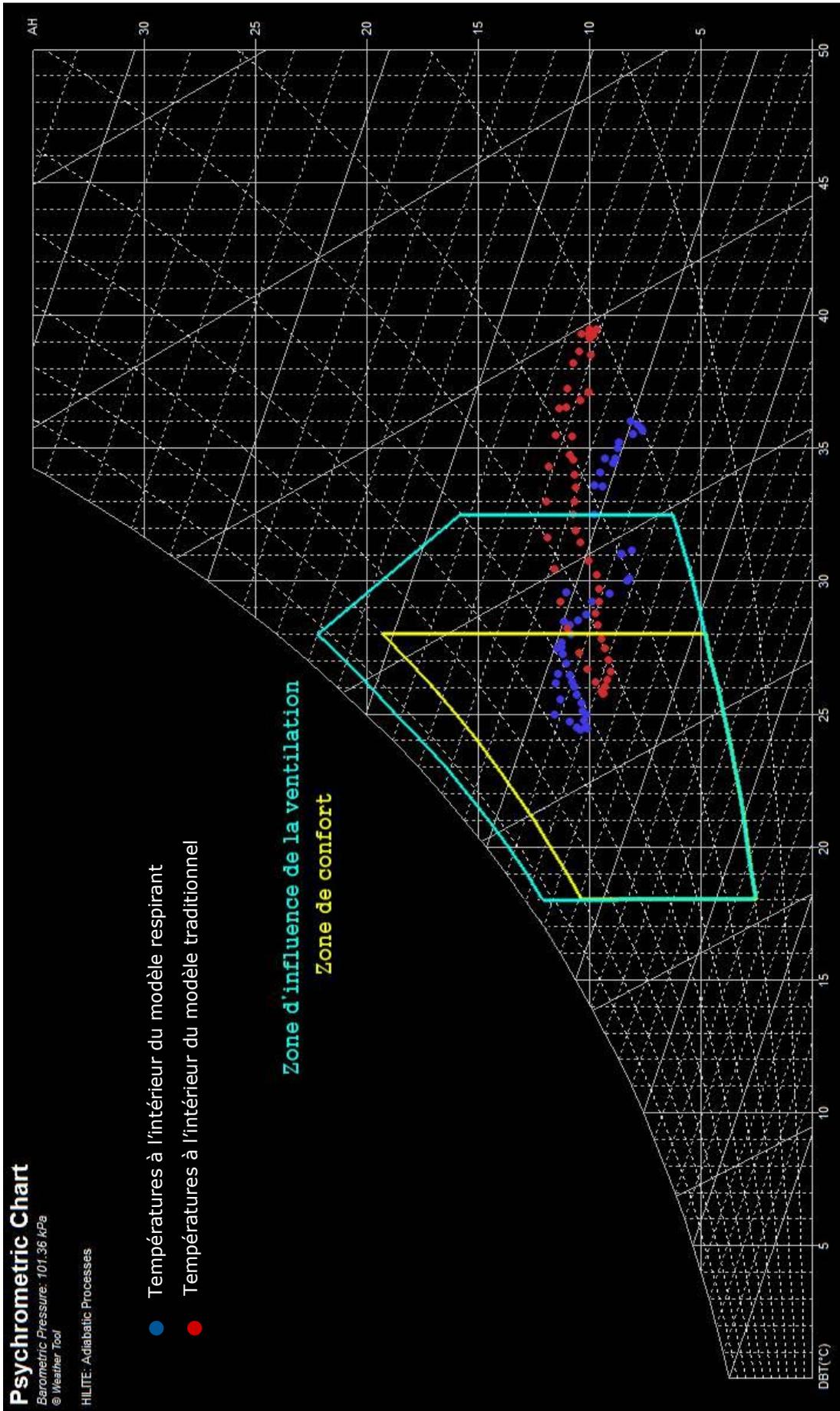


Figure 6.14 : Températures mesurées pendant la troisième phase de l'expérimentation

Pendant la troisième phase de l'expérimentation (5.4.3 page 216) concernant la comparaison entre le comportement thermique du modèle respirant (sans l'activation des arroseurs d'eau) et du modèle traditionnel, les températures mesurées à l'intérieur du modèle respirant étaient inférieures aux températures à l'intérieur du modèle traditionnel au cours de la journée. La diminution de la température intérieure entre les deux modèles varie de 0,4 (à 12h00) à 6,3°C (à 20h00). Ce résultat montre que le comportement thermique du modèle respirant est mieux approprié au climat chaud en général que celui du modèle traditionnel. La différence entre les températures internes entre le modèle respirant et le modèle traditionnel est grande pendant la nuit, tandis qu'elle est petite pendant le jour. Ce fait est à interpréter par l'existence d'un système de ventilation efficace capable d'utiliser la température extérieure quand elle est inférieure à celle de l'intérieur. Il est donc plus efficace d'ouvrir le système de ventilation et ses conduits pendant la nuit en bénéficiant de la ventilation nocturne pour refroidir l'espace intérieure, tandis qu'il faut activer d'autre moyen de refroidissement pendant la journée comme l'évaporation, si nécessaire, pour avoir une diminution de température plus importante.



*Figure 6.15: Les températures internes mesurées à l'intérieur du modèle respirant (blue) et à l'intérieur du modèle traditionnel (rouge) par rapport de la zone de confort*

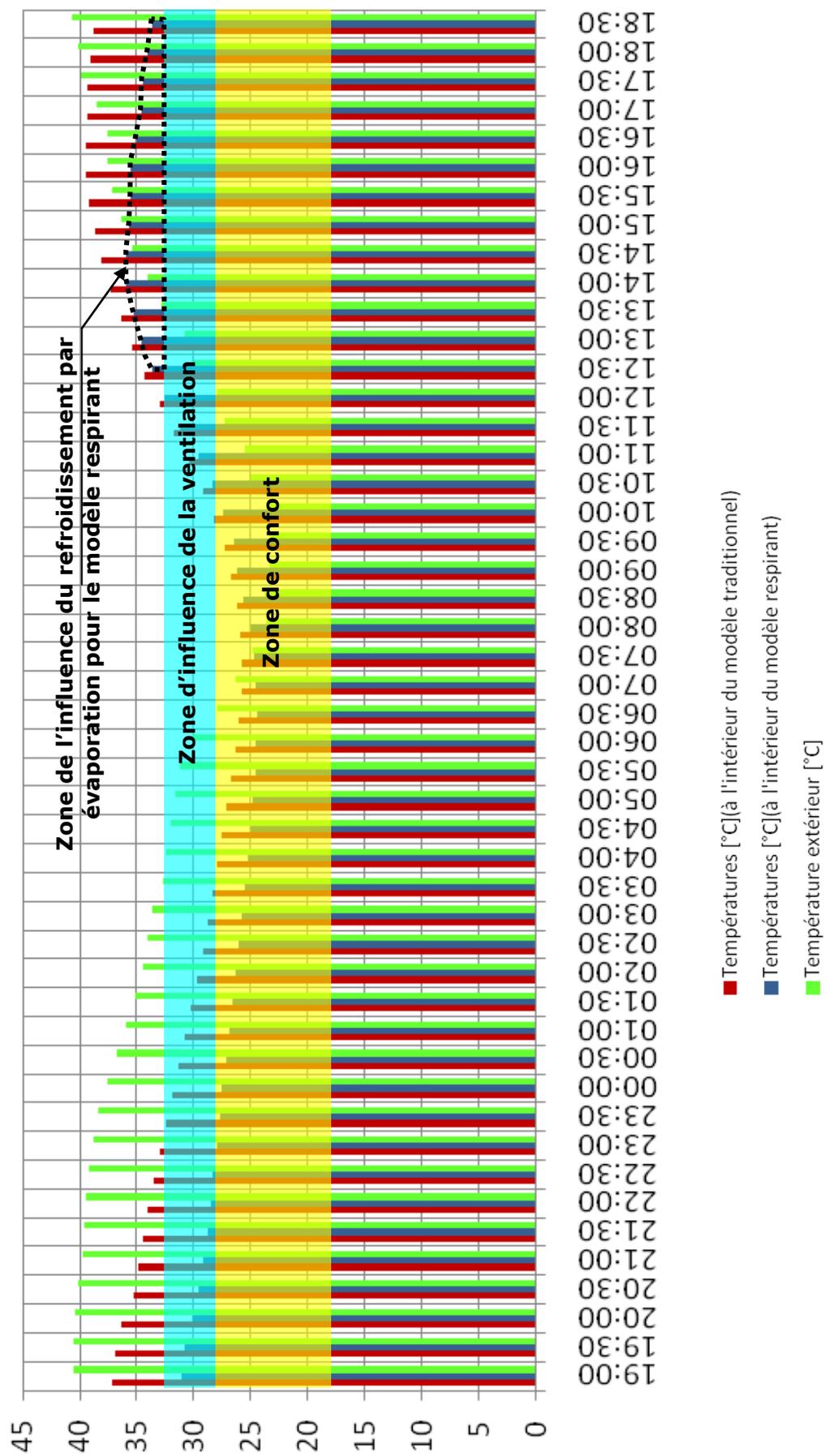


Figure 6.16 : Températures internes des deux modèles et les zones de confort

L'analyse des températures mesurées par le diagramme psychrométrique et la zone de confort (figures 6.15 & 6.16) montre que de 23h00 à 10h00 le lendemain (pendant 11 heures) les températures à l'intérieur du modèle respirant sont dans la zone de confort, tandis que ce même modèle, avec une vitesse de ventilation, peut créer un confort pour les usagers pendant 6 heures (de 19h00 à 23h00 et de 10h00 à 12h00).

De midi à 19h00 (7 heures), un système de refroidissement par évaporation peut assurer un confort thermique acceptable. Pendant ces heures, les taux d'humidité relative varient de 20% à 32,6%, ce qui donne une opportunité pour ce type de refroidissement. Selon le diagramme psychrométrique, nous pouvons assurer une température de confort (environ 28°C) pendant ces heures en utilisant une méthode d'humidification avec des taux d'humidité entre 45% et 55%, ce qui est possible en activant les arroseurs (figure 6.17).

