



**HAL**  
open science

# Études de l'amélioration de la performance énergétique et de stratégies de conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide

Idris Omar Abdou

► **To cite this version:**

Idris Omar Abdou. Études de l'amélioration de la performance énergétique et de stratégies de conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide. Génie civil. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSE1172 . tel-03346755

**HAL Id: tel-03346755**

**<https://theses.hal.science/tel-03346755v1>**

Submitted on 16 Sep 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N°d'ordre NNT : 2020LYSE1172

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**l'Université Claude Bernard Lyon 1**

**Ecole Doctorale N° 162**  
**(Mécanique-Energétique-Génie Civil-Acoustique)**

**Spécialité de doctorat :**  
**Discipline : Génie civil**

Soutenue publiquement le 16/10/2020, par :  
**(ABDOU IDRIS OMAR)**

---

**Études de l'amélioration de la performance  
énergétique et de stratégies de conception  
architecturale bioclimatique en climat  
chaud et humide.**

---

Devant le jury composé de :

<b>FRAISSE, Gille</b>	Professeur	LOCIE – Université Savoie Mont Blanc	Rapporteur
<b>MUSY, Marjorie</b>	Directrice de Recherche	CEREMA / GEM – Ecole Centrale Nantes	Rapporteuse
<b>CURTIL, Laurence</b>	Professeur	LMC <sup>2</sup> – Université Lyon 1	Examinatrice
<b>WOLOSZYN, Monica</b>	Professeur	LOCIE – Université Savoie Mont Blanc	Examinatrice
<b>VIRGONE, Joseph</b>	Professeur	CETHIL – Université Lyon 1	Directeur de thèse
<b>IBRAHIM IDRIS, Abdoukader</b>	Maître de Conférences	Université de Djibouti	Co-directeur de thèse
<b>VERGNAULT, ETIENNE</b>	Maître de Conférences	CETHIL – Université Lyon 1	Invité
<b>DAVID, Damien</b>	Maître de Conférences	CETHIL – Université Lyon 1	Invité



---

*A Oumalkaire*  
*A mes deux petits monstres, Ismahan et Anis*  
*A mes parents*  
*A tous ceux qui me sont Chers*



# Remerciement

---

*Cette thèse est le fruit d'une aventure collective. Sans ce collectif de collègues, amis, et famille elle n'aurait jamais abouti.*

*Je voudrais remercier tout d'abord ma femme, Oumalkaire, pour sa patience, sa tendresse et son soutien inconditionnel. Elle a dû organiser son quotidien, avec nos deux enfants Ismahan et Anis, autrement tout le long de ces quatre longues années, sans quoi cet ouvrage n'aurait pas vu le jour.*

*A mes parents qui ont fait tant de sacrifice pour que j'arrive à ce niveau. Ils sont l'essence même de ma réussite.*

*Grand merci à mes directeurs de thèses, Pr. Joseph Virgone, et Dr. Abdoukader Ibrahim pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur une thématique aussi intéressante. Grand merci aussi à mes co-encadrants Dr. Damien David et Dr. Etienne Vergnault pour comprendre ma situation particulière pendant ces quatre années, sachant être présents lorsqu'il le fallait, tout en me laissant suivre mon chemin, toujours en confiance. Merci pour les compétences que vous avez su partager.*

*Un grand merci aux deux rapporteurs de thèse, Dr. Marjorie Musy, directrice de recherche au Cerema Ouest de Nantes et Pr. Gilles Fraisse, de l'Université de Savoie Mont Blanc qui ont dû lire et analyser des centaines de pages d'une étude sur le climat chaud pendant la période estivale. Croyez-nous, ce n'était pas fait exprès.*

*Mes remerciements au Pr. Laurence Curtil de l'Université de Lyon 1 pour avoir accepté d'être la présidente de mon jury ainsi que Pr. Monika Woloszyn de l'Université de Savoie Mont Blanc pour avoir accepté d'être membre du jury.*

*Mes remerciements vont aussi à l'ancien Directeur du CETHIL, Pr. Jocelyn Bonjour et l'actuel Directeur Pr. Frédéric Kuznik pour m'avoir accueilli dans le laboratoire durant ces années de thèse.*

*Merci au Président de l'Université de Djibouti, Dr. Djama Mohamed pour son soutien toute aux long de cette thèse. Qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude.*

*Merci à mes collègues de la Faculté d'Ingénieurs de l'Université de Djibouti, qui ont dû combler mes absences avec une énergie supplémentaire malgré leur emploi de temps déjà extrêmement chargé, et cela toujours avec le sourire et des mots d'encouragement.*

*Un grand merci à mes amis du CETHIL: Soufiane, Fouad, Loïc, Bilal, Bao, Vyas et Abdesalam. Qu'ils trouvent ici mon amitié la plus sincère. Merci à Mathieu et Lili pour votre bienveillance à mon égard et surtout pour les nombreux échanges que j'ai eus avec vous et votre solidarité agissante.*

*Enfin je tiens à remercier également les autres membres de ma famille pour leur assistance et leur soutien.*

*Djibouti, le 10 novembre 2020*



# Titre : Études de l'amélioration de la performance énergétique et de stratégies de conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide.

---

**Résumé :** Pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments, une solution connue depuis des décennies, consiste à concevoir son enveloppe afin d'exploiter les ressources énergétiques existant dans l'environnement. C'est le principe même de l'architecture dite bioclimatique. Cela est d'autant plus vrai pour les climats chauds et humides. Mais jusqu'à présent, l'absence de critères permettant d'identifier les ressources énergétiques disponibles dans l'environnement et le niveau de performance de la solution technique a représenté un obstacle majeur.

Pour résoudre ce problème, ce projet de thèse a une double ambition. D'une part, nous élaborons des nouveaux critères d'analyse qui permette de quantifier les potentiels énergétiques d'un site et d'autre part les performances bioclimatiques de solutions constructives au regard de ces potentiels.

Cette nouvelle approche adaptée au bâtiment entièrement climatisé dans un climat chaud et humide donne une vue d'ensemble des ressources environnementales exploitables et de la capacité du bâtiment à exploiter ces ressources.

Un cas d'étude sous le climat de Djibouti est alors choisi pour mettre en œuvre l'ensemble des indicateurs bioclimatiques et les résultats sont analysés sur toute l'année, mais aussi de manière dynamique.

Ce travail de thèse montre non seulement la capacité des indicateurs à refléter les performances bioclimatiques des bâtiments, mais aussi leur capacité à donner une vue d'ensemble des échanges thermiques du bâtiment. Ces indicateurs permettent donc de fixer dès les premières étapes de la conception, des points de repère sur l'état des ressources et surtout l'exploitation qui en est faite par les solutions techniques les plus adaptées au climat local.

Finalement, les nouveaux critères d'analyse sont utilisés dans une approche de conception des bâtiments, pour évaluer la performance bioclimatique de différentes solutions constructives.

Notre contribution permet à terme de servir de socle aux futures réglementations thermiques des bâtiments dans les pays à climat chaud et humide, en général, et à Djibouti, en particulier.

**Mots clés :** Ressources environnementales, Indicateurs bioclimatiques, Indicateurs de performance, Conception bioclimatique, Enveloppe du bâtiment, Climat chaud et humide.

---





# Title: **Evaluation of the building energy performance and bioclimatic design strategies in hot and humid climates.**

---

**Abstract:** To reduce the energy consumption of buildings, a solution known for decades, consists of designing its envelope in order to exploit the energy resources existing in the environment. This is the very principle of so-called bioclimatic architecture. This is also true for hot and humid climates. But up to now, the lack of criteria to identify the energy resources available in the environment and the level of performance of the technical solution has been a major obstacle.

To solve this problem, this thesis has a double ambition. On one hand, we have developed new analysis criteria which make it possible to quantify the energy potentials of a site and on the other hand the bioclimatic performance of constructive solutions regarding these potentials.

This new approach, adapted to a fully air-conditioned building in a hot and humid climate, gives an overview of the exploitable environmental resources and the capacity of the building to exploit these resources.

A case study in the climate of Djibouti is then chosen to implement all the bioclimatic indicators and the results are analyzed over the whole year, but also in a dynamic way.

This work shows not only the capacity of the indicators to reflect the bioclimatic performance of buildings, but also their capacity to give an overview of the building's heat exchanges. These indicators therefore make it possible to set, from the first stages of the design, benchmarks on the state of resources and especially the use made of them by the technical solutions most suited to the local climate.

Finally, the new analysis criteria are used in a building design approach, to assess the bioclimatic performance of different constructive solutions.

Our contribution will ultimately provide the basis for future thermal regulations of buildings in countries with hot and humid climates, in general, and in Djibouti, in particular.

**Keywords:** Environmental resources, Bioclimatic indicators, Performance indicators, Bioclimatic design, Building envelope, Hot and humid climate.

---



# Table des matières

## Introduction générale

### 1. Contexte de la thermique du bâtiment en climat chaud et humide

#### 1.1. Introduction

#### 1.2. Contexte et enjeux de l'efficacité énergétique dans les bâtiments en climat chaud

1.2.1. Contexte énergétique global des pays au climat chaud.

1.2.2. Un pays au climat très chaud et humide : le cas de Djibouti

#### 1.3. Typologie des constructions à Djibouti

#### 1.4. Le climat de Djibouti

1.4.1. Informations générales sur le climat

1.4.2. Analyse des paramètres climatiques significatifs de Djibouti

1.4.2.1. *Radiation solaire*

1.4.2.2. *Température*

1.4.2.3. *Humidité*

1.4.2.4. *Vent*

1.4.2.5. *Température du ciel*

1.4.2.6. *Température du sol*

#### 1.5. Conclusion

### 2. Analyse bibliographique sur l'architecture bioclimatique

#### 2.1. Introduction

#### 2.2. Démarche de conception bioclimatique

2.2.1. L'architecture bioclimatique

2.2.2. Démarche symptomatique

2.2.3. Démarche analytique

#### 2.3. Indicateurs bioclimatiques

2.3.1. Indicateurs pour l'évaluation du confort

2.3.1.1. *La température Opérative*

2.3.1.2. *Le Predicted Mean Vote*

2.3.1.3. *Les indicateurs de confort adaptatifs*

2.3.2. Indicateurs bioclimatiques pour l'analyse de site

- 2.3.2.1. *Diagramme de Givoni*
- 2.3.2.2. *Indicateurs basés sur le degré-jour*
- 2.3.2.3. *Autres indicateurs*
- 2.3.2.4. *Discussion*
- 2.3.3. Indicateur en phase de conception de bâtiment
- 2.3.4. Jeux d'indicateur bioclimatique complet
- 2.4. Solutions constructives et systèmes bioclimatiques**
- 2.4.1. Techniques de protection solaire
- 2.4.2. Techniques d'amortissements de la chaleur
- 2.4.3. Techniques dissipation de la chaleur
  - 2.4.3.1. *Rafrâichissement par ventilation*
  - 2.4.3.2. *Rafrâichissement radiatif*
  - 2.4.3.3. *Rafrâichissement par évaporation*
  - 2.4.3.4. *Rafrâichissement géothermique*
- 2.5. Conclusion**

### 3. Nouveau jeu d'indicateurs bioclimatiques pour les climats chauds et humides

- 3.1. Introduction**
- 3.2. Cadre d'application des indicateurs**
- 3.3. Identification des sources de rafraîchissement environnementales**
  - 3.3.1. Définition d'une ressource et d'une contrainte bioclimatique.
  - 3.3.2. Identification des ressources bioclimatiques
- 3.4. Définition des indicateurs bioclimatiques**
  - 3.4.1. Méthode générale de calcul et bases de la démarche
  - 3.4.2. Indicateurs de Ressources Environnementales
    - 3.4.2.1. *Problématique : Définition du Virtual Highly Permeable Building*
    - 3.4.2.2. *Calcul des indicateurs*
  - 3.4.3. Indicateurs de Performances du Bâtiment
    - 3.4.3.1. *Problématique*
    - 3.4.3.2. *Calcul des indicateurs*
  - 3.4.4. Fermeture du bilan énergétique
  - 3.4.5. Représentation graphique
  - 3.4.6. Indicateurs relatifs
- 3.5. Confrontation des indicateurs à un cas d'étude**
  - 3.5.1. Objectifs
  - 3.5.2. Description du cas d'étude
  - 3.5.3. Analyse des indicateurs bioclimatiques – Indicateurs de ressources environnementales
    - 3.5.3.1. *Potentiels de rafraîchissement*