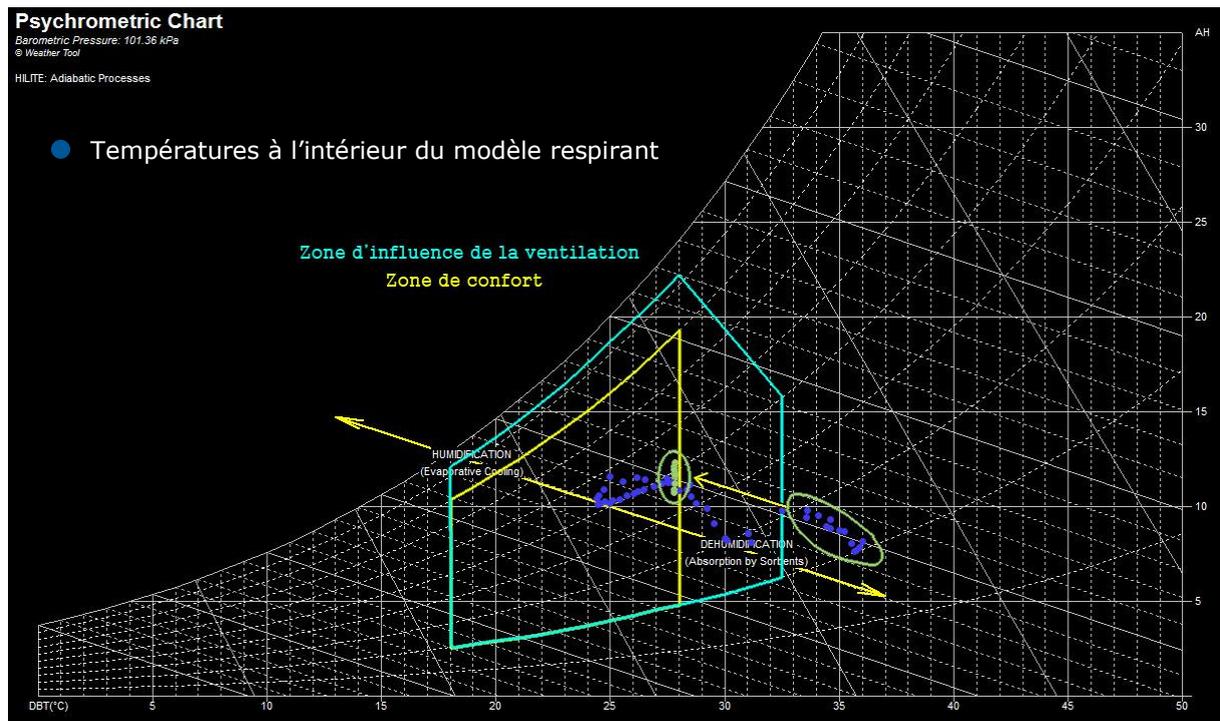
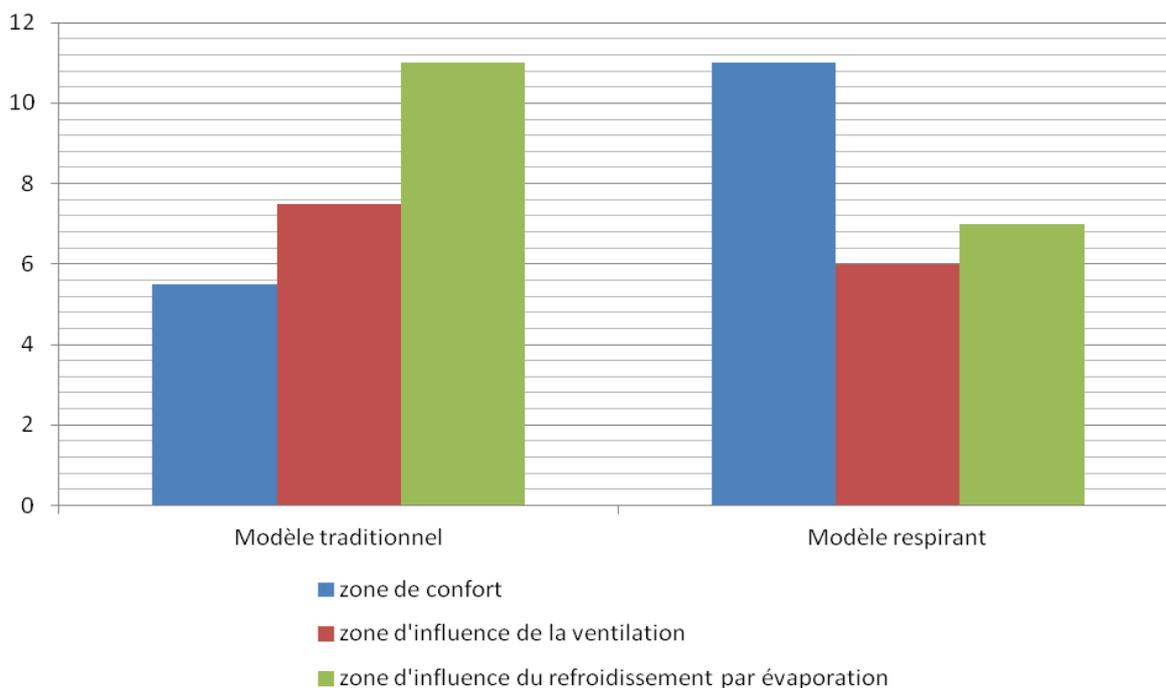


Figure 6.17: L'influence du refroidissement par évaporation sur les températures du modèle respirant



**Figure 6.18 :** Comparaison entre les heures de confort thermique assuré par le modèle respirant et le modèle traditionnel au cours de la journée de l'expérimentation

D'un autre côté, le modèle traditionnel assure des températures intérieures confortables de 4h00 à 9h30 (5 heures et demi par rapport aux 11heures pour le modèle respirant). Il a aussi besoin de créer une vitesse d'air pendant 7 heures et demi (de 23h00 à 4h00 et de 9h30 à 12h00), et de midi à 23h00 (11 heures) un système de refroidissement est nécessaire pour assurer un niveau de confort thermique pour les usagers. Le graphique 6.18 montre le bon comportement thermique du modèle respirant par rapport au modèle traditionnel. Les murs respirants ont réussi à diminuer les températures intérieures au cours de la journée entre 0,4°C et 6,3°C sans l'utilisation du refroidissement par évaporation qui est nécessaire pendant 6 heures pour assurer le confort thermique.

D'un côté, nous pouvons dire que le modèle respirant est capable d'assurer un niveau de confort (zone de confort ou sous l'influence de la ventilation qui se déroule naturellement à travers les murs et sous l'effet du vent, de cheminée ou bien sous un effet combinée) pour 17 heures pendant cette journée (70.8% de la journée), tandis que le même modèle a besoin d'activer le système de refroidissement par évaporation pour 29.2% afin d'assurer le niveau de confort souhaité. D'autre côté, le modèle traditionnel assure un niveau de confort pour 22.9% de la journée. Il a besoin d'activer un système de ventilation mécanique pour 31.3% de la journée, tandis qu'il faut chercher un système de refroidissement mécanique pour 45.8% de la journée d'expérimentation.

## 6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté des différents aspects concernant l'application du concept de mur respirant dans les bâtiments existants dans les régions chaudes telles que le Sinaï. Au niveau architectural, le mur respirant peut aider à résoudre le problème de surchauffe existant à l'intérieur des bâtiments contemporains en augmentant la valeur des bâtiments par l'utilisation des matériaux locaux acceptés culturellement par les usagers. La couche externe avec ses matériaux en textile, en peaux d'animaux ou en roseaux qui ont été utilisés dans les constructions traditionnelles de la région depuis longtemps sont acceptés sur le plan architectural. La logique thermique de ce concept inspiré de la nature est une formule mixte des procédés thermiques utilisés au cours de l'histoire architecturale de la région.

Au niveau de la ventilation naturelle, le mur respirant bénéficiait au maximum des phénomènes naturels pour déplacer l'air sans systèmes mécaniques. L'air se déplaçait naturellement par l'effet du vent ou l'effet de cheminée ou bien par la combinaison des deux. Le calcul a montré également que le volume qui peut-être capté est assez grand et suffisant pour ventiler l'espace intérieur et extraire la chaleur conservée dans les murs par ventilation nocturne par exemple.

L'utilisation de plusieurs méthodes de refroidissement telles que la protection contre le rayonnement solaire direct, le refroidissement par évaporation, la ventilation directe, ou indirecte et le géocooling, aide à améliorer le comportement thermique du bâtiment sous différentes conditions climatiques extérieures. La couche externe légère en textile est très appropriée au climat désertique où le vent charrie la plupart du temps des poussières. Cette couche ne fonctionne pas seulement comme une couche de protection solaire, mais aussi comme un filtre à air contre la poussière qui est un problème très connu lié à la ventilation naturelle dans les régions désertiques.

Au niveau du confort thermique, la simulation aérodynamique montrait une variation de la vitesse de l'air à l'intérieur du modèle testé. Cette variation crée une ambiance dynamique et aide à appliquer la notion contemporaine du confort. L'analyse des résultats obtenus de l'expérience in situ montrait une amélioration du comportement thermique du modèle respirant assez remarquable par rapport au modèle traditionnel avec une variation comprise entre 0,4°C et 6,3°C sans utilisation du refroidissement par évaporation.

L'application d'un tel concept du mur respirant qui est considéré comme une surface active changera la logique thermique appliquée aujourd'hui dans nos façades contemporaines. Cette méthode nouvelle intègre la notion d'inertie avec les constructions légères qui bénéficient de la ventilation naturelle. Ce système thermique existe dans la plupart des peaux naturelles trouvées dans la nature. Cette nouvelle approche du mur respirant changera le rôle traditionnel de la façade en la transformant en surface active ayant une fonction thermique semblable à celle de notre peau.

# Conclusion générale



---

Les références disponibles dans le domaine de la biomimétique sont, en général, rares et surtout celles qui traitent du domaine de l'architecture. Dans les deux dernières années, et malgré cette rareté, de nouveaux livres et articles sur ce sujet sont apparus concernant l'architecture et la biomimétique tels que « Biomimicry in architecture » par Michael Pawlyn qui a été publié en décembre 2011, « biomimétisme : Quand la nature inspire des innovations durable » publié en Mai 2011 qui est la version française du livre de Janine M. Benyus publié en anglais en 1998 et « Quand la nature inspire la science : Histoire des inventions humaines qui imitent les plantes et les animaux » publié en novembre 2011. En 2010, un comité français représentant l'association « Biomimicry Europe » a été créé à Paris en vue de promouvoir le biomimétisme en France. Toutes ces publications et activités francophones reflètent l'intérêt croissant des chercheurs et des scientifiques vers cette nouvelle approche. Elles donnent aussi une image optimiste et des perspectives dans ce domaine qui peuvent considérablement enrichir notre civilisation.

Comme cela a été expliqué dans le premier chapitre de cette thèse, les applications architecturales de cette approche vers la nature sont confinées depuis des milliers d'années dans la copie des formes « *Biomorphology/biomorphologie* ». Cette vision a commencé à changer en s'orientant vers l'imitation de systèmes naturels et biologiques « *biomimicry/biomimétique ou biomimétisme* ». Cette dernière est considérée comme une nouvelle porte scientifique qui peut nous conduire vers un nombre infini d'idées durables pouvant être utilisées afin de découvrir de nouvelles applications architecturales telles que les systèmes de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'énergie ou bien pour produire de l'eau.

La recherche actuelle est une tentative dans ce sens. Nous avons suivi cette approche biomimétique afin d'explorer de nouvelles applications pour surmonter le problème de la surchauffe dans les régions ayant des climats chauds telles que le Sinaï en Égypte qui a été choisi comme un site d'étude et où nous avons appliqué notre expérimentation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la problématique de la recherche d'un côté théorique et d'un côté pratique. Le côté théorique dévoile la notion de confort thermique et la ventilation naturelle. Le côté pratique présente les applications et les logiques thermiques déjà utilisées dans l'architecture locale de la région du Sinaï afin de fournir un niveau de confort thermique acceptable en bénéficiant de la ventilation naturelle.

L'analyse qui a été apporté sur les logiques thermiques utilisées dans l'architecture locale montre que l'architecture vernaculaire applique des stratégies proches de celles appliquées dans la nature. Les tentes et les constructions légères construites par les bédouins avec les peaux naturelles fonctionnent exactement comme des « surfaces thermiquement actives ». Au contraire, les bâtiments contemporains préfèrent une logique d'ignorance ou d'isolement thermique du milieu naturel en créant des espaces mécaniquement climatisés. Cette analyse a

montré le problème de la surchauffe dans les bâtiments contemporains conçus en briques et béton et a expliqué comment ce type de bâtiments a accentué le problème par l'utilisation intensive des climatiseurs qui perturbent les façades et consomment des grandes quantités d'énergie.

Des systèmes biologiques de refroidissement ont été présentés dans le troisième chapitre. L'analyse s'est portée sur des plantes et animaux vivants dans des régions chaudes afin de voir comment ils agissent contre le problème de la surchauffe en gardant une température appropriée pour eux. Cette analyse des systèmes naturels de refroidissement a montré une grande similitude entre ces solutions biomimétiques et les systèmes de refroidissements passifs architecturaux, mais elle souligne en même temps une grande différence entre le rôle thermique des peaux naturelles et le rôle thermique des façades traditionnelles. Alors que les peaux naturelles jouent un rôle majeur dans l'équilibre thermique du corps et fonctionnent comme une surface thermiquement active, les façades existantes dans les bâtiments d'aujourd'hui agissent comme des surfaces d'isolation entre deux ambiances thermiques. La peau naturelle a un rôle thermiquement positif. Elle est responsable, à travers toute sa surface, de la transmission de la chaleur du corps vers l'ambiance qui l'entoure. A contrario, les façades jouent un rôle thermiquement négatif, elles séparent l'extérieur et l'intérieur en cherchant à isoler du point de vue thermique ces deux espaces. Elles sont considérées comme des interfaces destinées à empêcher le contact thermique et le transfert de la chaleur à travers les murs.

Cette observation est un des éléments qui nous a encouragé, dans cette recherche, à proposer une nouvelle approche biomimétique destinée aux façades des bâtiments en zones chaudes. A partir de là nous pouvons changer notre perception du rôle traditionnel de la façade d'un rôle thermiquement négatif à un rôle positif et d'une surface d'isolation thermique à une surface thermiquement active et par conséquent son impact sur l'ambiance thermique produite.

Notre proposition est présentée dans le présent document sous le nom de « mur respirant ». Par ce concept, le mur peut respirer comme les animaux, transpirer comme les plantes et suer comme l'humain afin de bénéficier de la ventilation naturelle pour ventiler les espaces intérieurs en diminuant la température de l'air par évaporation. Ce concept du mur respirant étudié au cours de la recherche, est similaire à ce que nous avons trouvé avec l'architecture vernaculaire de la région utilisant la même logique thermique dans ses bâtiments. Les murs des tentes et des constructions en roseaux existantes et utilisées dans le Sinaï depuis longtemps peuvent être considérées comme des murs respirants. Ils sont considérés comme des surfaces thermiquement actives et leurs rôles thermiques ressemblent au rôle de la peau naturelle. C'est pourquoi le comportement thermique de ces constructions est meilleur que le comportement thermique des bâtiments contemporains en brique et béton.

---

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous avons proposé un modèle de « mur respirant » en visant la validation du concept par une expérimentation. Cette phase donne des résultats concrets sur l'impact de ce concept sur le confort thermique. Au début, une analyse climatique a été faite pour la région du Sinaï en évaluant l'appropriation de ce concept pour chaque zone climatique. L'analyse a montré l'adéquation totale du modèle proposé à la zone désertique au centre et à la zone côtière du sud où le climat est relativement chaud et sec, tandis qu'il n'est que partiellement approprié à la zone côtière du Nord où le climat est humide.

Sur la base de ces données climatiques et cette analyse, un modèle expérimental de mur respirant a été conçu et testé sur le terrain en le comparant avec un modèle ayant des murs pleins en brique et béton (les matériaux de construction qui sont utilisés couramment dans les projets contemporains dans cette région).

Les résultats de cette expérimentation ont été présentés dans le chapitre 5. Ils affirment l'amélioration des conditions du confort thermique à l'intérieur du modèle respirant proposé par la recherche. Les températures à l'intérieur du modèle respirant restent inférieures à celles à l'intérieur du modèle traditionnel, pendant deux jours, au cours de l'expérimentation qui a été réalisée durant le mois de juillet. Ce résultat montre la capacité des murs à se débarrasser de la chaleur interne par une ventilation à travers les enveloppes en utilisant des méthodes de refroidissement par évaporation ou geocooling. Cette enveloppe peut également améliorer les performances thermiques du modèle en contrôlant la fermeture ou l'ouverture des bouches d'air en fonction de la température d'air extérieur. Il est nécessaire de fermer les bouches d'air direct pendant les périodes chaudes de la journée en activant le système de ventilation indirect et les systèmes de refroidissement. Dans le cas d'une température élevée et d'humidité relative importante, il faut arrêter de ventiler les espaces intérieurs en permettant à l'air de passer à l'intérieur des murs et sortir par le haut sans perturber l'espace intérieur. Dans ce cas là, le refroidissement se déroule par radiation entre les murs et l'espace intérieur, puis c'est l'air qui passe à l'intérieur des murs qui est responsable de l'entraînement de la chaleur des murs vers l'extérieur. Ce type de transmission par radiation ressemble à la méthode utilisée par notre corps. La radiation est responsable de la transmission d'à peu près 50% de la chaleur interne, tandis que les autres moyens comme l'évaporation, la convection et la conduction sont responsable de 50% de ce processus.

L'expérience qui a été mise en œuvre dans le site a montré une amélioration du confort par diminution de la température intérieure du modèle respirant, mais elle n'assure pas une zone de confort thermique au cours de la journée entière. Ce résultat montre le besoin d'études complémentaires qui pourront être des perspectives de recherche à l'avenir en collaboration avec des spécialistes (thermiciciens). L'objectif de ces études sera d'étudier le comportement thermique du mur respirant en laboratoire en contrôlant tous les facteurs et les conditions d'expérimentation, ce qui aidera à comprendre le rôle de chaque couche du mur respirant et

son impact sur la performance globale du mur. C'est possible aussi de réaliser un bâtiment expérimental dans le Sinaï en suivant les conditions de confort thermique et la performance du mur au cours de l'année, ce qui nous aidera à améliorer la conception du mur avant de l'appliquer dans la réalité.

Le modèle respirant n'améliore pas seulement la température interne, mais il crée également une ambiance dynamique. Afin d'approuver cette hypothèse, une simulation numérique a été faite dans le dernier chapitre. Dans cette simulation aérodynamique, nous avons expérimenté le modèle respirant afin de simuler le mouvement d'air à l'intérieur du modèle. Cette simulation montre une variation dans la vitesse d'air à l'intérieur du modèle. Cette variation est le résultat des petites ouvertures « pores » distribuées sur les murs. Les sorties d'air contrôlées provoquent des jets d'air horizontaux et permettent de créer des flux d'air à différentes vitesses ce que nous pouvons appeler des « fontaines aériennes ». Ces fontaines aériennes réduisent la sensation perçue de la chaleur et enrichissent l'expérience thermique, ce qui contribue à améliorer donc les conditions du confort thermique surtout pendant les périodes humides.

Ces petites ouvertures ou bouches d'air ressemblent à des pores de la peau naturelle ou les pores microscopiques des plantes « stomates » qui contrôlent le taux d'évaporation. Plus la température est élevée, plus les stomates sont ouverts, ce qui provoque une évaporation plus importante et permet aux plantes de rester dans une ambiance plus fraîche qu'alentour. Par le concept du mur respirant et ses pores, nous pouvons considérer la porosité comme une nouvelle propriété pour la description thermique du mur en plus des propriétés traditionnelles telles que la résistance, la conductance thermique et l'inertie.

Nous pouvons souligner que l'utilisation des matériaux locaux de constructions comme les roseaux, les tissus et les peaux d'animaux dans la couche externe du mur respirant contribue à donner une dimension locale et une image culturelle appropriée et acceptée par les habitants de la région du Sinaï. Ces matériaux qui sont utilisés dans l'architecture vernaculaire locale donnent aussi une identité unique pour cette région.

En conclusion, nous pouvons dire que le concept respirant montre un succès préliminaire au niveau théorique et pratique, mais il demande d'autres recherches approfondies afin de mettre en œuvre le concept dans la réalité. Ces études approfondies doivent être faites en collaboration avec des thermiciens et des ingénieurs et peuvent être des perspectives de recherches pour l'avenir. Nous pouvons résumer les perspectives autour de ce sujet dans les points suivants :

---

## **An niveau de l'architecture biomimétique :**

Le concept du « mur respirant » qui a été décrit dans cette thèse est une proposition biomimétique, parmi d'autres qui peuvent être tirées de la nature, qui offre des solutions durables pour l'adaptation thermique au climat chaud. L'étude actuelle a choisi de limiter la recherche en expérimentant un seul exemple inspiré de la nature. Cette recherche n'est donc pas qu'une étape vers l'architecture biomimétique, mais c'est un point de ce vaste domaine qui peut être exploré dans des recherches futures. Cette recherche actuelle ouvre la porte pour de nouvelles recherches au niveau théorique sur la relation entre l'architecture bioclimatique et l'architecture biomimétique, et au niveau pratique sur les applications des idées biomimétiques dans la réalité afin de mesurer l'efficacité de ces nouveaux systèmes.

Des nombreuses idées biomimétiques peuvent être développées de la même manière que nous avons développée le concept du mur respirant. Les concepts théoriques inspirés de la nature et présentés dans le chapitre 3 peuvent être développés dans des recherches à l'avenir. Ces idées biomimétiques offrent d'autres solutions que le mur respirant pour surmonter le problème de surchauffe en assurant un niveau de confort thermique accepté.

## **Au niveau technique du mur respirant :**

Concernant le concept du mur respirant, les perspectives de la recherche seront autour la validation du concept, le développement du modèle et la mesure de l'efficacité du modèle développé. Afin d'atteindre cette objectif, il faut mesurer le rôle de chaque couche du mur et son impact sur l'ambiance thermique résultante. Cette phase nécessite des calculs thermiques en collaboration avec des ingénieurs, suivi par soit une simulation numérique, soit par des expériences en laboratoire avec un modèle réel en contrôlant les conditions climatiques et en enregistrant les performances thermiques du modèle. La simulation numérique ou l'expérimentation en laboratoire donneraient des résultats qui aideraient probablement à développer et améliorer le modèle. Elles aideraient aussi à générer un cahier des charges avec toutes les descriptions techniques, les dimensions, la surface des pores, les matériaux de constructions, les matériaux des tuyaux, les capteurs climatiques, les systèmes de refroidissement, la quantité d'eau demandée pour l'évaporation et le système de gestion. Ce cahier des charges devra être fait en collaboration avec des ingénieurs et des techniciens dans différents domaines. Ces expériences et le cahier des charges peuvent être des perspectives de recherche très importantes et essentielles avant de réaliser et d'appliquer le concept dans la réalité.



# Table des matières



<b>REMERCIEMENT</b>	7
<b>RÉSUMÉ</b>	9
<b>ABSTRACT</b>	11
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b>	13
<b>GLOSSAIRE</b>	15
<b>PRÉAMBULE</b>	19
<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION</b>	27
<b>1.1. Problématique</b>	28
<b>1.1.1. Sinaï : Le site d'étude</b>	28
<b>1.1.2. Le problème de l'inconfort thermique</b>	34
<b>1.1.3. Le biomimétique : la science qui imite la nature</b>	37
1.1.3.1. Définitions des termes (bionique et biomimétique)	37
1.1.3.2. Pourquoi la biomimétique maintenant?	38
1.1.3.3. La biomimétique comme une heuristique de recherche	38
<b>1.1.4. L'architecture et la biomimétique</b>	40
<b>1.1.5. La biomimétique et l'approche bioclimatique</b>	45
<b>1.2. Hypothèse</b>	53
<b>1.3. Périmètre et limites de l'étude</b>	54
<b>1.4. Méthodologie</b>	55
<b>1.5. Plan de recherche</b>	56
	61
<b>PARTIE I</b>	
<b>APPROCHE THEORIQUE</b>	
<b>CHAPITRE 2 : LE CONFORT THERMIQUE, LA VENTILATION NATURELLE ET LES LOGIQUES THERMIQUES UTILISEES DANS LES BÂTIMENTS EXISTANTS DANS LE SINAÏ</b>	61
<b>2.1 Le confort thermique : Définitions et théories</b>	63
<b>2.1.1 Approche du confort thermique pendant le XXème siècle : Les zones du confort thermique</b>	65
<b>2.1.2 Réaliser le confort thermique pendant le XX siècle</b>	70
<b>2.1.3 Vers une approche contemporaine du déséquilibre thermique</b>	71
2.1.3.1 Diversité de température : Paysage thermique ou « Gulf stream »	73
2.1.3.2 Diversité de résistance thermique	75

2.1.3.3	Diversité de taux d'humidité	76
2.1.3.4	Diversité de vitesse de l'air : Vent intérieur	77
<b>2.2</b>	<b>Ventilation naturelle et son rôle pour atteindre le confort thermique</b>	<b>79</b>
2.2.1	Impact de la ventilation sur la zone de confort thermique	79
2.2.2	Refroidissement de la structure par la ventilation	81
2.2.3	Mouvement de l'air	82
2.2.3.1	Effet du vent (ventilation transversale)	82
2.2.3.2	Effet de cheminée	84
2.2.3.3	Effet combiné du vent et de cheminée	85
<b>2.3</b>	<b>Culture architecturale et logiques thermiques utilisées dans le Sinaï.</b>	<b>86</b>
2.3.1	La logique de la masse thermique intégrant des dispositifs architecturaux de ventilation naturelle	87
2.3.2	La logique de constructions légères et la ventilation à travers les façades	93
2.3.3	La logique de l'ignorance	96
<b>2.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>101</b>
 <b>CHAPITRE 3 : LE BIOMIMETISME : UNE ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE QUI S'INSPIRE DE LA NATURE</b>		<b>103</b>
<b>3.1</b>	<b>Le Sinaï : adaptation biologique au climat chaud</b>	<b>104</b>
3.1.1	Adaptation des animaux au climat chaud	104
3.1.1.1	Éviter le gain de chaleur	104
3.1.1.2	Perdre la chaleur interne	107
3.1.2	Adaptation des plantes au climat chaud	111
3.1.2.1	Éviter le gain de chaleur	111
3.1.2.2	Perdre la chaleur interne	113
<b>3.2</b>	<b>Analyser les systèmes biologiques d'adaptation climatique aux climats chauds</b>	<b>114</b>
3.2.1	Concepts architecturaux s'inspirant de la nature	115
3.2.2	Similarité entre les systèmes de refroidissement biologiques et architecturaux	118
<b>3.3</b>	<b>La peau naturelle et son rôle dans le processus de thermorégulation</b>	<b>119</b>
3.3.1	Le rôle thermique de la peau de l'homme	122