- 3.5.3.2. *Antipotentiels environnementaux*
- 3.5.4. Analyse des indicateurs bioclimatiques – Indicateurs de performance des bâtiments
  - 3.5.4.1. *Analyse globale des résultats*
    - 3.5.4.1.1. *Exploitation des ressources*
    - 3.5.4.1.2. *Protection des contraintes*
    - 3.5.4.1.3. *Analyse multicomposante pour chaque cas d'étude*
  - 3.5.4.2. *Analyse dynamique*
- 3.5.5. Discussion
- 3.6. **Conclusion**

## 4. Évaluation de Solutions Bioclimatiques

- 4.1. **Introduction**
- 4.2. **Description du cas d'étude**
  - 4.2.1. Architecture du bâtiment
  - 4.2.2. Caractéristique thermique du bâtiment
    - 4.2.2.1. *Compacité*
    - 4.2.2.2. *Composition des parois de l'enveloppe*
    - 4.2.2.3. *Ventilation et système de rafraîchissement*
    - 4.2.2.4. *Scénario des charges internes*
- 4.3. **Analyse bioclimatique de la configuration initiale**
- 4.4. **Analyse de quelques solutions bioclimatiques**
  - 4.4.1. Protection solaire extérieure aux vitrages
  - 4.4.2. Protection solaire intérieure aux vitrages
  - 4.4.3. Isolation thermique des parois
  - 4.4.4. Performance des fenêtres
  - 4.4.5. Masque solaire
  - 4.4.6. Orientation
  - 4.4.7. Compacité
  - 4.4.8. Cool roof : toitures à haute réflexion solaire
  - 4.4.9. Toiture double peau ventilée
  - 4.4.10. Isolation dynamique
  - 4.4.11. Ventilation naturelle
  - 4.4.12. Augmentation de la masse thermique
  - 4.4.13. Augmentation de WWR
- 4.5. **Synthèse**

## 5. Conclusion générale et perspectives

# Table des figures

Fig.1.1. Part mondiale de l'énergie et des émissions des bâtiments et de la construction, (GABC, 2018). .....	5
Fig.1. 2. Répartition de la consommation électrique à Djibouti (IRENA, 2015). .....	8
Fig.1. 3 (a-b) Exemples d'architecture coloniale, (c-d) exemples de bâtiments contemporains.....	10
Fig.1. 4. - (a) Typologies de construction à Djibouti, (b) Type de matériaux pour les murs (c) Nature des matériaux utilisés pour la toiture de la maison, pour un échantillon de 62548 logements (INSD, 2019). .....	11
Fig.1. 5. Quelques exemples d'architectures bioclimatiques à Djibouti : (a) Escalier d'immeuble de logement collectif avec briques ajourées (peintes en bleu) forçant la ventilation naturelle ; (b) Ombrage par volets et persiennes – briques ajourées pour ventilation forcée ; (c) Cage d'ombrage des fenêtres avec grilles de ventilation ; (d) Casquettes d'ombrage des fenêtres.....	12
Fig.1. 6. Classification climatique de Koppen-Gigger. ....	14
Fig.1. 7. Emplacement de Djibouti sur la carte. ....	16
Fig.1. 8 - (a) Contour de radiation solaire globale horizontale et (b) Rayonnement journalier moyen mensuel et ratio direct / global à Djibouti, climat chaud-humide.....	17
Fig.1. 9. (a) Projection stéréographique du parcours du soleil sous la latitude de Djibouti - 11°30 N et (b) Energie reçue par paroi du bâtiment.....	17
Fig.1. 10 - Rayonnement solaire sur un plan horizontal et sur un plan vertical pour différentes orientations (a) pour une journée typique de décembre (b) Pour une journée typique de juin. ....	18
Fig.1. 11. Irradiation solaire et position du soleil à Djibouti. Les côtés du cube indiquent la quantité d'énergie reçue en kWh/m <sup>2</sup> pour un mois donné. Les nombres en noir quantifient le niveau d'irradiation globale et ceux en gris l'énergie solaire directe sur une surface donnée. La hauteur solaire maximale et l'angle d'azimut sont également inclus pour chaque mois. ....	19
Fig.1. 12 Variation de température horaire moyenne de l'air et (b) Température mensuelle (max., min. et moy.) de l'air et amplitude thermique à Djibouti. ....	21
Fig.1. 13 – (a) Humidité relative moyenne mensuelle et (b) diagramme psychrométrique à Djibouti. ....	22
Fig.1. 14 Rose des vents indiquant l'intensité, la direction et la fréquence du vent pour Djibouti. ....	23
Fig.1. 15. Classification des modèles empiriques pour l'estimation de la température du ciel (Algarni, 2015).....	25
Fig.1. 16 (a) Variation de température horaire moyenne du ciel et (b) Comparaison entre les moyennes mensuelles de la température du ciel et celle de l'air à Djibouti.....	26
Fig.1. 17.Principaux flux de chaleur à la surface du sol .....	27
Fig.1. 18 - (a) Variation de Température en fonction de la profondeur du sol ; (b) Température moyenne annuelle à différentes profondeurs du sol et (c) Variation du déphasage en fonction de la profondeur du sol et Profondeur de pénétration thermique. ....	29
Fig.2.1. Représentation schématique de processus de conception symptomatique (1) et analytique (2) de la conception bioclimatique. ....	35
Fig.2. 2. La corrélation entre la température de confort et la température moyenne extérieure pour un bâtiment non climatisé. Le changement de la température de confort avec la température extérieure moyenne mensuelle pour les bâtiments non climatisés et les bâtiments climatisés, (Roche, 2017).....	39
Fig.2. 3. Norme de confort adaptatif proposée pour la norme ASHRAE 55, applicable aux bâtiments à ventilation naturelle (Roche, 2017). ....	40
Fig.2. 4. Diagramme bioclimatique tel que défini par Milne et Givoni. Les différents polygones représentent les stratégies de confort passives (Košir, 2019).....	42
Fig.2. 5.Zones de pertinence des CVC repris de (Ghiaus and Allard, 2006).....	44
Fig.2. 6. Carte du CCP moyen (Kh/nuit) en juillet (Artmann et al., 2007). ....	45
Fig.2. 7. Représentation radar pour le site de Campo dell'Oro, Ajaccio (Faggianelli et al., 2014). ....	45
Fig.2. 8. Schéma des saisons climatiques. ....	46
Fig.2. 9. Diagramme de Sankey (Kaboré et al., 2018). ....	48
Fig.2. 10 - Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments. ....	51

Fig.2. 11. Végétation et protection solaire .....	52
Fig.2. 12 – (a) Casquette horizontal et vertical, (b) Persiennes horizontales, fixes ou amovible, (c) Persiennes verticales ajustable, (d) Stores mobiles, (e) Panneaux glissant ou tournant autour d'axes horizontaux, (f) Brises-soleil à lames, (g) Auvent et (h) Volets tournant ou coulissant, repris de (Roche, 2017) .....	53
Fig.2. 13 – (a) Section d'un mur à double peau, (b) Toiture ventilée. ....	55
Fig.2. 14 - Masse thermique et sur-ventilation nocturne a) fermeture de toutes les fenêtres pendant la journée, (b) Sur-ventilation nocturne.....	56
Fig.2. 15. Ventilation traversante .....	58
Fig.2. 16 - Capteurs de vent multidirectionnel, (a) mode jour, (a) mode nuit et (c) cheminée solaire.....	60
Fig.2. 17 - Quelques systèmes de rafraîchissement radiatif : (a) Système de toiture à isolation dépliable : le jour elle déployée et le soir repliée pour permettre l'évacuation de la chaleur par radiation ; (b) Skytherme ou système de toiture-bassin : l'eau se refroidit par radiation et rafraîchi la sous-toiture ; (c) Capteur radiatif nocturne ; (d) Récupération de l'air frais sous toiture pendant la nuit, le jour le système est condamné.....	64
Fig.2. 18. Toiture diode.....	66
Fig.2. 19. rafraîchissement par évaporation direct .....	68
Fig.2. 20. rafraîchissement par évaporation direct avec des panneaux humides .....	69
Fig.2. 21. rafraîchissement par évaporation indirect.....	69
Fig.2. 22 Rafraîchissement géothermique direct et indirect.....	71
Fig.3. 1. Principes de base pour le calcul des potentiels énergétiques.....	78
Fig.3. 2. Définition du VHPB .....	80
Fig.3. 3. Indicateurs de ressources environnementales.....	81
Fig.3. 4. Exemple de bilan thermique dans DesignBuilder (EnergyPlus) .....	86
Fig.3. 5. Indicateurs de performances énergétiques.....	86
Fig.3. 6. Les limites du volume sur lesquels sont calculés les bilans.....	89
Fig.3. 7. Exemple de représentation graphique avec les nouveaux indicateurs .....	91
Fig.3. 8. Diagramme récapitulatif des indicateurs.....	92
Fig.3. 9. Rendu géométrique du modèle Design Builder .....	93
Fig.3. 10. Scénario quotidien de la puissance totale dissipée .....	97
Fig.3. 11. Distribution mensuelle des potentiels de rafraîchissement environnementaux .....	98
Fig.3. 12. Distribution mensuelle des antipotentielles environnementaux.....	99
Fig.3. 13. Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour les ressources convection externe, ciel et ventilation naturelle : comparaison des différentes configurations d'enveloppe.....	100
Fig.3. 14. Valeurs intégrées sur l'année des antipotentielles exploités et des potentiels de compensation : comparaison des différentes configurations d'enveloppe.....	101
Fig.3. 15. Bilan thermique : Comparaison entre les ERIs et les BPIs annuels pour les quatre compositions d'enveloppes.....	103
Fig.3. 16. Moyennes mensuelles des indicateurs pour la ressource de convection externe et la ressource du ciel pour tous les bâtiments.....	105
Fig.3. 17. Moyennes mensuelles des indicateurs de ventilation pour tous les bâtiments.....	106
Fig.3. 18. Moyennes mensuelles des antipotentielles exploités résiduels pour les quatre configurations de bâtiments.....	106
Fig.3. 19. Différence entre les potentiels de rafraîchissement environnementaux restant et les antipotentielles exploités résiduels pour chaque mois et pour chaque bâtiment.....	107
Fig. 4. 1 Image virtuelle du modèle architectural.....	111
Fig. 4. 2. Rendu géométrique du modèle thermique.....	112
Fig. 4. 3. Bilan thermique : Comparaison entre les ERIs et les BPIs annuels pour la variante de base.....	115
Fig. 4. 4. Bilan thermique : Comparaison entre les ERIs et les BPIs (a) - semaine type saison chaude ; (b) - semaine type saison fraîche ; (c) RDC ; (d) - R+3.....	118
Fig. 4. 5. Différentes variantes de protections solaires modélisées dans le cadre de l'étude .....	120
Fig. 4. 6 Analyse bioclimatique de la protection solaires : (a),(c),(e) – ERIs et BPIs annuels pour chaque solution ; (b),(d),(f) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base..	121
Fig. 4. 7. Caractéristiques du rideau simple.....	123
Fig. 4. 8. Analyse bioclimatique de la protection interne : (a) – ERIs et BPIs annuels; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.....	124