<b>3.3.2 Principes des façades thermiquement actives ; peau au lieu de façade</b>	123
3.3.2.1 Une couche thermiquement active et multifonctionnelle	123
3.3.2.2 Participation de toute la surface des façades au processus de régulation thermique du bâtiment	125
3.3.2.3 La façade doit être connectée et contrôlée	126
<b>3.4 Un exemple biomimétique ; proposition du mur respirant</b>	128
3.4.1 Conception du modèle du mur respirant	131
3.4.2 Méthodes de refroidissement utilisées	134
<b>3.5 Conclusion</b>	135

## **PARTIE II**

### **APPROCHE PRATIQUE**

<b>CHAPITRE 4 : LA COMPATIBILITE DU CONCEPT DE MUR RESPIRANT AUX MICROCLIMATS DU SINAÏ</b>	139
<b>4.1 Sinaï et ses zones climatiques</b>	141
<b>4.2 Analyse des diagrammes bioclimatiques des différentes zones climatiques du Sinaï</b>	147
4.2.1 Zone côtière du Nord	150
4.2.2 Zone désertique au centre	165
4.2.3 Zone côtière du Sud	180
<b>4.3 Evaluation de la compatibilité du concept des murs respirants aux microclimats du Sinaï</b>	193
4.3.1 Ajustement des éléments du mur respirant au microclimat de la zone côtière du Nord.	195
4.3.2 Ajustement des éléments du mur respirant au climat de la zone désertique au centre.	196
4.3.3 Ajustement des éléments du mur respirant au climat de la zone côtière du Sud.	197
<b>4.4 Conclusion</b>	198

<b>CHAPITRE 5 : MESURER L'EFFICACITE DU MODELE REEL DES MURS RESPIRANTS</b>	199
<b>5.1 Protocole de l'expérimentation</b>	200
<b>5.2 Conception des modèles</b>	201
<b>5.3 Réalisation de l'expérimentation</b>	204
5.3.1 Le site choisi et l'orientation géographique des modèles	204
5.3.2 Matériaux de construction	206
5.3.3 La réalisation des modèles	207
5.3.4 Appareils de mesure et leurs emplacements	209
5.3.5 Différentes étapes de la mesure	211
5.3.6 Résultats prévus et des expérimentations complémentaires	211
<b>5.4 Résultats</b>	212
5.4.1 Première étape: le modèle traditionnel	212
5.4.2 Deuxième étape : le modèle respirant avec la fonction d'arroseur	214
5.4.3 Troisième phase : comparaison des deux modèles simultanément et sans utilisation d'arroseur	218
<b>5.5 Conclusion</b>	220
<b>CHAPITRE 6 : DISCUSSION SUR L'EXPERIMENTATION ET L'APPLICATION DU CONCEPT</b>	221
<b>6.1 Culture architecturale et logique thermique du mur respirant</b>	222
<b>6.2 Déplacement d'air et volume capté par le mur respirant</b>	226
6.2.1 Déplacement d'air - transversal et effet de cheminée	226
6.2.2 Débat d'air capté par le modèle respirant	231
6.2.2.1 Débat d'air capté par l'effet du vent	231
6.2.2.2 Débat d'air capté par l'effet de cheminée	232
<b>6.3 Question de variation de vitesse d'air</b>	234
<b>6.4 Question du confort thermique</b>	240
<b>6.5 Conclusion</b>	248
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	249
<b>TABLE DES MATIERES</b>	257
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b>	263
<b>TABLEAUX</b>	273
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	277

# Table des illustrations



---

## PRÉAMBULE

- Figure 1 :** La voiture biomimétique « Mercedes » et le poisson-coffre 20
- Figure 2 :** L'entreprise Speedo conçoit ainsi depuis 2004 des maillots inspirés des caractéristiques de la peau des requins. 20
- Figure 3 :** L'idée principale derrière le mouvement de l'architecture intelligente 22
- Figure 4 :** La grande façade en verre n'est pas appropriée aux zones chaudes et arides. 26

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

- Figure 1.1 :** Le site d'étude, Sinäi- Égypte, par rapport au monde. 28
- Figure 1.2 :** La péninsule du Sinäi, Égypte. 29
- Figure 1.3 :** Huit villes dans la région du Sinäi dont six sur la côte sud. 30
- Figure 1.4 :** Une image satellite montre la ville de Charm El-Cheikh et sa forme linéaire le long de la côte du golfe d'Aqaba. 32
- Figure 1.5 :** Vue de l'avion sur la ville de Charm El-Cheikh montre la forme urbaine horizontale (deux étages maximum), Charm El-Cheikh, Sinäi. 32
- Figure 1.6 :** Des bâtiments mitoyens formant des regroupements orientés vers la mer, « Mövenpick Hotel », « Gafy Resort » et « Al-Bostan Park », Charm El-Cheikh, Sinäi. 33
- Figure 1.7 :** La forme des bâtiments détachés, « Ghazala Beach », Charm El-Cheikh, Sinäi. 33
- Figure 1.8 :** Les bâtiments détachés et dispersés augmentent les apports solaires par les grandes surfaces de façades exposées au soleil, le village touristique de Basata, 30 km de Taba, Sinäi. 34
- Figure 1.9 :** Une forme urbaine courante, mais pas bioclimatique. 34
- Figure 1.10 :** La forme urbaine basse et dispersée nous donne une grande opportunité pour bénéficier du vent qui circule librement entre les bâtiments, village touristique d'holidayin, Nabaq-Bay, Sinäi. 35
- Figure 1.11 :** Les dessins et Les gravures pharaoniques sur les murs de bâtiments anciens égyptiens sont des exemples pour la première application biomimétique dans le domaine de l'architecture. 40
- Figure 1.12 :** Les différents types des colonnes phréniques 40
- Figure 1.13 :** L'homme vitruvien de Léonard de Vinci. 41
- Figure 1.14:** (à gauche) Annie Paxton démontrant la solidité d'une feuille de nénuphar *Victoria amazonica*, et (à droite) la serre de Barry « maison de Lily » à Strasbourg dont l'armature est inspirée de la feuille de nénuphar *Victoria amazonica* 42
- Figure 1.15:** Robert Le Ricolais devant ses structures architecturales inspirées des radiolaires 42
- Figure 1.16:** Le stade olympique de Munich conçu par Frei Otto qui inspire la structure de la toile d'araignée. 43
- Figure 1.17:** Le siège de S.C. Johnson & Fils Inc et ses colonnes qui s'inspirent sa forme de la forme de champignon. 43

<b>Figure 1.18:</b> La structure du nouveau stade olympique de Pékin qui ressemble le nid d'oiseau et qui laisse entrer la lumière, tout en filtrant le froid et le vent.	43
<b>Figure 1.19 :</b> Le bâtiment d'Eastgate à Zimbabwe	45
<b>Figure 1.20 :</b> Une termitière et le schéma de la régulation de la température d'une termitière	46
<b>Figure 1.21 :</b> La forme inhabituelle de parasol de l'Eastgate centre.	47
<b>Figure 1.22:</b> Le système de ventilation et de refroidissement le bâtiment d'Eastgate au Zimbabwe	48
<b>Figure 1.23:</b> La structure intérieure des termitières en montrant les conduits de ventilation au cours de l'expérimentation de Turner et Soar	49
<b>Figure 1.24:</b> La maison de plantes alpins à Kew Gardens, conçu par Wilkinson Eyre et Patrick Bellew.	50
<b>Figure 1.25:</b> Le projet proposé par Jerry Tate Architectes pour le concours d'IHUB, dont un système de refroidissement basé sur le concept de transpiration sur la façade sud.	51
<b>Figure 1.26:</b> Un toit biomimétique proposé par Salmann Craig qui reflète les rayonnements solaire pendant le jour et perd la chaleur pendant la nuit	52

## **CHAPITRE 2 : LE CONFORT THERMIQUE, LA VENTILATION NATURELLE ET LES LOGIQUES THERMIQUES UTILISEES DANS LES BÂTIMENTS EXISTANTS DANS LE SINAÏ**

<b>Figure 2.1:</b> Zone de confort introduit par Olgyay [Izard et Guyot, 1979, p.10].	67
<b>Figure 2.2:</b> Le concept d'échange thermique de Givoni [Izard et Guyot, 1979, p.12].	67
<b>Figure 2.3:</b> Le diagramme psychométrique de Givoni avec ses limites de confort	68
<b>Figure 2.4:</b> Zone de confort introduit par Vogt & Miller-Chagas	69
<b>Figure 2.5:</b> Zone de confort selon les méthodes d'Olgyay, de Givoni et de Vogt-Miller.	69
<b>Figure 2.6:</b> L'approche moderne du confort thermique est de créer des espaces homogènes, chaque espace à une température fixe.	72
<b>Figure 2.7:</b> L'espace intérieur devient une sorte de bain d'air chaud autour de notre corps, contre notre corps et à l'intérieur du corps à chaque respiration.	72
<b>Figure 2.8:</b> Le concept de Gulf Stream	73
<b>Figure 2.9:</b> Concevoir l'espace comme une atmosphère globale, un déséquilibre de l'invisible, et un paysage thermique au lieu de la zone de confort Stream	74
<b>Figure 2.10:</b> La source chaude à 22°C, la maison et atelier de Dominique Gonzalez-Foerster, conçu par Philippe Rahm	74
<b>Figure 2.11:</b> Différentes couches d'isolation thermique créent des espaces avec une diversité des températures	75
<b>Figure 2.12:</b> Diversité de taux d'humidité, IBA, Hambourg, Allemagne	76
<b>Figure 2.13:</b> Un système de ventilation double flux en créant de variation de vitesse d'air dans une salle de sports, Slovénie en 2009	77

<b>Figure 2.14:</b> <i>Zone d'influence de la ventilation sur la sensation de confort thermique</i>	81
<b>Figure 2.15:</b> <i>L'effet du vent (Ventilation transversale)</i>	82
<b>Figure 2.16:</b> <i>Effet combiné du vent et des forces thermiques</i>	85
<b>Figure 2.17 :</b> <i>Le monastère de Sainte Catherine, Sinäi.</i>	87
<b>Figure 2.18 :</b> <i>Les constructions en pierre et la logique de masse thermique au monastère de Sainte Catherine, Sinäi.</i>	87
<b>Figure 2.19 :</b> <i>Des murs ayant des masses thermiques importantes, Village touristique de « City Sharm », Charm El Cheikh, Sinäi.</i>	88
<b>Figure 2.20 :</b> <i>La logique de la masse thermique qui a été utilisée en utilisant de la pierre de granit avec des briques en terre cuite dans les bâtiments du village touristique de « Basata », Taba route de Nuweiba, Sinäi.</i>	88
<b>Figure 2.21 :</b> <i>Les emplacements des appareils de mesure au village touristique de« Basata », Taba, Sinäi.</i>	89
<b>Figure 2.22 :</b> <i>Les températures mesurées à l'intérieur et à l'extérieur d'une villa ayant masse thermique importante, le village touristique de « Basata », Taba, Sinäi.</i>	89
<b>Figure 2.23 :</b> <i>Coupe de principe du capteur de vent traditionnel</i>	90
<b>Figure 2.24 :</b> <i>Coupe pour une maison traditionnelle au Caire montre le mouvement de l'air par l'effet combiné du vent et de cheminée.</i>	91
<b>Figure 2.25:</b> <i>L'extrusion du Moucharabieh qui permet à l'air de trois côtés d'entrer</i>	92
<b>Figure 2.26:</b> <i>Des petites ouvertures en bas et des ouvertures plus grandes en hauts pour faciliter la circulation d'air</i>	93
<b>Figure 2.27:</b> <i>Des bungalows en roseaux, Taba route de Nuweiba, Sinäi.</i>	94
<b>Figure 2.28:</b> <i>La construction en roseaux pendant l'exécution, le village touristique de « Basata », Taba route de Nuweiba, Sinäi</i>	94
<b>Figure 2.29:</b> <i>La logique thermique des bungalows en roseaux.</i>	94
<b>Figures 2.30 :</b> <i>Les tentes, les habitats traditionnels bioclimatiques appropriés au climat du Sinäi.</i>	95
<b>Figure 2.31 :</b> <i>La logique thermique de la tente traditionnelle des bédouins.</i>	95
<b>Figure 2.32 :</b> <i>Constructions en béton armé et en briques rouges qui favorisent l'ignorance des conditions climatiques- projets touristiques en constructions à Charm El-Cheikh à gauche et à Nuweiba à droite.</i>	96
<b>Figure 2.33 :</b> <i>Coupe dans un bâtiment montre les murs et le toit à faible épaisseur, Charm El-Cheikh, Sinäi.</i>	96
<b>Figure 2.34 :</b> <i>Plan RDC, exemple d'un bâtiment en béton armé et murs en briques à Charm El-Cheikh, Sinäi.</i>	97
<b>Figure 2.35 :</b> <i>Des façades faussées en raison de l'utilisation intense des unités d'air conditionné, un bâtiment résidentiel à gauche et l'hôtel d'Oriental Rivoli à droite, Charm El-Cheikh, Sinäi.</i>	98