Fig. 4. 9. Coupes schématiques des compositions des parois extérieures du modèle. ....	125
Fig. 4. 10. Analyse bioclimatique de l'isolation thermique : (a) – ERIs et BPIs annuels; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	126
Fig. 4. 11. Comparaison de la variation des indicateurs pour la semaine type saison chaude et la semaine type saison fraîche. ....	127
Fig. 4. 12 Analyse bioclimatique du double vitrage (a) – ERIs et BPIs annuels; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	129
Fig. 4. 13. Masques proches. ....	131
Fig. 4. 14. Analyse bioclimatique des masques solaires (a) – ERIs et BPIs annuels; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	131
Fig. 4. 15. ERIs et BPIs annuels du modèle 100% N. ....	133
Fig. 4. 16. Analyse bioclimatique des orientations (a) et (c) – ERIs et BPIs annuels; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	134
Fig. 4. 17. Compacité de deux modèles de calcul utilisés dans Design Builder. ....	135
Fig. 4. 18. Analyse bioclimatique de la compacité (a) et (c) – ERIs et BPIs annuels; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	137
Fig. 4. 19. Analyse bioclimatique du cool roof (a) – ERIs et BPIs annuels ; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	139
Fig. 4. 20. Sur-toiture ventilée, la tôle galvanisée est en dehors de l'enveloppe de bilan thermique. .....	140
Fig. 4. 21. Analyse bioclimatique de la toiture ventilée (a) – ERIs et BPIs annuels ; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	141
Fig. 4. 22. Analyse bioclimatique de l'isolation amovible (a) – ERIs et BPIs annuels ; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	142
Fig. 4. 23. Analyse bioclimatique de la ventilation naturelle (a) et (c) – ERIs et BPIs annuels ; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	144
Fig. 4. 24. Analyse bioclimatique de l'isolation dynamique (a) et (c)– ERIs et BPIs annuels ; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	146
Fig. 4. 25. Analyse bioclimatique de l'augmentation du WWR (a) et (c) – ERIs et BPIs annuels ; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base. ....	148

# Liste des tableaux

Tableau 1. 1. Nature du sol et propriétés physiques.....	28
Tableau 2. 1. Relation entre les indices PMV et le PPD.....	38
Tableau 2. 2. Niveau de confort recommandées par la norme NF EN 15251. (CEN, 2007) .....	40
Tableau 3. 1. Matrice des sources énergétique environnementales .....	77
Tableau 3. 2. Classe de rugosité (Allard et al., 1998).....	84
Tableau 3. 3. Synthèse des quatre cas testés.....	93
Tableau 3. 4. Caractéristiques des parois opaques du HWI .....	94
Tableau 3. 5. Caractéristiques des parois opaques du HWnoI .....	95
Tableau 3. 6. Caractéristiques des parois opaques du LWI.....	96
Tableau 3. 7. Caractéristiques des parois opaques du LWnoI .....	96
Tableau 3. 8. Propriétés des parois vitrées.....	96
Tableau 4. 1. Valeurs des indicateurs relatifs de la variante initiale.....	116
Tableau 4. 2. Synthèse des solutions testées .....	150
Tableau 4. 3. Synthèse des résultats de l'analyse.....	151

# Nomenclature

## Abréviations

Notation	Signification
<i>BPI</i>	Indicateurs de Performance Bioclimatique
<i>ERI</i>	Indicateurs de ressources Environnementales
<i>VHPB</i>	Virtual Highly Permeable Building

## Lettres minuscules

Notation	Unité	Signification
$c_p$	[J/(kg.K)]	Chaleur spécifique
$h_c$	W/(m <sup>2</sup> .K)]	Coefficient d'échange convectif
$k$	[m <sup>2</sup> /s]	Diffusivité thermique
$t$	[h]	Variable relative au temps
$v_b$	[m/s]	Vitesse de référence du vent
$v_{wind}$	[m/s]	Vitesse moyenne locale

## Lettres grecques

Notation	Unité	Signification
$\rho$	[kg/m <sup>-3</sup> ]	Masse volumique
$\lambda$	[W/(m.K)]	Conductivité thermique
$\sigma$	[W/(m <sup>2</sup> .K <sup>-4</sup> )]	Constante de Stefan-Boltzmann
$\tau$	[%]	Indicateur relatif
$\rho_{CLO}$	-	Coefficient de réflexion solaire
$\varepsilon_{GLO}$	-	Emissivité
$\varphi_{diff}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Rayonnement solaire diffus
$\varphi_{dir}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Rayonnement solaire directe
$\Phi$	[W]	Flux de chaleur
$\Phi_{ac}$	[W]	Besoin de rafraîchissement
$\Phi_{net}$	[W]	Flux de chaleur par conduction
$\Phi_{tr}$	[W]	Flux solaire transmis

## Lettres majuscules

Notation	Unité	Signification
$C_p$	[J/(kg.K)]	Coefficient de pression
$F_{sky}$	-	Facteur de forme entre une paroi et la voûte céleste
$I_{night}$	-	Fonction caractéristique de la nuit
$\overset{*}{Q}$	[Wh]	Potentiel de rafraîchissement
$\overset{*}{Q}^{AC}$	[Wh]	Indicateur de besoin de rafraîchissement
$\hat{Q}$	[Wh]	Potentiel de compensation
$\bar{Q}$	[Wh]	Antipotentiel
$\bar{Q}_{in}$	[Wh]	Charges internes
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Surface
$S_{win}$	[m <sup>2</sup> ]	Surface des fenêtres avec WWR=15%
$S_{hab}$	[m <sup>2</sup> ]	Surface habitable
$T$	[°C]	Température
$T_{cr}$	[°C]	Température de consigne de rafraîchissement

$T_{sol}$	[°C]	Température du sol en profondeur
$T_m$	[°C]	Température moyenne annuelle du sol
U	[W/m <sup>2</sup> .K]	Coefficient de transmission thermique
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	Débit ventilation
$V_{bat}$	[m <sup>3</sup> ]	Volume du bâtiment

### Indices

Notation	Signification
<i>a</i>	Relatif à l'air
<i>int</i>	Relatif à l'air intérieur
<i>ext</i>	Relatif à l'air extérieur
<i>cv</i>	Relatif à la convection
<i>inf</i>	Relatif à l'infiltration
<i>sky</i>	Relatif au ciel
<i>sun</i>	Relatif au soleil
<i>vent</i>	Relatif au vent
<i>w</i>	Relatif à une paroi
(+)	Valeur positive
(-)	Valeur négative

### Exposants

Notation	Signification
<i>ref</i>	Relative au bâtiment de référence VHBP
<i>ENV</i>	Environnementales
<i>EXP</i>	Exploité
<i>SHE</i>	Protégé « Sheltered »
<i>SHA</i>	Ombrage « Shade »
<i>COV</i>	Couvert



# Introduction générale

La nécessité de concevoir des bâtiments qui répondent aux conditions climatiques est devenue primordiale, en raison de la prise de conscience des effets négatifs des bâtiments sur l'environnement. Les changements climatiques inévitables prévus pour les prochaines décennies auront aussi un impact substantiel sur la consommation d'énergie des bâtiments, plus particulièrement dans les pays chauds.

Adapter la conception des bâtiments à leur contexte climatique afin de faire le meilleur usage possible des ressources environnementales disponibles devient inévitable. Ce mode de conception découle d'une connaissance exhaustive de l'environnement et d'une meilleure connaissance des performances énergétiques de l'enveloppe du bâtiment et de ses composants. Cette conception n'est pas nouvelle, elle est plus connue sous l'appellation d'architecture bioclimatique, mais elle n'a jamais réellement réussi à s'imposer comme réponse incontournable aux enjeux d'efficacité énergétique dans le bâtiment. En effet, il est assez difficile de définir des principes de construction systématiquement applicables, alors que cette approche est, par nature, intimement liée au contexte local, à la forme du bâtiment, à son environnement. En outre, on constate un manque de repères en matière d'évaluation du potentiel énergétique de l'environnement d'un bâtiment dans le contexte climatique chaud en générale et chaud et humide en particulier. Il est urgent de pouvoir proposer pour ce contexte une approche facile à suivre pour que les concepteurs puissent intégrer une réflexion bioclimatique, dès les premiers stades de la planification d'un projet. Afin d'aborder correctement cette problématique, il est nécessaire de faire, en premier lieu, le diagnostic du contexte énergétique et de la situation de l'habitat dans les pays chauds en général et à Djibouti en particulier. Notre étude proposera aussi un rappel des différentes interactions entre le bâtiment et son environnement via une analyse détaillée des paramètres climatiques de chaque ressource énergétique de l'environnement.

Le deuxième chapitre développera l'approche bioclimatique en détaillant, d'une part, les différentes démarches de conception bioclimatique, et d'autre part, les outils d'aide à la conception existants dans la littérature scientifique. Notre analyse explorera aussi les solutions bioclimatiques que l'on peut adapter à la conception des bâtiments en climat chaud.

Suite à cette analyse de l'état de l'art, notre démarche consistera ensuite à proposer des nouveaux critères d'analyse qui permette de quantifier les potentiels énergétiques d'un site et les performances

bioclimatiques de solutions constructives au regard de ces potentiels. Nous définirons des indicateurs permettant de mieux caractériser, de façon quantitative, à la fois le climat, mais aussi les solutions techniques que l'on souhaite introduire. Ensuite, ce nouveau jeu d'indicateurs sera appliqué à un cas d'étude, et les résultats seront analysés non seulement de manière globale, sur toute l'année, mais également de manière dynamique.

Finalement, le dernier chapitre est une mise en application des concepts proposés et permet de mettre en avant l'intérêt de notre démarche qui a pour objectif une meilleure conception des bâtiments dans le contexte qui nous préoccupe. Des diverses modifications architecturales et non-architecturales sont appliquées à un modèle de bâtiment et leur influence sur les indicateurs développés seront analysés.

# 1. Contexte de la thermique du bâtiment en climat chaud et humide

---

1.1	<b>Introduction</b>
1.2.	<b>Contexte et enjeux de l'efficacité énergétique dans les bâtiments en climat chaud</b>
1.2.1	Contexte énergétique global des pays au climat chaud
1.2.2	Un pays au climat très chaud et humide : le cas de Djibouti
1.3	<b>Typologie des constructions à Djibouti</b>
1.4.	<b>Le climat de Djibouti</b>
1.4.1.	Informations générales sur le climat
1.4.2.	Analyse des paramètres climatiques significatifs de Djibouti
1.4	<b>Conclusion</b>

---

## 1.1. Introduction

Dans ce chapitre introductif, les caractéristiques et l'état de connaissance concernant les ressources énergétiques de l'environnement sont soigneusement examinées et rigoureusement évalués dans la partie climat. Mais dans un premier temps et afin d'aborder correctement la problématique de cette thèse, nous avons d'abord fait une analyse générale sur le contexte énergétique des pays au climat chaud dans le contexte global en générale et à Djibouti en particulier. La situation djiboutienne peut être utile comme référence pour d'autres régions caractérisées par les climats chauds-humides. Un diagnostic de la situation de l'habitat à Djibouti en particulier est enfin analysé.

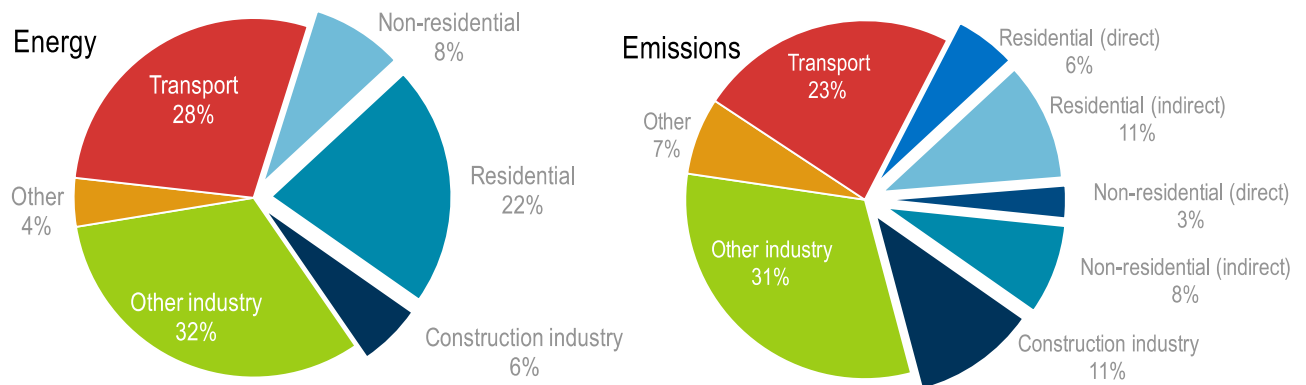
## 1.2. Contexte et enjeux de l'efficacité énergétique dans les bâtiments en climat chaud

### 1.2.1. Contexte énergétique global des pays au climat chaud.

À l'échelle mondiale, le secteur du bâtiment est l'un des premiers postes de consommation énergétique et l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre. La Figure 1.1 montre qu'en 2018, la construction et l'exploitation des bâtiments représentaient 36% de la demande énergétique mondiale, dont 24% pour le seul secteur



résidentiel (GABC, 2018). Cette énergie représente aussi 39% des émissions de gaz à effet de serre comme illustré sur la Figure 1.1.