## CHAPITRE 3 : LA BIOMIMETIQUE ; UNE APPROCHE BIOCLIMATIQUE QUI S'INSPIRE DE LA NATURE

<b>Figure 3.1:</b> La peau poilue (Renards et chameaux) fonctionne comme une couche d'isolation thermique contre la chaleur externe.	105
<b>Figure 3.2:</b> La peau poilue augmente l'isolation thermique en permettant le perdre de chaleur par ventilation.	105
<b>Figure 3.3:</b> Dans les conditions chaudes, les poils restent à plat en créant des poches d'air immobile. Ces poils avec les poches d'air forment une couche d'isolation thermique plus efficace.	105
<b>Figure 3.4:</b> La couleur claire et pâle des animaux qui vivent dans les régions chaudes.	106
<b>Figure 3.5:</b> Des animaux restent aux caves fraîches ou se déplacent rapidement pour éviter le gain de chaleur	106
<b>Figure 3.6:</b> Le renard des sables et le fennec ont des grandes oreilles qui fonctionnent comme des radiateurs de chaleur.	107
<b>Figure 3.7:</b> L'éléphant régule sa température corporelle grâce à une vascularisation très importante existante dans ses grandes oreilles et le mouvement régulier de ces oreilles qui incite le processus d'évaporation.	108
<b>Figure 3.8:</b> La sudation comme une façon de refroidissement par évaporation pour certains animaux.	108
<b>Figure 3.9:</b> Les chiens halètent pour refroidir leurs langues et réguler leurs températures corporelles.	109
<b>Figure 3.10:</b> Un oiseau Caprimulgiforme ouvre son bec et fait vibrer son sac gulaire humide pour refroidir son corps.	109
<b>Figure 3.11:</b> Les fourmis utilisent aussi un système de vibration pour accélérer le processus d'évaporation.	110
<b>Figure 3.12:</b> Petites feuilles de <i>Faidherbia albiada</i> , <i>Balanties aegyptiaca</i> et <i>Acacia ehrenbergiana</i> , Vallée d'Allaqi, Sinaï.	111
<b>Figure 3.13:</b> Des feuilletts couverts par des matériaux cireux formant une couche d'isolation thermique.	112
<b>Figure 3.14:</b> Feuilles de plantes de la côte Est du Sinaï. Elles stockent l'eau en créant d'une couche d'isolation thermique.	112
<b>Figure 3.15:</b> Mangrove, Sud du Sinaï.	113
<b>Figure 3.16:</b> Le processus de transpiration.	113
<b>Figure 3.17:</b> La similarité des exemples de refroidissement entre les systèmes biologiques et architecturaux.	118
<b>Figure 3.18:</b> Les températures du corps humain.	119
<b>Figure 3.19:</b> Transfert de chaleur dans le corps humain [Moe, 2010, p.69]	120
<b>Figure 3.20:</b> La peau de l'homme comprend trois couches principales : l'épiderme, le derme, l'hypoderme. [Wigginton, 2002, p.23].	121
<b>Figure 3.21:</b> Mur multifonctionnel qui bénéficie de la nature	124

<b>Figure 3.22:</b> Afin d'imiter la fonction thermique de la peau, le mur doit fonctionner comme une surface d'adaptation thermique au lieu d'une surface d'isolation thermique.	125
<b>Figure 3.23:</b> Afin d'imiter la fonction thermique de la peau, la façade doit réguler la température par toute sa surface au lieu de consacrer cette fonction à certaines ouvertures.	126
<b>Figure 3.24:</b> Exemple de mur respirant d'une maison à ossature en bois [Acqualys, 2011].	128
<b>Figure 3.25:</b> Hassan Fathy, architecte égyptien, a utilisé le terme de mur respirant dans son livre et l'a introduit dans ses travaux par l'utilisation des matériaux naturels absorbant l'humidité et permettant de faire passer le flux d'air afin de refroidir les espaces intérieurs.	129
<b>Figure 3.26:</b> Des constructions respirantes construites par les bédouins.	129
<b>Figure 3.27:</b> Les costumes traditionnels ne semblent pas adaptés au climat chaud, mais ils agissent comme des couches respirantes [Siliotti, 2000, p.40].	130
<b>Figure 3.28:</b> Conception du mur respirant « coupe de principe ».	131
<b>Figure 3.29:</b> Couche externe visant à minimiser le gain de chaleur en permettant au flux d'air de passer	132
<b>Figure 3.30:</b> Couche moyenne se compose d'un système de refroidissement par évaporation, d'une couche d'isolation thermique, des entrées d'air distribué en toute la surface.	132
<b>Figure 3.31:</b> En plus du refroidissement par geocooling, cette couche peut avoir des entrées d'air directes avec des valves de contrôle du flux d'air.	133
<b>Figure 3.32:</b> Couche interne :less sorties contrôlées pour distribuer l'air dans l'espace bâti.	133

## CHAPITRE 4 : LA COMPATIBILITE DU CONCEPT DE MUR RESPIRANT AUX MICROCLIMATS DU SINAI

<b>Figure 4.1:</b> Les régions climatiques autour du monde.	140
<b>Figure 4.2:</b> La région du Sinai	141
<b>Figure 4.3:</b> Zones climatiques du Sinai	142
<b>Figure 4.4:</b> Profil de la température opérative moyenne pour les quatre zones climatiques du Sinai	143
<b>Figure 4.5:</b> La ville de Sainte Catherine représentant le climat de la zone des hauts plateaux.	144
<b>Figure 4.6:</b> Les températures maximum et minimum au cours d'une année dans la zone des hauts plateaux.	145
<b>Figure 4.7:</b> Diagramme bioclimatique de la zone des hauts plateaux [Ayman, 2011, 617]	146
<b>Figure 4.8:</b> La ville d'Al-Arish, la zone de côtière Nord du Sinai.	150
<b>Figure 4.9:</b> Le pourcentage de l'humidité relative par rapport au temps dans la région côtière du Nord.	153
<b>Figure 4.10:</b> Les vitesses du vent dans la région côtière du Nord.	154
<b>Figure 4.11:</b> La rose des vents dans la région côtière du Nord.	155
<b>Figure 4.12:</b> L'énergie solaire reçue par 1m <sup>2</sup> verticale dans la zone côtière du Nord.	157
<b>Figure 4.13:</b> Le diagramme psychrométrique de la zone côtière du Nord du Sinai (pendant l'été).	159

<i>Figure 4.14: Stratégies de refroidissement appropriées à la zone côtière du Nord dans le Sinaï.</i>	160
<i>Figure 4.15: La zone de confort en bénéficiant de la ventilation naturelle (la zone côtière du Nord).</i>	161
<i>Figure 4.16: Le pourcentage du confort en utilisant les techniques utilisées par rapport à la zone côtière du Nord.</i>	162
<i>Figure 4.17: L'évaluation des systèmes de refroidissement par rapport à la zone côtière du Nord.</i>	163
<i>Figure 4.18: Moyennes mensuels des températures du sol aux niveaux -0,5m, -2,0m et -4,0m.</i>	164
<i>Figure 4.19: Isamillia (à l'Ouest), Nekhel (au centre) et Taba (à l'Est), les trois villes représentant le climat de la zone centrale du Sinaï.</i>	165
<i>Figure 4.20: Températures moyennes mensuelles à Taba, Sinaï.</i>	168
<i>Figure 4.21: Le pourcentage de l'humidité relative par rapport au temps dans la ville de Taba.</i>	169
<i>Figure 4.22: La vitesse du vent dans la région désertique au centre du Sinaï.</i>	170
<i>Figure 4.23: La rose des vents à la ville de Taba.</i>	171
<i>Figure 4.24: L'énergie solaire reçue par 1m<sup>2</sup> verticale.</i>	173
<i>Figure 4.25: Le diagramme psychrométrique de la zone désertique au centre du Sinaï.</i>	174
<i>Figure 4.26: Stratégies de refroidissement appropriées à la zone désertique au centre du Sinaï.</i>	175
<i>Figure 4.27: La zone de confort en bénéficiant de la ventilation naturelle et un refroidissement par évaporation directe et indirecte (la zone désertique au centre du Sinaï).</i>	176
<i>Figure 4.28: Le pourcentage du confort en utilisant les techniques de refroidissement par évaporation et en utilisation la ventilation naturelle dans la zone désertique au centre du Sinaï.</i>	177
<i>Figure 4.29: Le pourcentage du confort en utilisant les techniques de refroidissement par évaporation, la ventilation naturelle et inertie avec un refroidissement nocturne dans la zone désertique au centre.</i>	178
<i>Figure 4.30: Évaluation des systèmes de refroidissement dans la zone désertique au centre du Sinaï.</i>	179
<i>Figure 4.31: La ville de Charm El-Cheikh, la zone côtière du Sud.</i>	180
<i>Figure 4.32: La gamme des températures à Charm El-Cheikh.</i>	182
<i>Figure 4.33: Le pourcentage de l'humidité relative par rapport au temps dans la région côtière du Sud.</i>	183
<i>Figure 4.34: La vitesse du vent dans la région côtière du Sud.</i>	184
<i>Figure 4.35: La rose des vents à Sharm El-Sheikh.</i>	185
<i>Figure 4.36: L'énergie solaire reçue par 1m<sup>2</sup> verticale à Charm El-Cheikh.</i>	187
<i>Figure 4.37: Le diagramme psychrométrique de la zone côtière du sud (pendant l'été).</i>	188
<i>Figure 4.38: Stratégies de refroidissement appropriées à la zone côtière du Sud.</i>	189
<i>Figure 4.39: Le pourcentage du confort en utilisant les techniques de refroidissement par évaporation et ventilation naturelle dans la zone côtière du sud.</i>	190

<b>Figure 4.40:</b> Le pourcentage du confort en utilisant les techniques de refroidissement par évaporation, la ventilation naturelle et l'inertie avec un refroidissement nocturne dans la zone côtière du sud.	190
<b>Figure 4.41:</b> Évaluation des systèmes de refroidissement dans la zone côtière du Sud.	191
<b>Figure 4.42:</b> Moyennes mensuels des températures du sol aux niveaux -0,5m, -2,0m et -4,0m à Charm El-Cheikh.	192
<b>Figure 4.43:</b> Version du mur respirant appropriée à la zone côtière du Nord.	195
<b>Figure 4.44:</b> Version complète du mur respirant appropriée à la zone désertique au centre.	196
<b>Figure 4.45:</b> Version du mur respirant appropriée à la zone côtière du Sud.	197

## CHAPITRE 5 : MESURER L'EFFICACITE DU MODELE REEL DES MURS RESPIRANTS

<b>Figure 5.1 :</b> La conception du modèle traditionnel	202
<b>Figure 5.2:</b> La conception du modèle respirant	203
<b>Figure 5.3 :</b> Dans l'expérimentation in-situ, deux systèmes de ventilation (directe et indirecte) ont été appliqués	204
<b>Figure 5.4 :</b> Le site où l'expérimentation s'est déroulée	205
<b>Figure 5.5:</b> L'orientation des modèles	205
<b>Figure 5.6:</b> Briques rouges, béton armé et tuyaux en plastique sont les matériaux de construction utilisés	206
<b>Figure 5.7:</b> Le premier modèle (le modèle solide) pendant l'exécution – phases de construction	207
<b>Figure 5.8 :</b> Le deuxième modèle (le modèle respirant) pendant l'exécution – phases de construction	208
<b>Figure 5.9 :</b> L'appareil de mesure (Testo 175-H2) qui a été utilisé pendant l'expérimentation pour mesurer les températures et les taux d'humidité relative.	209
<b>Figure 5.10 :</b> L'appareil de mesure (Multifonctions LM/F1 20) qui a été utilisé pendant l'expérimentation pour mesurer les vitesses du vent.	209
<b>Figure 5.11:</b> Les emplacements des appareils de mesure (en rouge)	210
<b>Figure 5.12:</b> Les Températures mesurées pendant la première phase de l'expérimentation	212
<b>Figure 5.13:</b> Les taux d'humidités relatives mesurées pendant la première phase de l'expérimentation	214
<b>Figure 5.14:</b> Les Températures mesurées pendant la deuxième phase de l'expérimentation	216
<b>Figure 5.15:</b> Les taux d'humidités relatives mesurées pendant la deuxième phase de l'expérimentation	217
<b>Figure 5.16 :</b> Les Températures mesurées pendant la troisième phase de l'expérimentation	219
<b>Figure 5.17:</b> Les taux d'humidités relatives mesurées pendant la troisième phase de l'expérimentation	220