**Fig.1.1.** Part mondiale de l'énergie et des émissions des bâtiments et de la construction, (GABC, 2018).

Par conséquent, la conception et la construction des bâtiments ont un impact significatif sur la possibilité d'atteindre l'objectif de 2°C fixé dans diverses Conférence des Parties (Conference of Parties, COP). C'est pourquoi, en 2015 lors de la journée dédiée aux bâtiments de la COP21, l'Alliance mondiale pour les bâtiments et la Construction (Global Alliance for Buildings and Construction) a été lancée pour soutenir l'architecture tropicale ayant pour but de produire un cadre méthodologique sur la conception bioclimatique et le confort thermique dans des climats chauds/très chauds et secs/humides (GABC, 2018). En effet, les zones mondiales à fortes constructions actuelles des pays en développement sont souvent situées en zones chaudes.

L'Amérique Centrale et les Caraïbes, une grande moitié Nord de l'Amérique du Sud, la majeure partie de l'Afrique subsaharienne ainsi que l'ensemble du Sud-Est Asiatique figurent en zones tropicales.

L'Asie rassemble déjà 12 des 21 villes de plus de 10 millions d'habitants et présente les taux de croissance urbaine les plus élevés au monde. Sa population pourrait atteindre 2,6 milliards d'ici 2030 (UN-Habitat, 2012a). En Afrique, UN-Habitat (UN-Habitat, 2010) prévoit un doublement de la population et un taux d'urbanisation supérieur à 50% d'ici 2040. Les défis sont d'autant plus significatifs que 75% des bâtiments qui seront présents à cette date en Afrique de l'Est n'ont pas encore été construits. L'Amérique Centrale, les

Caraïbes et l'Amérique du Sud, qui présentent déjà des taux de populations urbaines parmi les plus élevés au monde, avec 80% sur l'ensemble de la zone, verraient cette proportion avoisiner les 90% d'ici 2050 (UN-Habitat, 2012b).

Il sera, cependant, impossible d'atteindre les objectifs des accords de Paris, largement ratifié par ces pays, si tous ces nouveaux bâtiments consomment autant d'énergie que ceux existant déjà.

Actuellement, ces pays aux climats chauds et notamment les pays de l'Afrique sub-saharienne sont déjà confrontés à d'importantes difficultés en termes d'accès à l'énergie et ont en général de faibles consommations d'énergie.

Le pourcentage des ménages ayant accès à l'électricité dans la sous-région est généralement assez bas, avec des valeurs de 1% au Soudan du Sud, 2% au Burundi, 11% en République démocratique du Congo et 12% en Ouganda. La situation des Comores (46%), de Djibouti (55%) et des Seychelles (96%) à cet égard est meilleure (CEA, 2014). Toutefois, ces pays connaissent une croissance économique soutenue. Cette dynamique requiert une production d'énergie beaucoup plus importante et plus performante.

Dans ce contexte, l'augmentation de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment sera encore plus marquée, non seulement à cause de l'augmentation du nombre de bâtiments mais aussi à cause de l'expansion de la climatisation résultant de la croissance économique et de l'amélioration du niveau de vie de la population. Par ailleurs, les démarches de conception bioclimatique sont vues comme moins prioritaires et les institutions qui mettent en place les politiques d'efficacité énergétique ont peu de moyens et peu de légitimité.

En définitive, la priorité absolue pour le secteur du bâtiment est actuellement portée sur la performance énergétique des bâtiments et plus précisément sur la réduction de leur consommation énergétique. Ce défi sans précédent nécessite déjà une transformation radicale des méthodes de conception et de construction. Des nombreux efforts de recherche se portent sur la conception qualifiée de bioclimatique qui est une solution alternative dans les nouvelles constructions. Cette voie considère que le bâtiment doit s'intégrer dans son environnement, en tirant parti des ressources énergétiques qu'on peut y trouver.

### 1.2.2. Un pays au climat très chaud et humide : le cas de Djibouti

Le problème de Djibouti est très symptomatique des pays en voie de développement qui ne disposent d'aucune ressource énergétique conventionnelle et qui dépendent très fortement de l'extérieur pour son approvisionnement énergétique.

La consommation d'énergie primaire a été estimée en 2013 à environ 4.4 GWh hors biomasse, totalement importés de l'extérieur du pays. Les produits pétroliers représentent environ 90% de la demande et le reste est de l'électricité importée de l'Éthiopie (énergie hydraulique) dont la consommation est dominée par le secteur du bâtiment (environ 90% de la consommation électrique du pays) comme illustré sur la Figure 1.2.

Le coût de l'électricité y est très cher (en moyenne 36 FDJ/kWh - 0,20€/kWh) comparé au revenu mensuel moyen par habitant qui s'élève à environ 86 €. Par ailleurs, la production est insuffisante pour répondre aux besoins du pays en électricité. En effet, le pays fait face à un fort taux d'accroissement des aires urbaines. Près de 70% de la population vit en zone urbaine dont près de 60% dans la capitale, Djibouti (CEA, 2014) et l'habitat est en pleine mutation.

La Figure 1.2 montre la répartition de la consommation électrique. Le secteur résidentiel est responsable de 41% de ces consommations. Le reste est ventilé entre institutions publiques et commerce (50 %) ainsi qu'industriels (9%).

La consommation d'énergie du point de vue usages dans les bâtiments résidentiels indique une large dominance des besoins en rafraîchissement qui représentent 38% de la consommation d'électricité (IRENA, 2015). Ce dernier est considéré comme un acquis de base des bâtiments modernes pour atteindre un niveau de confort dans ce pays au climat très chaud.

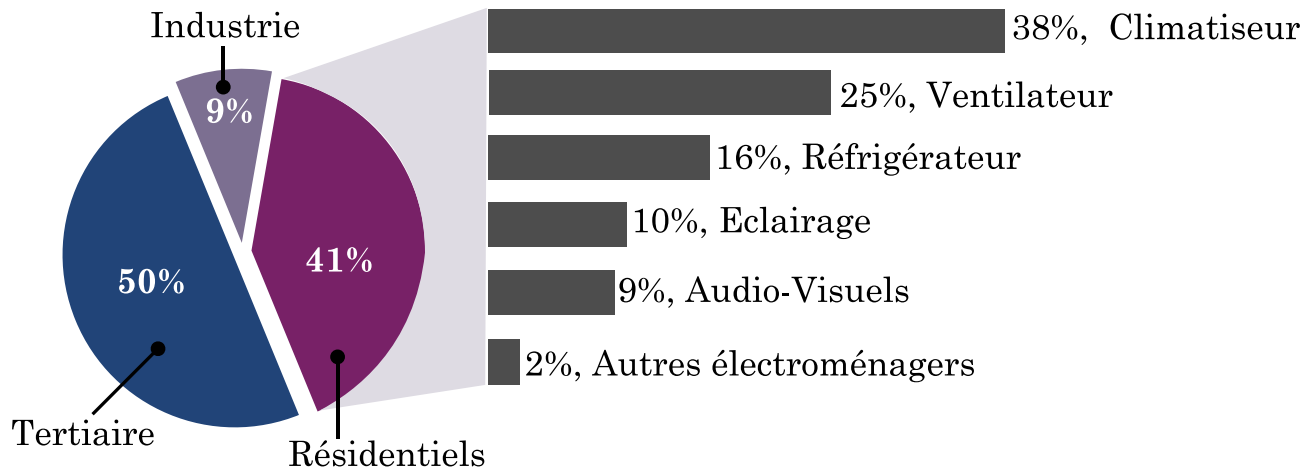


Fig.1. 2. Répartition de la consommation électrique à Djibouti (IRENA, 2015).

Cependant, au stade actuel, la consommation d'électricité annuelle par habitant est de l'ordre de 330 kWh par rapport à la moyenne africaine de plus de 575 kWh et la moyenne mondiale supérieure à 2 770 kWh. Cela fait du citoyen djiboutien moyen l'un des plus faibles consommateurs d'électricité au monde (IRENA, 2015). Toutefois, les perspectives de croissance économique et de la forte augmentation de l'intensité énergétique (rapport entre la consommation totale d'électricité du pays et le PIB) traduits par la construction de nouveaux bâtiments suggèrent de nombreuses possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique, de la production à l'utilisation finale, particulièrement dans le secteur de la construction où l'utilisation de la climatisation est plutôt très élevée.

En outre, il n'existe pas de réglementation sur le volet énergétique à Djibouti, comme dans grand nombre de pays en voie de développement. Le code de la construction existant et les seules références disponibles répondent à des préoccupations fondamentales de stabilité structurelle et n'inclut pas de notion relative à l'énergie ou à l'environnement. D'où la construction de nouveaux bâtiments inadaptés à la chaleur, conçus sans aucune considération concernant l'efficacité énergétique et les règles bioclimatiques nécessitant l'utilisation intensive de la climatisation.

---

### 1.3. Typologie des constructions à Djibouti

L'architecture à Djibouti est marquée par le passé colonial de la ville et est empreinte d'influences d'architecture yéménite et des villes arabes modernes, avec de grands chantiers de constructions omniprésents. Il n'existe pas de trace d'architecture traditionnelle à Djibouti, qui aurait pu fournir des bases pour une architecture bioclimatique.

L'architecture vernaculaire est bien sûr à faible consommation d'énergie, mais le climat est tout simplement un facteur de plus parmi tant d'autres (socio-culturel, économique, disponibilité de matériaux, des ressources techniques et constructives, etc.). Par conséquent, la nécessité des déplacements fréquents, au gré des besoins saisonniers, a conduit les habitants à simplifier au maximum les structures ainsi que le matériel de construction. D'où la construction des huttes de branches transportables (toukous), qui étaient couvertes de nattes, dans le passé, et sont toujours visibles dans les zones rurales. Les activités se déroulent à l'extérieur et le besoin le plus urgent est celui de se protéger des radiations solaires, du vent et de la pluie. Bien évidemment, cette technique traditionnelle a montré son insuffisance pour faire face à la croissance démographique, à l'urbanisation et aux mutations socioculturelles, d'où l'adoption de matériaux et des techniques importées.

Depuis, le développement de la construction a été encadré par l'administration coloniale et quelques typologies des bâtiments coloniaux, toujours visibles dans le paysage urbain de la ville de Djibouti, reflètent cette période avec toutes les influences qui y sont rattachées (Figures 1.3a et 1.3b). Leurs conceptions étaient adaptées aux matériaux et conditions climatiques locaux avant l'ère de la climatisation. Sur le plan thermique, on remarque une forte inertie et une recherche de la ventilation naturelle. En effet, les murs sont faits de gros morceaux de corail local comme le madrépore (50 cm d'épaisseur). Les murs et les ouvertures sont protégés par une galerie extérieure périphérique relativement grande. Aussi, des grandes fenêtres avec des stores mobiles favorisant la ventilation naturelle sont également les réponses de la recherche du confort thermique de ces bâtiments.