## CHAPITRE 6 : DISCUSSION SUR L'EXPERIMENTATION ET L'APPLICATION DU CONCEPT

<b>Figure 6.1:</b> La perspective imaginaire d'un bâtiment hôtelier utilisant une couche externe en roseaux au lieu de la façade dénaturée par des systèmes de climatisation.	224
<b>Figure 6.2:</b> La perspective imaginaire d'une maison utilisant une couche externe en roseaux fréquente dans les constructions touristiques entre la ville de Taba et la ville de Dahab, la région Sud-Est du Sinai.	225
<b>Figure 6.3:</b> Fonctionnement du système de murs respirants en utilisant l'effet du vent pour ventiler l'espace.	226
<b>Figure 6.4:</b> La rose des vents à Ismaïlia montre le vent et ses pourcentages au cours de l'année.	227
<b>Figure 6.5:</b> Fonctionnement du système de murs respirants en utilisant l'effet de cheminée pour refroidir les murs sans ventiler l'espace intérieur.	229
<b>Figure 6.6:</b> Fonctionnement du système de murs respirants en utilisant l'effet de cheminée pour ventiler l'espace intérieur.	230
<b>Figure 6.7:</b> Fonctionnement du système de murs respirants en utilisant un effet combiné de vent et d'effet de cheminée pour refroidir les murs et ventiler l'espace.	230
<b>Figure 6.8:</b> Le contrôle de la quantité et la vitesse d'air crée un paysage dans l'invisible.	234
<b>Figure 6.9 :</b> L'interface du logiciel d'« Autodesk - Vasari 2,5 » qui a été utilisé pour la simulation aérodynamique du modèle respirant.	235
<b>Figure 6.10 :</b> La simulation aérodynamique du mouvement d'air du modèle respirant sur un plan horizontal.	236
<b>Figure 6.11 :</b> Variation dans les l'invisible : variation des vitesses d'air à l'intérieur du modèle respirant	237
<b>Figure 6.12:</b> La simulation aérodynamique du mouvement d'air du modèle respirant sur un plan vertical.	238
<b>Figure 6.13:</b> Zone de confort selon les méthodes d'Olgay, de Givoni et de Vogt-Miller.	240
<b>Figure 6.14 :</b> Températures mesurées pendant la troisième phase de l'expérimentation	242
<b>Figure 6.15 :</b> Les températures internes mesurées à l'intérieur du modèle respirant (blue) et à l'intérieur du modèle traditionnel (rouge) par rapport de la zone de confort	244
<b>Figure 6.16 :</b> Températures internes des deux modèles et les zones de confort	245
<b>Figure 6.17:</b> L'influence du refroidissement par évaporation sur les températures du modèle respirant	246
<b>Figure 6.18 :</b> Comparaison entre les heures de confort thermique assuré par le modèle respirant et le modèle traditionnel au cours de la journée de l'expérimentation	247

# Tableaux



---

# PRÉAMBULE

<i>Tableau 1 : évaluation des bâtiments « smart »</i>	25
---	----

## CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

<i>Tableau 1.1 : Estimation du nombre de chambres touristiques dans le Sinaï du Sud</i>	31
---	----

## CHAPITRE 2 : LE CONFORT THERMIQUE, LA VENTILATION NATURELLE ET LES LOGIQUES THERMIQUES UTILISEES DANS LES BÂTIMENTS EXISTANTS DANS LE SINAÏ

<i>Tableau 2.1 : Recommandations donnés par la norme ISO 7730 pour les limites du confort thermique</i>	70
---	----

<i>Tableau 2.2 : Type de projets et bâtiments de référence</i>	99
--	----

## CHAPITRE 3 : LA BIOMIMETIQUE ; UNE APPROCHE BIOCLIMATIQUE QUI S'INSPIRE DE LA NATURE

<i>Table 3.1 : Concepts architecturaux inspirés par les méthodes d'adaptation climatique de la flore et la faune du Sinaï</i>	116
---	-----

## CHAPITRE 4 : LA COMPATIBILITE DU CONCEPT DE MUR RESPIRANT AUX MICROCLIMATS DU SINAÏ

<i>Tableau 4.1: Données climatiques des quatre zones différentes du Sinaï (température ambiante, température opérative, rayonnement global, humidité relative) [Ayman, 2011, 609]</i>	143
---	-----

<i>Tableau 4.2: Les moyennes et les extrémités mensuelles de la température et de l'humidité relative dans la zone des hauts plateaux.</i>	144
--	-----

<i>Tableau 4.3: les moyennes et les extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent dans la zone côtière du Nord dans le Sinaï</i>	150
--	-----

<i>Tableau 4.4: les données climatiques de la zone côtière du Nord dans le Sinaï.</i>	151
---	-----

<i>Tableau 4.5: Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville de Taba dans la zone désertique</i>	165
---	-----

<i>Tableau 4.6: Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville d'Ismaïlia dans la zone désertique au centre</i>	166
--	-----

<i>Tableau 4.7: Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville de Nekhel dans la zone désertique au centre</i>	166
---	-----

<i>Tableau 4.8: Des données climatiques de la ville de Taba dans la zone désertique</i>	167
---	-----

<i>Tableau 4.9: Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville de Charm El-Cheikh dans la zone côtière du Sud</i>	180
--	-----

<i>Tableau 4.10: Des moyennes et des extrémités mensuelles de la température, de l'humidité relative et la vitesse du vent pour la ville de Charm El-Cheikh dans la zone côtière du Sud</i>	181
---	-----

<b>Tableau 4.11:</b> les pourcentages des besoins (par rapport aux temps) de chaque stratégie de refroidissement pour chaque zone climatique du Sinaï	193
<b>Tableau 4.12:</b> Compatibilité des fonctions du mur respirant aux zones climatiques du Sinaï	194
<b>Tableau 4.13:</b> les pourcentages des besoins (par rapport au temps) de chaque stratégie de refroidissement pour la zone côtière du Nord dans le Sinaï.	195
<b>Tableau 4.14:</b> les pourcentages des besoins (par rapport au temps) de chaque stratégie de refroidissement pour la zone désertique au centre dans le Sinaï.	196
<b>Tableau 4.15:</b> les pourcentages des besoins (par rapport au temps) de chaque stratégie de refroidissement pour la zone côtière du Sud dans le Sinaï.	197

## **CHAPITRE 5 : MESURER L'EFFICACITE DU MODELE REEL DES MURS RESPIRANTS**

<b>Tableau 5.1:</b> Protocole de l'expérimentation	200
<b>Tableau 5.2 :</b> Les températures et les taux d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du modèle traditionnel au cours d'une journée (première phase)	212
<b>Tableau 5.3 :</b> Les températures et les taux d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du modèle respirant au cours d'une journée (deuxième phase)	215
<b>Tableau 5.4 :</b> Les températures et les taux d'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur des 2 modèles au cours d'une journée (Troisième phase)	218

## **CHAPITRE 6 : DISCUSSION SUR L'EXPERIMENTATION ET L'APPLICATION DU CONCEPT**

<b>Tableau 6.1 :</b> Directions du vent et ses pourcentages et les moyennes de vitesse annuelles, Ismaïlia, Égypte.	227
<b>Tableau 6.2 :</b> Les débits d'air captés sous l'effet du vent par chaque façade	232

# Bibliographie



---

## **OUVRAGES**

### **[Allard, 1998]**

Allard, Francis ; Santamouris, Mat (eds.). 1998. *Natural ventilation in buildings-A design handbook*. London: ED James & James. 356 pages.

### **[Allard et al., 1998]**

Allard, F. ; Blondeau, P.; Tiffonnet A.L. 1998. *Qualité de l'air intérieur : état des lieux et bibliographie*. La Rochelle: LEPTAB. 180 pages. (Plan urbanisme construction architecture).

### **[Alevantis et Xenaki, 1995]**

Alevantis, L.E. ; Xenaki-Petreas, M. 1995. *Indoor air quality in practice: Passive cooling of buildings*. Athens : Central institution for energy efficiency education. 209 pages.

### **[Arnheim, 1977]**

Arnheim, Rodolf. 1977. *The Dynamics of Architectural Form*. California: University of California. 296 pages.

### **[ASHRAE, 2009]**

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). Mark S. Owen (eds). 2009. *ASHRAE Handbook : Fundamentals*. Atlanta: Inch-Pound Edition. GA. USA.

### **[Axley, 2001]**

Axley, J. 2001. *Residential passive ventilation systems: evaluation and design-A Critical Evaluation of the Potential for Adapting European Systems for use in North America and Development of a General Design Method*. Ed: AIVC. Technical note 54. 158 pages.

### **[Batanouny, 2001]**

Batanouny, Kamal H. 2001. *Plants in the deserts of the Middle-East*. New York : Springer - Verlag Berlin Heildelberg. 205 pages. (Adaptations of desert organisms)

### **[Banham, 2011]**

Banham, Reyner. 2011. *L'architecture de l'environnement bien tempéré*. Orléans : HYX. 336 pages.

### **[Benyus, 1997]**

Benyus, Janine M. Morrow, William (ed.). 2002 [1997]. *Biomimicry: Innovations inspired by nature*. New York : HarperCollins Publishers Inc. 308 pages.

### **[Beysens et Mylymuk, 2005]**

Beysens, Daniel; Mylymuk, Iryna. 2005. *A la poursuite des fontaines aériennes, les incroyables aventures de français en Ukraine.*, Paris : Ed. book-e-book..155 pages. (Collection : Zététique).

### **[BSR/ASHRAE Standard 55P, 2003]**

BSR/ASHRAE Standard. 2003. Thermal environmental conditions for human occupancy [en ligne]. Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.. Url: [http://www.krueger-hvac.com/lit/pdf/therm\\_comf.pdf](http://www.krueger-hvac.com/lit/pdf/therm_comf.pdf)

### **[Cachola Schmal et Busenkell., 2011]**

Cachola Schmal, Peter; Busenkell, Michaela. *WOHA : architektur atmet breathing architecture*. München ; London ; New York : Prestel : Frankfurt am Main : Deutsches Architekturmuseum. 191 pages.

**[Charbonneau et al, 2004]**

Charbonneau, Jean-Yves. Schreiber, Luc; Douville, Serge; Lemaire, Jérôme (coll.). 2004. *Confort thermique à l'intérieur d'un établissement*. Québec : Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST). Url:[http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/C65728A6-9EE5-47F0-9066-45E9B16E594E/2961/dc\\_200\\_16183\\_3.pdf](http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/C65728A6-9EE5-47F0-9066-45E9B16E594E/2961/dc_200_16183_3.pdf).

**[Clement et al., 2006]**

Clement, Gilles; Rahm, Philippe; Borasi, Giovanna. 2007 [2006]. *Environ(ne)ment: Approaches for Tomorrow*. Canada. Skira; Bilingual edition-CCA. 160 pages.

**[Courgey et Oliva, 2006]**

Courgey, Samuel ; Oliva, Jean-Pierre. 2006. *La conception bioclimatique*. Mens : Terre vivante. 239 pages.

**[Costa, 1995]**

Costa, Giovanni. 1995. *Behavioral adaptations of desert animals*. New York : Springer - Verlag Berlin Heidelberg. 198 pages. (Adaptations of desert organisms).

**[Dreyfus, 1960]**

Dreyfus, Jacques. 1960. *Le confort dans l'habitat en pays tropical: la protection des constructions contre la chaleur; problèmes de ventilation*. Paris: Eyrolles. 363 pages.

**[Dreyfus, 1989]**

Dreyfus, J. 2000 [1989]. *La Société du confort*. Paris : Editions l'Harmattan. 163 pages.

**[Eleb et Simon, 2013]**

Eleb, Monique ; Simon, Philippe. *Le logement contemporain : entre confort désirs et normes.1995-2012*. Bruxelles: Pierre Mardaga. 303 pages.

**[Fathy, 1986]**

Fathy, Hassan (Auteur). Sherarer, Walter & Sultan, Abd-el-rahman Ahmed (eds.). 1986. *Natural energy and vernacular architecture: Principles and examples with Reference to hot arid climates*. Chicago : The University of Chicago press. 172 pages.

**[Fourastie, 1962]**

Fourastié, Jean ; Fourastié Françoise, J. 1973 [1962]. *Histoire du confort*. Paris : Presses universitaires de France Vendôme, Impr. des P.U.F. 128 pages.