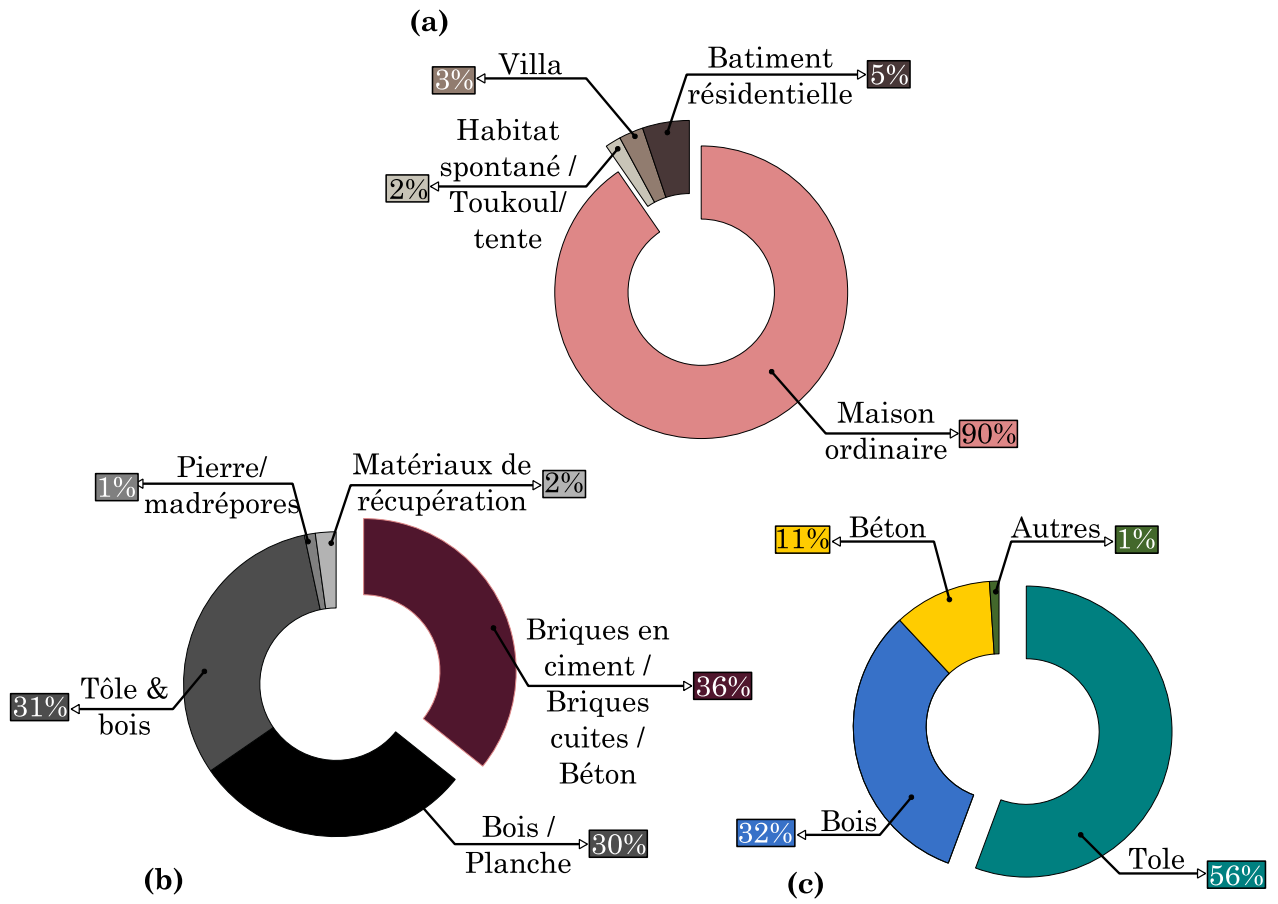


**Fig.1. 3** (a-b) Exemples d'architecture coloniale, (c-d) exemples de bâtiments contemporains.

De nos jours, les nouvelles constructions à Djibouti restent très humbles en comparaison d'autres pays de la région qui font l'objet d'un développement plus rapide. Les passages d'air via les grandes ouvertures sont plus réduits et substitués en grande partie par l'utilisation de climatiseurs (Figure 1.3). L'architecture actuelle repose complètement sur la climatisation. Cela favorise l'émergence, d'une part, de bâtiments modernes inadaptés au contexte climatique chaud-humide, et d'autre part, de constructions informelles occupées par une population pauvre qui doit s'adapter au stress thermique et se contenter des matériaux précaires et des équipements les moins performants.

Ajibola (Ajibola, 1997) note que dans beaucoup de régions en Afrique, les bâtiments modernes semblent être des répliques de bâtiments des pays européens dans la forme et la structure malgré des différences climatiques.

La Figure 1.4 présente les typologies de bâtiments du secteur résidentiel et les types de matériaux qui sont utilisés.



**Fig.1. 4.** - (a) Typologies de construction à Djibouti, (b) Type de matériaux pour les murs (c) Nature des matériaux utilisés pour la toiture de la maison, pour un échantillon de 62548 logements (INSD, 2019).

La maison dite ordinaire représente la part la plus importante avec 90% des typologies de construction (Figure 1.4a). Le reste est partagé entre les bâtiments résidentiels à plusieurs étages, les villas et les « toukoul » qui constituent des bâtiments extrêmement précaires et se trouvent dans les bidonvilles urbains. Ces derniers entrent logiquement dans un cadre d'actions stratégiques à vocation sociale autre que celui de performance énergétique du bâti.

Les moyens financiers limités conduisent une grande partie de la population à adopter la tôle comme matériau de toiture (56% sur la Figure 1.4c) tout en gardant une maçonnerie structurale en matériaux, telle que la brique alvéolée de ciment communément appelée parpaing (36% sur la Figure 1.4b). Ce dernier forme les murs extérieurs et intérieurs des bâtiments. Il peut être confectionné facilement sur le site de la construction, ce qui évite tout acheminement coûteux. Il est très résistant et apprécié pour sa facilité de

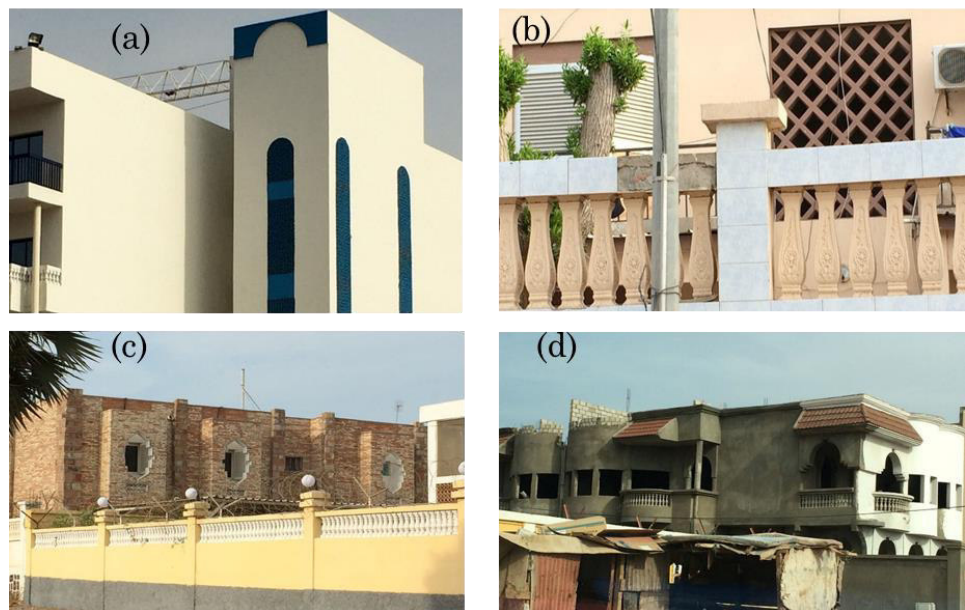
pose. Concernant la toiture, la toiture en tôle domine la construction à Djibouti (Figure 1.4c).

Cependant, à la connaissance de l'auteur, ce type de construction semble laisser la place à la toiture-terrasse (toiture massive) et aux tuiles dont le savoir-faire est importé des pays développés, dans la plupart des maisons urbaines nouvellement émergentes.

La toiture en béton (11%) possède une grande durabilité qui offre au bâtiment une durée de vie élevée et sa résistance permet de construire en plusieurs niveaux facilitant ainsi une meilleure gestion des espaces. Toutefois, elle offre aussi beaucoup de potentiel d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment.

Ainsi, à Djibouti, les logements sont dans leur majorité en parpaings de ciment (mur à forte inertie) surmontés de toitures en tôles. Aussi, la peinture des murs semble être la norme, mais les toits sont souvent laissés tels quels.

On peut aussi y constater l'inexistence de l'isolation dans la construction et l'enveloppe est loin d'être performante. La conception bioclimatique et l'utilisation de techniques passives sont des solutions faiblement explorées.



**Fig.1. 5.** Quelques exemples d'architectures bioclimatiques à Djibouti : (a) Escalier d'immeuble de logement collectif avec briques ajourées (peintes en bleu) forçant la ventilation naturelle ; (b) Ombrage par volets et persiennes – briques ajourées pour ventilation forcée ; (c) Cage d'ombrage des fenêtres avec grilles de ventilation ; (d) Casquettes d'ombrage des fenêtres.



La traversée de la ville de Djibouti permet toutefois de facilement découvrir des détails architecturaux bioclimatiques (Figure 1.5) dont des forçages naturels de ventilation par cage d'escaliers de desserte dans des immeubles à appartements utilisant des briques ajourées, l'ombrage par volets et persiennes, des cages d'ombrage des fenêtres avec grilles de ventilation, des casquettes d'ombrage des fenêtres, entre autres. Aussi, il faudrait étendre et généraliser l'utilisation de ces techniques pour promouvoir l'utilisation des ressources énergétiques de l'environnement et ainsi réduire la consommation énergétique. Selon le point de vue de l'auteur, les premiers pas indispensables et possibles dans l'immédiat vers des bâtiments moins inefficaces, du point de vue thermique ne supposent pas de plan d'investissements massifs, mais une adaptation du bâtiment au climat.

En outre, peu d'études ont été réalisées sur les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux locaux tels que les pouzzolanes ou les perlites pour les valoriser. Pourtant, vu leur accessibilité, ils pourraient constituer une alternative intéressante au parpaing de ciment. Les matériaux locaux souffrent d'un déficit d'image positive. L'absence de technique, de réglementation et de principes sur la construction durable ne contribuent pas à l'émergence de ces matériaux.

---

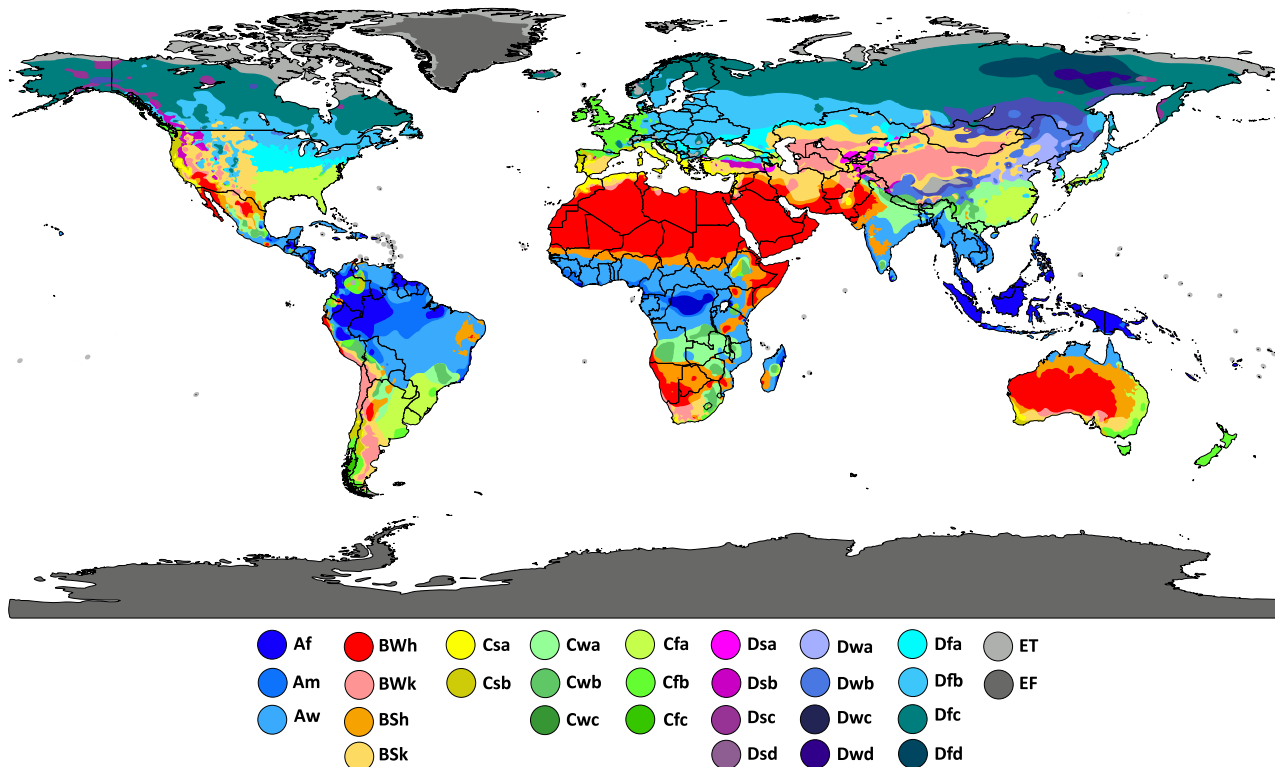
#### 1.4. Le climat de Djibouti

L'environnement des bâtiments ou le climat local est généralement identifié comme l'un des paramètres de conception qui déterminent fortement la consommation énergétique des bâtiments. C'est la valeur clé de l'architecture bioclimatique (voir chap. 2, sect.2.2). En effet, une analyse et une connaissance des caractéristiques physiques des ressources énergétiques de l'environnement peuvent être essentielles pour le développement d'une telle architecture et faciliter l'amélioration des performances du bâtiment. C'est ainsi que l'on peut alors déterminer la double influence de ces ressources locales. Cette influence peut être soit une contrainte pour le bâtiment lorsqu'elle n'est pas désirée ou soit exploitable lorsque qu'elle est potentielle ou que la ressource agit comme un puits de chaleur.

L'objectif de cette section est de présenter les caractéristiques et l'état des connaissances des principaux paramètres climatiques qui doivent être pris en compte dans la conception des bâtiments dans le contexte climatique chaud et humide et doivent donc être compris par les concepteurs.

#### 1.4.1. Informations générales sur le climat

Des classifications climatiques sont utilisées pour illustrer les caractéristiques physiques du climat d'un site dans lequel un projet de construction va être développé et offrir une première vue d'ensemble aux concepteurs. L'organisation d'une grande quantité de données et leur présentation de manière simple et claire est l'idée principale derrière tous les systèmes de classification du climat. Bien que vieux de plus de 100 ans, le système de classification Köppen-Geiger (K-G) sur la Figure 1.5, est l'une des classifications climatiques les plus largement utilisée (Cunha and Schöffel, 2011; Köppen, 2011; Peel et al., 2007; Rohli and Vega, 2018).



**Fig.1. 6.** Classification climatique de Köppen-Geiger.

Le système est basé sur les données de température et de précipitations et divise le climat mondial autour de cinq grands groupes, à savoir tropical (A), aride (B), tempéré (C), froid (D) et polaire (E), avec plusieurs sous-classes supplémentaires, tous libellés en deux ou trois lettres. Les pays aux climats très chauds sont par exemple classés dans la rubrique « climat désertique chaud » BWh, comme illustré sur la Figure 1.6, et représente la sous-classe la plus vaste avec 14,2% des zones à l'échelle mondiale. La lettre W désigne la

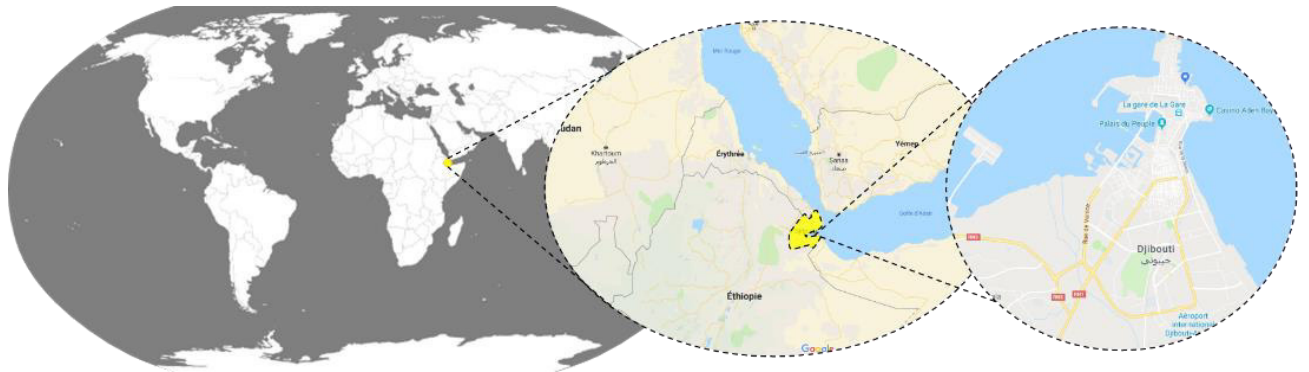
sous-classe désertique avec une pluviométrie très faible et si en plus les conditions climatiques du site présentent des températures de l'air extérieur extrêmement élevées, il est classé h, comme « hot ». Sous ce terme sont classés une partie de l'Afrique saharienne, dont Djibouti, la péninsule Arabique, quelques endroits de l'Inde et des Etats-Unis et le centre de l'Australie.

Une classification climatique simplifiée, ne comprenant que quatre types de climat (c'est-à-dire chaud-aride, chaud-humide, tempéré et froid) est aussi proposée dans la littérature à partir du modèle K-G (Rohli and Vega, 2018). Il existe d'autres systèmes de classification climatique tels que Thornthwaite ou Holdridge (Rohli and Vega, 2018). L'ASHRAE comporte aussi, dans sa norme 90.1, un système de classification de climat 1A (très chaud et humide), 1B (très chaud et sec) qui englobe les pays avec des conditions de température à plus de 5000 degrés jour de rafraichissement (DJR) à partir d'une température de 10°C.

Ce climat chaud varie en fonction de la position du site. Il existe des différences significatives entre les étés et les hivers, les amplitudes de température au cours d'une journée, la teneur en humidité de l'air et le taux de précipitation. Outre la latitude et l'altitude, la proximité de l'océan est la principale raison de ces différences climatiques. Dans les climats chauds et secs, l'humidité de l'air est nettement inférieure. Le manque de couverture nuageuse et la basse humidité relative entraînent, non seulement, des niveaux élevés de rayonnement solaire, mais également, la re-émission d'une grande partie de ce rayonnement par grande longueur d'onde ; cela se traduit par une grande variation de température jour-nuit.

Dans les zones désertiques proches de la mer qualifiée dans la littérature de « désert maritime », les températures de l'air ne sont que légèrement en dessous de celles observées dans un désert de l'intérieur, mais la présence d'un océan chaud, dans les environs, crée un taux d'humidité élevé. En plus de cela, les endroits sous ce climat chaud et humide sont caractérisés par de petites variations journalières des températures.

Les principales caractéristiques de ce climat et son implication pour la conception des bâtiments seront examinées, en prenant la ville de Djibouti comme exemple, dans les sous-sections ci-dessous.



**Fig.1. 7.** Emplacement de Djibouti sur la carte.

#### 1.4.2. Analyse des paramètres climatiques significatifs de Djibouti

L'objectif de cette section est de présenter les particularités des paramètres climatiques à Djibouti afin de quantifier leurs apports d'un point de vue énergétique. Les choix de ces paramètres dépendent en grande partie de l'utilisation prévue de ces informations. En ce qui concerne la conception du bâtiment, les paramètres climatiques déterminant la réponse thermique des bâtiments sont principalement :

- Le rayonnement solaire mesuré par un pyranomètre mesurant le flux global horizontal, valeur comprenant le rayonnement direct ainsi que le diffus.
- La température de l'air mesurée avec un thermomètre sous abri météorologique à une hauteur de 1,2 à 1,8 m au-dessus du sol.
- L'humidité de l'air, généralement exprimée sous forme d'humidité relative (HR) en pourcentages et mesurée par un hygromètre ou un psychromètre.
- Le vent, mesuré par un anémomètre à une hauteur de 10 m en zone dégagée.
- En plus des paramètres climatiques présentés ci-dessus, des facteurs supplémentaires sont inclus afin d'élaborer davantage les conditions climatiques. Parmi celles-ci, la précipitation, la température du ciel mesurée à l'aide d'un pyrgéomètre via l'intensité du flux rayonné par l'atmosphère, la température du sol mesurée à partir d'un thermomètre. Les deux derniers paramètres peuvent aussi dériver des autres paramètres climatiques.

1.4.2.1. Radiation solaire

Les données horaires moyennes du rayonnement solaire global sur une surface horizontale, présentées sur la Figure 1.8a, démontrent un niveau de radiation constamment élevé pendant toute l'année à Djibouti, avec des pics d'ensoleillement d'environ 1000 W/m<sup>2</sup> entre 10h-14h. Les valeurs moyennes mensuelles de radiations solaires journalières sont entre 7.5 kWh/m<sup>2</sup> à 8.5 kWh/m<sup>2</sup> par jour (Figure 1.8b). La portion de radiation directe est systématiquement supérieure à la portion de rayonnement diffus. Pour la ville de Djibouti, la part mensuelle moyenne de rayonnement direct est en moyenne 65% (Figure 1.8b). Avec un rayonnement global total de 2 898 kWh/(m<sup>2</sup>.an), ce type de climat reçoit la plus grande quantité de rayonnement solaire comparé à d'autres endroits.

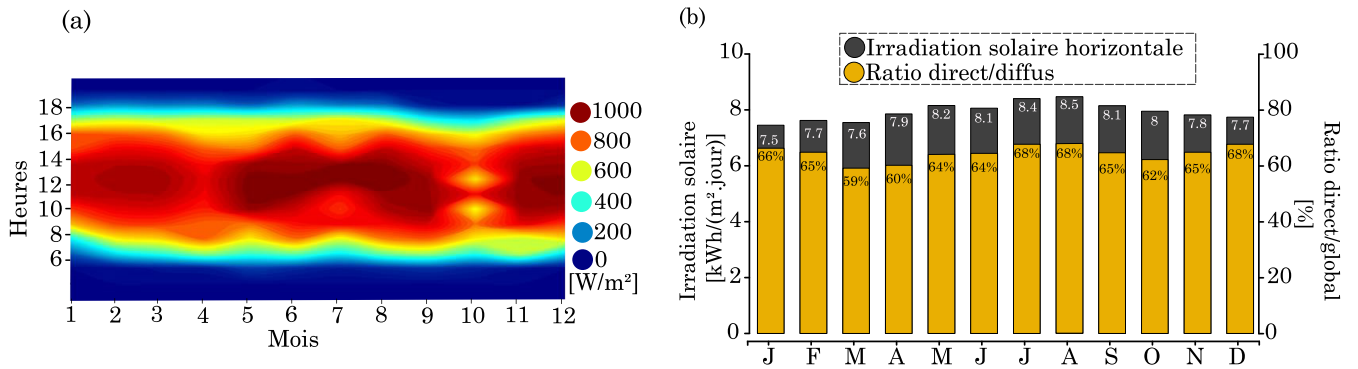


Fig.1. 8 - (a) Contour de radiation solaire globale horizontale et (b) Rayonnement journalier moyen mensuel et ratio direct / global à Djibouti, climat chaud-humide