**[Fowler et Miller, 2003]**

Fowler, Murray; Miller, R. E. (ed.). 2003. *Zoo and Wild Animal Medicine: Current Therapy*. Philadelphia: Elsevier Inc. Saunders. Vol. 7. 688 pages.

**[Franger, 1970]**

Franger, PO. 1970. *Thermal comfort*. Copenhaguen DK : Danich technical press. 244 pages.

**[Gibson, 1996]**

Gibson, A. C. 1996. *Structure-function relation of warm desert plants*. New York : Springer - Verlag Berlin Heidelberg. 216 pages. (Adaptations of desert organisms).

**[Giendion, 1983]**

Giedion, Siegfried. (auteur). Guivarch, Paule. (Trad.).1983. *La Mécanisation au pouvoir : contribution à l'histoire anonyme*. Paris : Denoël : Gonthier. 244 pages. Centre Georges Pompidou-Ircam, Paris.

---

**[Givoni, 1978]**

Givoni, B. 1978. *L'homme l'architecture et le climat*. Paris: Editions du moniteur. 460 pages.

**[Goubert, 1988]**

Goubert, JP ; Marié, M. 2000 [1988]. *Du luxe au confort*. Paris : Belin. 192 pages.

**[Guillot et Meyer, 2008]**

Guillot, Angrès; Meyer Jean-Arcady. 2008. *La bionique : Quand la science imite la nature*. Paris : Dunod. 229 pages.

**[HBRC. Code : ECP 306, 2006]**

Housing and building research center. 2006. *The Egyptian code for enhancing energy use in building*. vol. I. Cairo: Housing and building research center.

**[Heschong, 1979]**

Heschong, Lisa. Guillaud, Hubert (trad.) 1981 [1979]. *Architecture et volupté thermique*. Thermal delight in architecture (Anglais). Paris: Editions Parenthèses. 93 pages.

**[Hinte et al, 2003]**

Hinte, Ed Van. Neelen, Marc, Vink, Jacques & Vollaard, Piet. 2003. *Smart architecture*. Rotterdam: 010 Uitgeverij publishers. 240 pages.

**[Hogarth, 2000]**

Hogarth, Peter J. 2007 [2000]. *The biology of mangroves and seagrasses*. New York: OUP-Oxford University Press. 228 pages. (Biology of habitats).

**[Hansell, 2005]**

Hansell, Mike. 2005. *Animal Architecture*. New York, Oxford University Press. 336 pages. (Oxford Animal Biology Series)

**[Izard et Guyot, 1979]**

Izard, Jean-Louis; Guyot, Alain. 1979. *Archi. Bio*. Roquevaire: Ed. Parenthèses, 131 pages.

**[Legoff, 1994]**

Legoff, Olivier. 1994. *L'invention du confort: naissance d'une forme sociale*. Lyon: Presses universitaires de Lyon. 215 pages.

**[Kirchner et al., 2011]**

Kirchner, Séverine; Mandin, Corinne; Derbez, Mickael; Ramalho, Olivier. 2011. *Qualité d'air intérieur, qualité de la vie: 10 ans de recherche pour mieux respirer*. Paris : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). 208 pages.

**[Klaus, 1998]**

Klaus, Daniels & Schwaiger, Elizabeth (trad.). 1998. *Low-Tech, Light-Tech, High-Tech : Building in the Information Age*. Berlin : Birkhauser Publishers. 238 pages.

**[Moe, 2010]**

Moe, Kiel. 2010. *Thermally active surfaces in architecture*. New York : Princeton Architectural Press. 240 pages.

**[Pawlyn, 2011]**

Pawlyn, Michael. 2011. *Biomimicry in architecture*. London: Riba publishing. 130 pages.

**[Roditi, 2011]**

Roditi, David. 2011. *Ventilation et lumière naturelles*. Paris : Eyrolles. 164 pages.

**[Rahm, 2009]**

Rahm, Philippe. 2009. *Architecture météorologique*. Paris. Archibooks. 123 pages.

**[Rahm, 2005]**

Rahm, Philippe. 2008 [2005]. *Decorsterd and Rahm - Distortions: Architecture 2000-2005*. Paris. Editions HXX. 124 pages.

**[Rybczynski, 1989]**

Rybczynski, W. 1989. *Le confort : cinq siècles d'habitation*. Ed du Roseau. 6ème congrès Européen de Science des Systèmes Paris 19-22 septembre 2005, Complexité du confort thermique dans les bâtiments. Dr R.Cantin, B. Moujalled, Dr HDR G. Guarracino. 283 pages.

**[Seze, 1994]**

SEZE Claudette. 1994. *Confort moderne : une nouvelle culture du bien être*. Paris : Autrement. 216 pages.

**[Siliotti, 2000]**

Siliotti, Alberto. 2000. *Sinai: Egypt pocket guide*. Cairo : American University in Cairo Press. 48 pages.

**[Shenbrot et al, 1999]**

Shenbrot , Georgy I; Krasnov, Bario R; Rogovin, Konstantin A. 1999. *Spatial ecology of desert rodent communities*. New York : Springer-Verlag Berlin Heildelberg. 292 pages. (Adaptations of desert organisms).

**[Springuel, 2006]**

Springuel, Irina. 2006. *The Desert Garden: A Practical Guide*. Cairo: American University in Cairo Press. 156 pages.

**[Wigginton et Harris, 2002]**

Wigginton, Michael; Harris, Jude. 2002. *Intelligent Skins*. Oxford : Architectural press. 176 pages.

**[Yagil, 1985]**

Yagil, Reuven. 1985. *The desert Camel : comparative physical adaptation*. Paris : S Karger Pub. 164 pages. (Comparative Animal Nutrition).

**[Fowler et Miller, 2003]**

Fowler, Murray E; Miller, R. Eric (ed.). 2012 [2008]. *Zoo and Wild Animal Medicine: Current Therapy*. China: Elsevier Inc. Saunders. Vol. 7. 688 pages.

**[Zalat, Gilbert, 2008]**

Zalat S; Gilbert F. 2008. *Gardens of a sacred landscape: Bedouin heritage and natural history In :the high mountains of Sinai*. Cairo: The American University in Cairo Press. 216 pages.

---

## **ARTICLES**

### **[Attia et al., 2009]**

Attia, S., Beltrán, L., De Herde, A. and Hensen, J. 2009. Architect Friendly: A comparison of ten different building performance tools, Building Simulation. In *Proceedings of International IBPSA 09 Buildings Simulation Conference. Le 27 juillet 2009*. p.204- 211.

### **[Ayman, 2011]**

Ayman, Mahmoud. 2011. An analysis of bioclimatic zones and implications for design of outdoor built environments in Egypt. *Building and environment*. Vol 46. Issue 3. March 2011. p. 605-620.

### **[Baumeister, 2008]**

Baumeister, Dayna. 2008. The Darwinism of architecture - how biomimicry will evolve architecture. *World architecture news*.  
Url:[http://www.worldarchitecturenews.com/index.php?fuseaction=wanappln.commentview&comment\\_id=162/](http://www.worldarchitecturenews.com/index.php?fuseaction=wanappln.commentview&comment_id=162/)

### **[Berkebile et McLennan, 2004]**

Berkebile; McLennan. 2004. The Living Building: Biomimicry in Architecture, Integrating Technology with Nature [en ligne]. *BioInspire magazine*. Mise en ligne le July 2004. Url: <http://biomimicry.typepad.com/bioinspire/2004/07/index.html>. (Consulté le 8 Februar 2013).

### **[Bhushan, 2009]**

Bhushan, Bharat. 2009. Lessons from the nature-an overview. *Journal of philosophical transactions of the royal society*. n°367, p. 1445-1486. Url: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/367/1893/1445.full.pdf+html/>

### **[El-Zeiny, 2012]**

El-Zeiny, R.M. 2012. Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture. In : *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Vol 50. Pages 502-512.

### **[Gamal-Elden, en ligne, 2012]**

Gamal-Elden, Safaa. 2012. Elgandy: une population de 81 million, 395 mille pour l'Égypte en Janvier 2012.(trad. Personnelle). [en ligne]. *AlAhrum Journal*. Mis en ligne le 2 Mars 2012. Url: <http://digital.ahram.org.eg/articles.aspx?Serial=817901&eid=1827>. (Consulté le 6 Juin 2013).

### **[Gendall, 2009]**

Gendall, John. 2009. Architecture that imitates life. [en ligne]. *Harvard Magazine*. . Mise en ligne September-October 2009. Url: <http://harvardmagazine.com/2009/09/architecture-imitates-life>. (Consulté le 10 avril 2011).

### **[Helms et al., 2009]**

Helms, M.; Swaroop, S. V.; Geol, A.K. (2009). Biologically inspired design: Process and product. *Design Studies, Elsevier*. Vol 30. 5 september 2009. p. 606-622.  
Url:<http://home.cc.gatech.edu/svattam/uploads/7/DS1.pdf>

### **[Hill et al, 1976]**

Hill, R.W.; Vegthe JH. 1976. Jackrabbit ears: surface temperatures and vascular responses. *Science*. 22 Oct. 194 (4263), New York, USA.

**[Isle et Leitch, en ligne, 2009]**

Isle, Nicole; Leitch, Eric. Biomimicry life's principles: Applying the laws of nature. [Article de Newsletter]. *Oregon state bar: Sustainable future section*. Mise en ligne 2009. Url: <http://osbsustainablefuture.org/home/section-newsletter/20101spring6isleleitch/>. (Consulté le 11 mai 2011).

**[Lasiewski, 1969]**

Lasiewski, RC. 1969. Physiological responses to heat stress in the poorwill. *American Journal of Physiology*. N. 217, p.1504-1509.

**[Millet, 1998]**

Millet, Jean-Robert. Qualité de l'air dans l'habitat : le rôle de la ventilation, *6ème congrès national de la SOFRAB*, 16 Janvier 1998, CSTB, Marne-la-vallée, France.

**[Sims et Elminiawy, 2003]**

Sims, David; Elminiawy, Hani. 2003 South Sinai development profile. In *South Sinai Governorate environmental action plan*. Cairo: Egyptian environmental affaires agency, SEAM Programme. Url:<http://st-katherine.net/downloads/Development%20Profile.pdf>

**[Schmitt, 1969]**

Schmitt, O. 1969. Some interesting and useful biomimetic transforms. In *Third Int. Biophysics Congress*. Boston, MA, 29 Aug. to 3 Sept. p. 297.

**[Straube et Acahrya, 2002]**

Straube, J. F.; Acahrya, V. 2002. Indoor air quality, healthy buildings, and breathing walls [en ligne]. *OIKOS-Iris communications Inc*. Green building source. Url: <http://www.breathing.com/pdf/indoor%20air%20quality.pdf>

**[Turner et Soar, 2008]**

Turner, J. Scott; Soar, Rupert C. 2008. Beyond biomimicry: What termites can tell us about. *First international conference on industrialized intelligenet construction (I3CON)*. Loughborough University, 14-16 May 2008, Leicester, UK. Url:<http://www.rshanthini.com/tmp/CP551/SDProjectPapers/BeyondBiomimicryTermites.PDF>

**[Vincent et al, 2006]**

Vincent, J. F. V.; Bogatyreva, O. A.; Bogatyrev, N. R.; Bowyer, A., Pahl, A.-K. 200- Biomimetics-its practice and theory. *Journal of the royal society interface*. Vol 3 (n° 9), p.471-484. Url:<http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/3/9/471>

**[Zari et Storey, 2007]**

Zari, Pedersen; Storey, M.J. 2007. An Ecosystem Based Biomimetic Theory for a Regenerative Built Environment. *SB07 Portugal: Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millenium*. 12 Sep 2007 - 14 Sep 2007. Lisbon, Portugal.

**[Zari, 2007]**

Zari, Pedersen. 2007. Biomimetic Approaches to Architectural Design for Increased Sustainability. *SB07 NZ. The Sustainable Building Conference*. Paper n°33, Auckland, New Zealand. Url:<http://www.victoria.ac.nz/architecture/about/staff/publications-maibritt-pedersen>.

---

## **THESE ET MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

### **[Attia, 2011]**

Attia, S. 2011. *State of the Art of Existing Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings: A Comparison of Ten Tools*. Technical Report. March 2011. Université catholique de Louvain, Louvain La Neuve, Belgium : UCL.