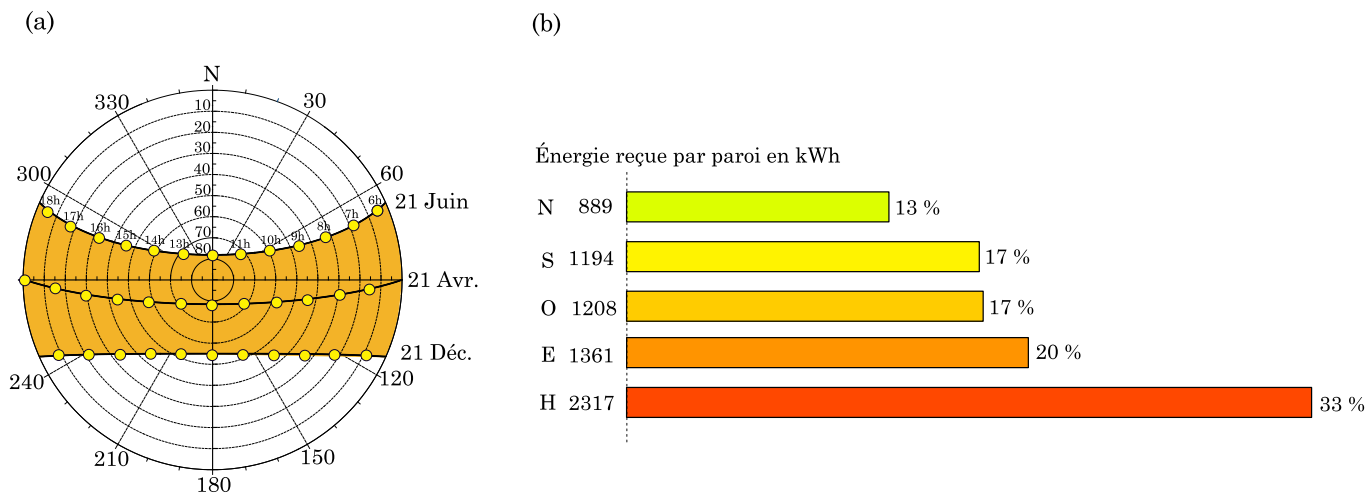
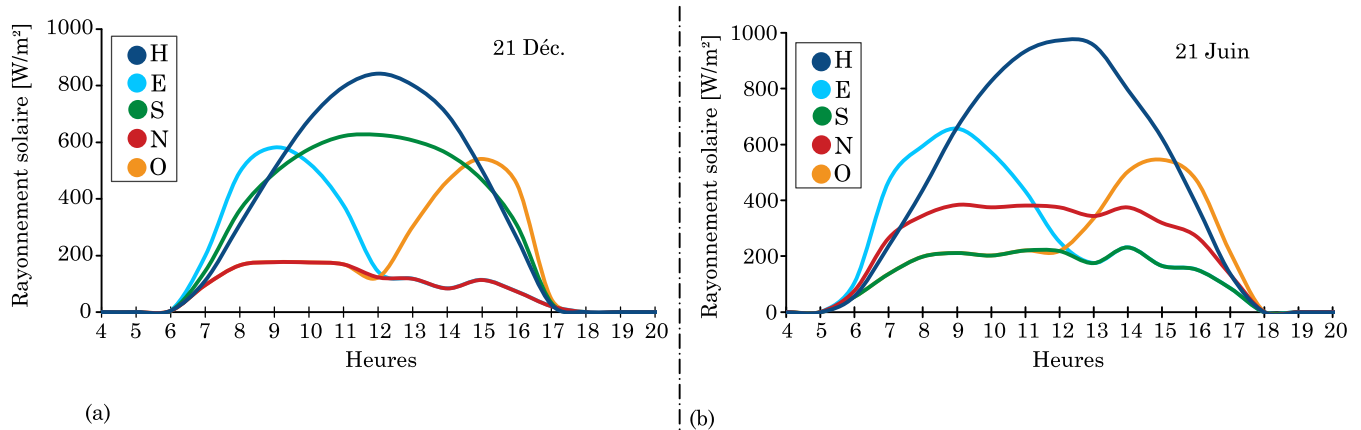
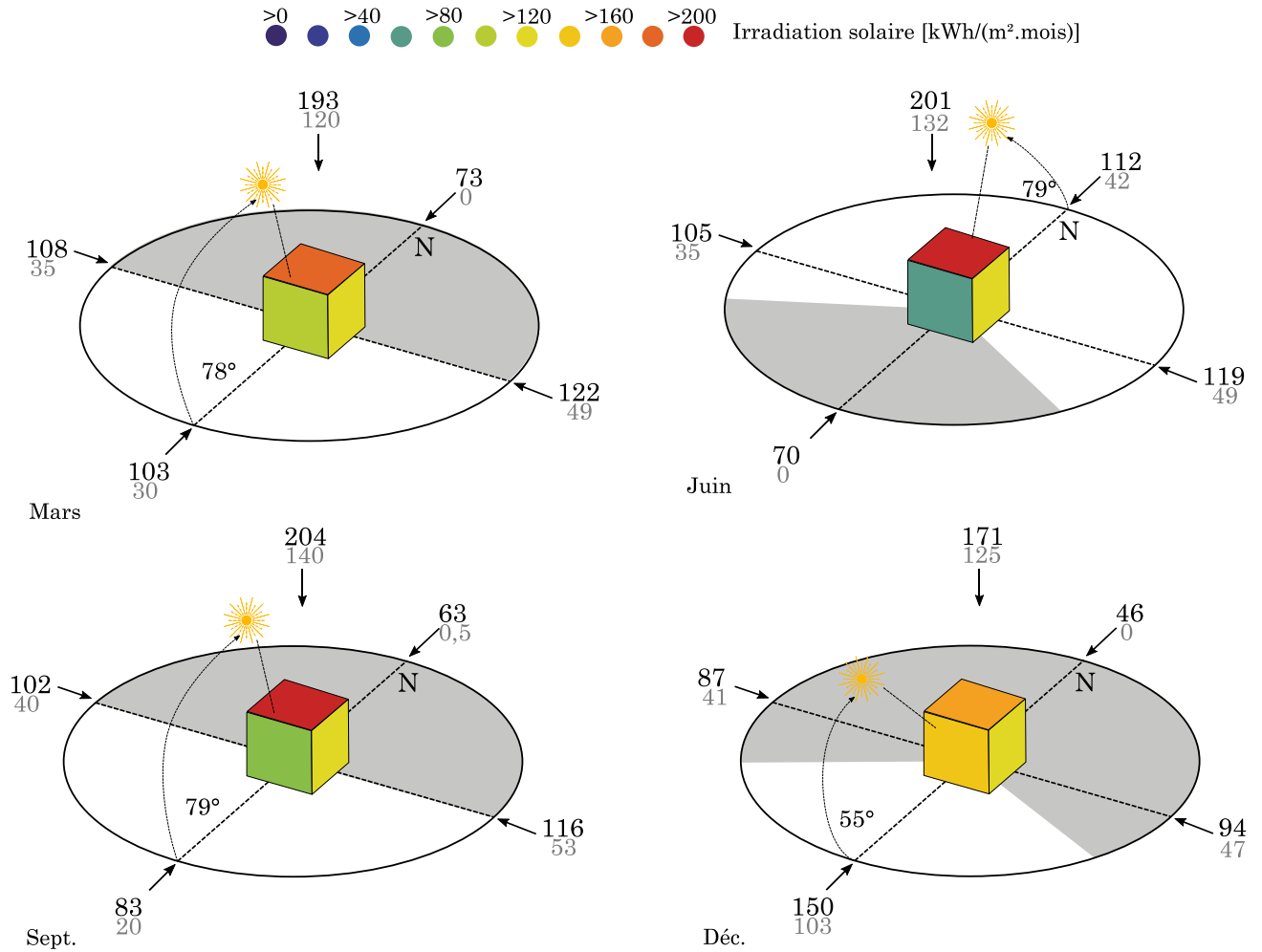


Fig.1. 9. (a) Projection stéréographique du parcours du soleil sous la latitude de Djibouti - 11°30 N et (b) Energie reçue par paroi du bâtiment.



**Fig.1. 10** - Rayonnement solaire sur un plan horizontal et sur un plan vertical pour différentes orientations (a) pour une journée typique de décembre (b) Pour une journée typique de juin.

Pour les applications de conception de bâtiments, le rayonnement solaire est également présenté comme reçu par les surfaces verticales (c'est-à-dire les murs) à différentes orientations. Pour cela, la visualisation géométrique de la course du soleil est un outil fréquemment utilisé dans la conception des bâtiments bioclimatiques pour analyser l'exposition d'une surface spécifique ou l'efficacité d'un système d'ombrage sur un bâtiment. Dans un diagramme solaire, la position du soleil par rapport à un référentiel local est définie par deux angles : l'azimut et la hauteur du soleil (Figure 1.9a). La trajectoire du soleil est projetée sur un plan horizontal. Les cercles concentriques en pointillé représentent la hauteur du soleil (en degrés par rapport au plan) ; sur le cercle périphérique, est reporté l'azimut (lignes radiales) et la trajectoire du soleil est indiquée pour différentes dates et à différentes heures de la journée. Au solstice d'été (21 juin) par exemple, le soleil a une trajectoire Nord-Est/Nord-Ouest avec une hauteur maximum de  $79^\circ$ . Lors du solstice d'hiver (21 décembre), le soleil a une trajectoire Sud-Est/Sud-Ouest avec une hauteur maximum de  $55^\circ$ . Toutes les façades ainsi que les toits sont donc susceptibles d'être ensoleillées au cours de l'année à Djibouti et, par conséquent, l'intensité du rayonnement solaire reçue par le bâtiment résulte de l'orientation du bâtiment. La Figure 1.11 montre la quantité d'énergie mensuelle qui pourrait atteindre l'enveloppe d'un bâtiment représenté par un cube.



**Fig.1. 11.** Irradiation solaire et position du soleil à Djibouti. Les côtés du cube indiquent la quantité d'énergie reçue en kWh/m<sup>2</sup> pour un mois donné. Les nombres en noir quantifient le niveau d'irradiation globale et ceux en gris l'énergie solaire directe sur une surface donnée. La hauteur solaire maximale et l'angle d'azimut sont également inclus pour chaque mois.

En raison de la proximité de Djibouti avec l'équateur, l'angle d'incidence du rayonnement est relativement haut toute l'année. Le seul moment où le niveau global élevé de rayonnement solaire diminue quelque peu est pendant la saison fraîche (décembre). Pendant cette période, les façades sud reçoivent le plus de rayonnement (150 kWh/m<sup>2</sup> dont 103 kWh/m<sup>2</sup> par mois atteignant directement la paroi). Pendant les mois d'été (juin), les façades orientées au nord, à l'est et à l'ouest reçoivent le plus de rayonnement (112 kWh/m<sup>2</sup>, 119 kWh/m<sup>2</sup> et 103 kWh/m<sup>2</sup> par mois, respectivement). Les côtés sud des bâtiments reçoivent le moins de radiations à cette période de l'année, ne recevant que des radiations diffuses. Sur une journée type, les surfaces situées à l'est et l'ouest captent la même

quantité d'énergie soit 37% de l'énergie solaire atteignant le bâtiment (Figure 1.9b), alors que les façades nord reçoivent les niveaux de rayonnement les plus faibles (13% de l'irradiation totale d'un bâtiment comme indiqué sur la Figure 1.9b) toute l'année sauf en été. Pendant les périodes de transition (vers mars et septembre), ce sont plutôt les façades sud, est et ouest qui captent le plus d'énergie. Dans tous les cas, les surfaces horizontales sont toujours celles qui recueillent la plus grande quantité d'irradiation solaire (jusqu'à plus de 200 kWh/m<sup>2</sup> par mois), approximativement 33% de l'énergie solaire atteignant le bâtiment pendant l'année (Figure 1.9b) et des pics d'éclairement d'environ 1000W/m<sup>2</sup> par jour (Figure 1.10 b).

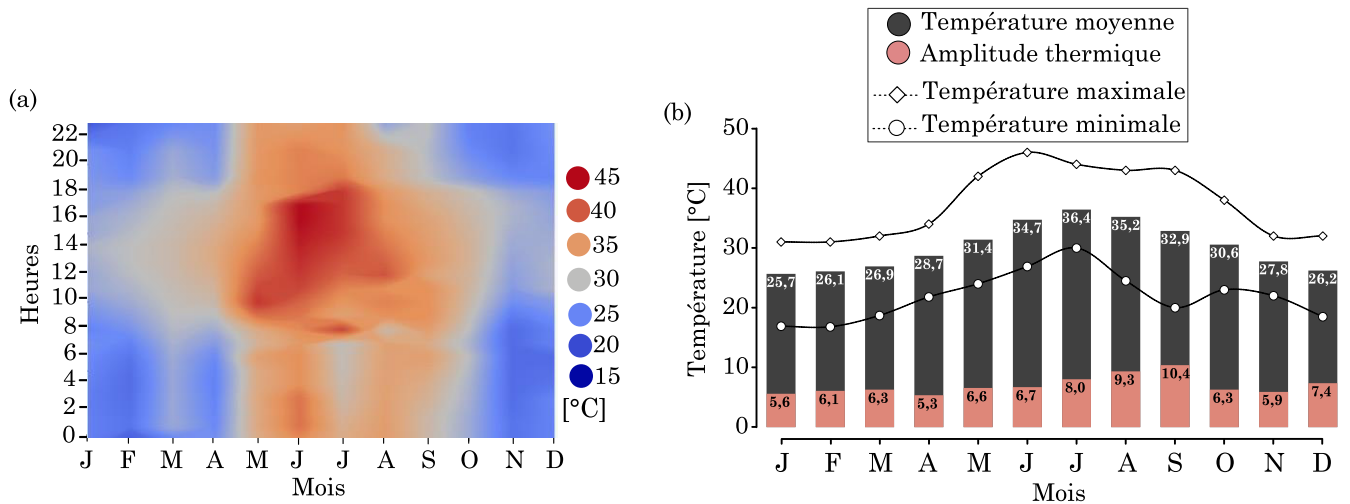
En conclusion, toutes les façades reçoivent du rayonnement direct. De plus, on observe une quasi-symétrie des rayonnements sur les façades Est-Ouest mais aussi Nord-Sud. Chacune de ces surfaces devra donc faire l'objet de considérations spéciales afin d'être protégées de la chaleur ou pour empêcher la transmission de la chaleur qu'elle reçoit vers l'intérieur du bâtiment (quelques solutions sont proposées dans le chap.2, sect.2.4).