### **[Ali, 1998]**

Ali, Dina F. 1998. *Case study of development of the peripheral coastal area of south Sinai in relation to its bedouin community*. Mémoire de Master. Blacksburg, Virginia, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University. 133pages.  
Url: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-4798-175245/unrestricted/dina.pdf>.  
(consultée le 19 septembre 2012)

### **[Brangeon, 2012]**

Brangeon, Boris; Bastide, Alain (Dir.). 2012. Contribution à l'étude numérique de la ventilation naturelle dans des cavités ouvertes par la simulation des grandes échelles. Application au rafraîchissement passif des bâtiments. Thèse de doctorat. Université de la Réunion. 236 pages.

### **[Brun, 2011]**

Brun, Adrien; Wurtz, Etienne; Quenard, Daniel (Dir.). 2011. *Amélioration du confort d'été dans des bâtiments à ossature par ventilation de l'enveloppe et stockage thermique*. Thèse de doctorat. Université de Grenoble. 149 pages.

### **[Caciolo, 2010]**

Caciolo, Marcello; Marchio, Dominique (Dir.). 2010. Analyse expérimentale et simulation de la ventilation naturelle mono-façade pour le rafraîchissement des immeubles de bureaux. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 211 pages.

### **[Cohas, 1994]**

Cohas, M. 1994. *Contribution à amélioration de la qualité d'air intérieur des locaux d'habitation*. Thèse de doctorat. L'université Pierre et Marie Curie. Paris VI. 210 pages.

### **[Dhalluin, 2012]**

Dhalluin Adrien; Ginestet, Stéphane; Limam, Karim (Dir.). 2012. *Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle. 302 pages.

### **[Elghawaby, 2006]**

Elghawaby, Mahmoud. 2006. *The future of smart architecture in Egypt; a way to design environmental building*. Mémoire de master. Le Caire: Ain Shams University. 342 pages.

### **[Gallissot, 2012]**

Gallissot, Mathieu; Caelen, Jean (Dir.). 2012. *Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent : du multisensoriel au comportement*. Thèse de doctorat. Université de Grenoble. 233 pages.

### **[Mansouri, 2003]**

Mansouri, Yasmine. 2003. *Conception des enveloppes de bâtiments pour le renouvellement d'air par ventilation naturelle en climat tempérés : proposition d'une méthodologie de conception*. These de doctorat. Nantes : Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. 320 pages.

**[Yowell, 2011]**

Yowell, J. (2011). *Biomimetic Building Skin: A Phenomenological Approach Using Tree Bark as Model*. Master of Architecture, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma.

**[Etournay, 1996]**

Etournay, François (auteur); Beaudoin Laurent Directeur de recherche. 1996. *Le confort*. Mémoire de fin d'études. Paris : Ecole d'architecture Paris-Belleville. 98 pages.

**[Eugenie, 1979]**

Eugène, M.H.; Cordier J.P. (Directeur d'étude). 1979. *Confort thermique en pays chaud et humide; cas de la Martinique*. Travail personnel du IIIème cycle. Toulouse: UPA. 89 pages.

**[Vangimalla, et al., 2011]**

Vangimalla P.R., Svetlana J. Olbina, Raymond R. Issa, Jimmie Hinze. Validation of autodesk ecotect accuracy for thermal and daylighting simulations. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference S. Jain, R.R. Creasey, J. Himmelspach, K.P. White, and M. Fu, eds. University of Florida, Gainesville, FL, U.S.A. 11-14 Dec. 2011. Page(s): 3383 - 3394

---

## **SITES INTERNET**

### **[Acqualys, 2011]**

Acqualys-solutions durables pour l'habitat-énergies d'avenir. *Murs et parois prespirants*. Url: <http://www.acqualys.fr/pages/index.php?id=572>. (consulté le 3 novembre 2011).

### **[BI, En ligne] a**

The Biomimicry 3.8 Institute. *Sweating aids thermoregulation: mammals*. *Ask Nature*. Url: <http://www.asknature.org/strategy/e427ca4215ca4bc83ab647869c2643c9>. (Consulté le 8 March 2010).

### **[BI, En ligne]b**

The Biomimicry 3.8 Institute. *Leaves optimize internal state: Mangrove*. *Ask Nature*. Url: <http://www.asknature.org/strategy/7368abb7b463b9e81e8aa721b16845c6>. (Consulté le 8 March 2010).

### **[BI, En ligne]c**

The Biomimicry 3.8 Institute. *Large ears used to cool off: Jackrabbit*. *Ask Nature*. Url: <http://www.asknature.org/strategy/a250478ba7f69e68c71405d931c91d62>. (Consulté le 8 March 2010).

### **[BI, En ligne]d**

The Biomimicry 3.8 Institute. *Air scoops provide cooling: Ants*. *Ask Nature*. Url: <http://www.asknature.org/strategy/679517306e815ab19b4b04ba75a543eb>. (Consulté le 8 March 2010).

### **[BI, En ligne]e**

The Biomimicry 3.8 Institute. *Gular fluttering dissipates heat: nightjars*. *Ask Nature*. Url: <http://www.asknature.org/strategy/df479edb10713dec0097de25edf20b80>. (Consulté le 8 March 2010).

### **[BI, En ligne]f**

The Biomimicry 3.8 Institute. *Blood vessels regulate temperature: vertebrates*. *Ask Nature*. Url: <http://www.asknature.org/strategy/3e94c418c44b28c8ebc4d1695a48471b>. (Consulté le 8 March 2010).

### **[Chekchak, 2010]**

Chekchak, Tarik. 2010. Les termitières, pour fabriquer des bâtiments peu gourmands en énergie [billet de blog]. *Le biomimétisme*. Mise en ligne le 12 décembre 2010. Url: <http://tpe-biomimetisme.1eres.over-blog.com/article-les-termitieres-62858101.html>. (Consulté le 15 Janvier 2010).

### **[Desert USA, En ligne]**

DesertUSA Newsletter. *Desert animal survival: Adaptation of desert animals*. Url: <http://www.desertusa.com/survive.html>. (Consulté le 5 mai 2010).

### **[Earlham Collage, 2006]**

Earlham Collage. *Plant and animals adaptations*. Mise en ligne 2006. Url: <http://legacy.earlham.edu/~biol/desert/adapt.htm>. (Consulté le 12 février 2010).

### **[Heidorn, 2002]**

Heidorn, Keith. 2002. *Weather people and history: Paule Siple: Man of cold and wind. The weather doctor*. Mise en ligne le 15 janvier 2002. Url: <http://www.islandnet.com/~see/weather/history/siple.htm>. (Consulté le 25 Avril 2011).

**[Hui, En ligne]**

Hui, Sam C. M. *Air movement and naturel ventilation* [Cours]. Hong Kong : departement of architecture, University of Hong Kong. Mise en ligne le 17 août 2001. Url: <http://www.arch.hku.hk/teaching/lectures/airvent/sect03.htm>. (Consulté le 15 Mars 2010).

**[Greenthinkers, 2008]**

Greenthinkers.2008. Termites are smart [Billet de blog]. Mise en ligne le 16 janvier 2008. Url: [http://www.greenthinkers.org/blog/2008/01/termites\\_are\\_smart.html](http://www.greenthinkers.org/blog/2008/01/termites_are_smart.html). (Consulté le 30 avril 2010).

**[Rahm, En ligne]**

Rahm, Philippe. *Paris: Philippe Rahm architectes*. Url: <http://www.philipperahm.com/data/>. (Consulté le 5 Octobre 2011).

**[Recyconsult, En ligne]**

Recyconsult. 2010. Climat est une définition du dictionnaire environnement et développement durable. *Dictionnaire environnement*. Mise en ligne en 2010. Url: [http://www.dictionnaire-environnement.com/climat\\_ID2187.html](http://www.dictionnaire-environnement.com/climat_ID2187.html). (Consulté le 23 Janvier 2011).

**[Outilssolaires, 2010]**

Outilssolaires. 2010. Le Corbusier et l'esprit nouveau-lumière et ventilation naturelles. [billet de blog]. *Energy Solaire*. Mis en ligne le 11 mai 2010. Url: <http://outilssolaires.blog.ca/2010/05/11/1vn6-le-corbusier-et-l-esprit-nouveau-8562445/>. (Consulté le 19 Juin 2011).

**[Stoller, En ligne]**

Stoller, S.M. corporation. 2012. Environmental Surveillance, Education and research program. Plant adaptation. *Idaho region: Idaho National Laboratory (INL)*. Mise en ligne le 2 février 2012. Url: <http://www.stoller.com/projects/environmental-surveillance-education-research-program.php>. (Consulté le 10 Octobre 2012).

**[Ibara, 2010]**

Ibarra Diego. 2010. *Understanding weather files and visualizing data using computerized tools-Climate analysis* [Cours]. Digital workshops series. Cambridge MA : Harvard Graduate school of design. Url: <http://www.gsd.harvard.edu/research/gsd-square/Publications/ClimateAnalysisWorkshop.pdf>

**[Molle, 2006]**

Molle, Nicolas. 2004. *Ventilation pour le confort d'été*. Lyon: Etamine-conception environnementale du bâtiment. Mise en ligne le 2 janvier 2006. Url: <http://www.etamine.coop/upload/18377115034abb34e7bbb7a.pdf>

**[Powers, 2012]**

Powers, Stephanie. 2012. *Incredibly leaflike : 12 bio-inspired plant-based designs*. Mise en ligne le 5 mai 2012. Url: <http://webecoist.momtastic.com/2011/01/28/incredibly-leaf-like-12-bio-inspired-plant-based-designs/>

## RÉSUMÉ

La recherche consiste à étudier le problème du confort thermique à l'intérieur des bâtiments situés en zones chaudes et arides comme en Égypte. L'idée principale est d'utiliser des concepts basés sur le potentiel de la nature comme instrument qui nous aide à réaliser des façades appropriées à l'environnement. L'inspiration de la nature n'est pas nouvelle, mais elle a commencé récemment à être scientifiquement formulé en vertu de plusieurs notions, telles que, le biomimétisme, la biomimétique, la bionique ou la bio-inspiration. La science du biomimétisme imite la nature à travers l'étude de la forme, la fonction, le comportement et les écosystèmes des organismes biologiques pour créer des systèmes non biologiques.

L'architecture biomimétique s'inspire de la nature de ces divers systèmes intelligents tels que la capacité thermorégulatrice de la peau humaine, les changements saisonniers de la peau de beaucoup d'animaux, l'ouverture et la fermeture des fleurs en réponse à la lumière du soleil. Cette recherche vise à clarifier les possibilités que le biomimétisme peut offrir pour développer des systèmes architecturaux de refroidissement. Elle observe les exemples naturels dans la flore et la faune pour améliorer l'efficacité des systèmes de ventilation afin d'atteindre le confort thermique dans les bâtiments situés en zones chaudes et arides.

*Les systèmes biomimétiques trouvés dans la nature sont-ils considérés comme base de concepts architecturaux à même de s'adapter au climat chaud?*

Cette thèse permettra de bien analyser ces systèmes et de les imiter, à l'aide des technologies nouvelles, dans des façades compatibles avec l'environnement. Je m'intéresse à appliquer cet idée à la région du Sinaï qui est considérée comme une des plus importantes régions en Egypte pour le développement urbain.

## **MOTS CLES**

Architecture bioclimatique, biomimétisme, ventilation naturelle, mur respirant, Sinaï.

## ABSTRACT

This research aims at studying the problem of thermal comfort inside buildings located in hot and arid climates such as in Egypt. The principal idea behind this research is using concepts based on the potential of nature as an instrument that helps us creating appropriate facades with the environment. Inspiration from nature is not a new approach, but it has recently formulated under several scientific terms such as, biomimicry, bionics or bio-inspiration. Biomimicry is the science that imitates the nature through the study of form, function, behavior and ecosystems of biological organisms in order to create non-biological systems.

The biomimetic architecture tries to be inspired by the nature with its intelligent different systems such as smart thermoregulatory human skin, seasonal changes of the skin of many animals, the opening and closing of flowers in response to light sun. This research aims at clarifying the possibilities that can be offered by the science of biomimicry to develop architectural cooling systems. It focuses on natural thermal adaptation systems found in flora and fauna beside the thermoregulation process in human body. These biomimetic concepts can help in enhancing the effectiveness of ventilation systems in buildings located in hot climate which helps to achieve thermal comfort for users.

Biomimetic systems found in nature could be considered as base of architectural concepts appropriate and adapted to hot climate?

This thesis will analyze these natural systems and imitate it while using new technologies in order to create facades appropriate with the environment. I am interested to apply this idea in buildings located in the region of Sinai, which is considered one of the most important regions in Egypt for its urban development rate.

## **KEYWORDS**

Bioclimatic architecture, biomimicry, natural ventilation, breathing wall, Sinai.