#### 1.4.2.2. *Température*

Le niveau élevé de rayonnement solaire précédemment décrit entraîne également des températures de l'air élevées. Les contours de températures présentés sur la Figure 1.12a, permettent d'estimer la température moyenne de l'air pour n'importe quelle heure, à n'importe quelle saison de l'année. En lisant verticalement la colonne d'un mois, on peut voir les variations de température à chaque heure. En lisant horizontalement, on peut observer les changements mensuels de la température, à chaque heure de la journée. Ce graphique met en évidence deux périodes. Une première période, la saison fraîche, qui s'étend de novembre à avril où le climat est plutôt agréable avec des températures moyennes comprises entre 18°C et 34°C la journée et 17°C et 32°C la nuit. Durant cette période et surtout durant les nuits, l'air extérieur peut être considéré comme un puits d'énergie permettant de rafraîchir les bâtiments. Une deuxième période, saison chaude, entre mai et octobre, avec des températures très élevées : 24 à 46°C la journée, 20 à 42°C la nuit.

Ainsi un climat chaud est garanti toute l'année.





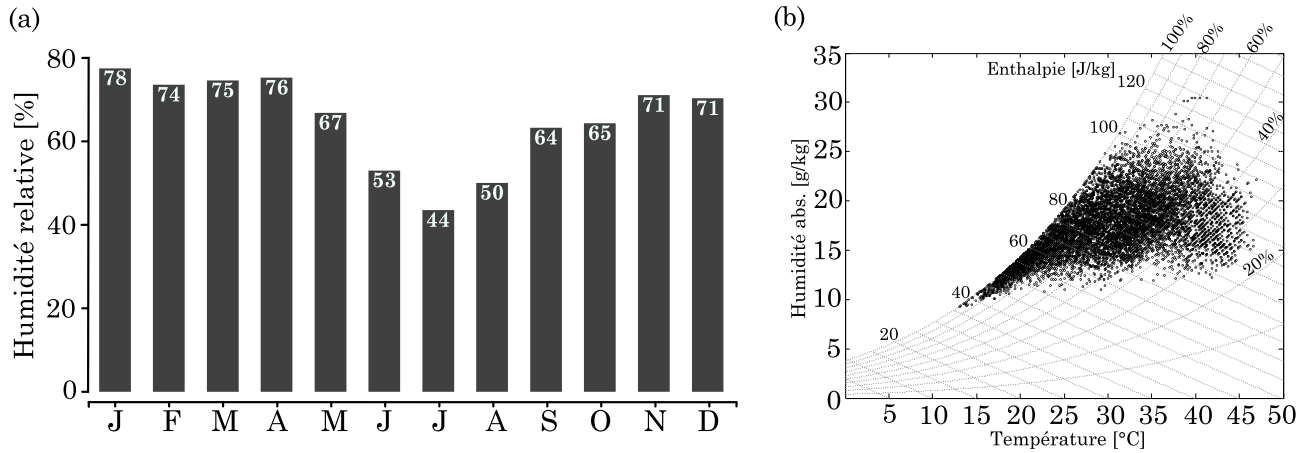
**Fig.1. 12** Variation de température horaire moyenne de l'air et (b) Température mensuelle (max., min. et moy.) de l'air et amplitude thermique à Djibouti.

Les données de la température de l'air ont été également présentées sous forme de distribution de la moyenne mensuelle et de variation de température jour-nuit sur la Figure 1.12b. Il en résulte des températures moyennes comprises entre environ 26°C en Janvier et 36°C en Juillet. De plus, des amplitudes thermiques faibles sont garanties tout au long de l'année. Toutefois, la différence entre les températures minimales et maximales pendant les mois chauds est légèrement plus élevée que pendant les mois de la saison fraîche plus frais.

En conclusion, il existe seulement quelques mois où la température peut profiter au confort et au rafraichissement.

#### 1.4.2.3. Humidité

Une autre particularité du désert maritime est la forte humidité de l'air. Cette dernière est généralement mentionnée en valeurs relatives, comme la proportion de vapeur d'eau disponible dans l'air par rapport à ce qu'elle peut contenir au maximum. Djibouti a des variations d'humidité relative moyenne mensuelle allant de 44% en juillet à 78% en janvier (Figure 1.13a). Les valeurs les plus extrêmes sont de 4% pendant les heures les plus chaudes des mois d'été et 100% se produisant systématiquement pendant les heures de nuit en saison fraîche.



**Fig.1. 13** – (a) Humidité relative moyenne mensuelle et (b) diagramme psychrométrique à Djibouti.

Le diagramme psychrométrique présenté dans la Figure 1.13b est aussi un moyen pratique de comprendre comment la combinaison de la température et de l'humidité pourraient affecter les besoins de rafraîchissement et le confort d'un bâtiment. L'axe horizontal décrit la température de l'air, l'axe vertical décrit la quantité réelle de vapeur d'eau dans l'air et les courbes décrivent l'humidité relative. Le diagramme a deux limites qui sont des limites absolues. Le bord inférieur décrit l'air qui est complètement sec (0% HR) et la limite supérieure incurvée décrit l'air qui est complètement saturé de vapeur d'eau (100% HR). Chaque point du diagramme psychrométrique représente les caractéristiques de l'air extérieur à une heure particulière. À cela s'ajoute des précipitations très variables et très rares avec une pluviométrie annuelle de 50 à 300 millimètres.

Il en résulte un climat très chaud et humide toute l'année en raison de la proximité de la ville avec la mer. Cette forte humidité de l'air peut être problématique à la perte de chaleur par rayonnement grande longueur d'onde des surfaces et contribue à des variations jour-nuit mineures des températures de l'air.

#### 1.4.2.4. Vent

Les informations sur les caractéristiques du vent pour un site spécifique peuvent être combinées visuellement dans une rose des vents. Cette dernière permet de regrouper les trois informations essentielles dans un même graphique : la vitesse, la direction et la fréquence du vent par secteur. Il est possible de la tracer sur toute la période étudiée afin d'obtenir une information moyenne ou bien de la décomposer à des pas de temps plus courts pour visualiser

l'évolution moyenne du vent heure par heure. La Figure 1.14 montre la rose des vents de Djibouti sur quatre périodes ; décembre-janvier-février (D-J-F), mars-avril-mai (M-A-M), juin-juillet-août (J-J-A) et septembre-octobre-novembre (S-O-N). La longueur de chaque rayon est proportionnelle à la fréquence à laquelle le vent souffle de cette direction sur un mois donné. Chaque cercle concentrique représente une fréquence différente, allant de zéro au centre à des fréquences de plus en plus élevées vers l'extérieur. Dans la rose des vents, les plages de vitesse de vent sur les rayons sont représentées par des bandes de couleurs différentes. Les valeurs les plus utiles sont les moyennes sur une longue période.

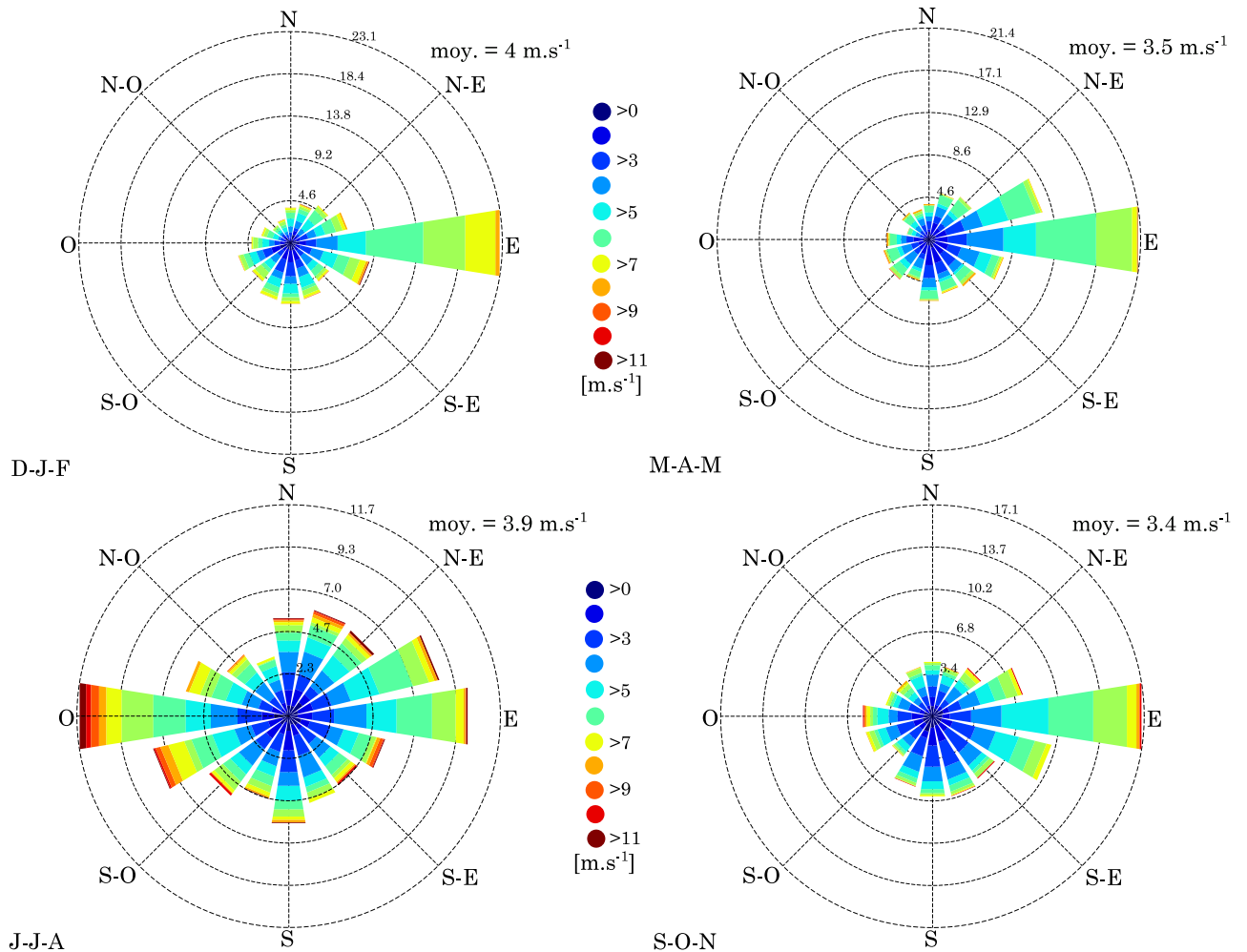


Fig.1. 14 Rose des vents indiquant l'intensité, la direction et la fréquence du vent pour Djibouti.

La Figure 1.14 révèle une influence continentale avec un vent dominant de direction Ouest générés par le plateau Ethiopien en été. Ce vent que l'on nomme « Khamsin » est sec et brûlant. Durant la

saison fraîche la ville est balayée par des vents de secteur Est générés par les alizés, vents humides en provenance d'Arabie et du Golfe d'Aden (influence océanique). La vitesse moyenne annuelle des vents est de 3.7 m/s.

Ces représentations sont une première approche, permettant d'avoir une rapide vue d'ensemble du profil de vent d'un site pour une application en ventilation naturelle. Ils indiquent également les moments et les périodes où les vents de l'extérieur agissent comme une contrainte à éviter absolument à cause de la chaleur qu'ils transportent. C'est le cas du Khamsin. Non seulement Djibouti souffre de la chaleur des vents d'ouest en été, mais aussi de la poussière qu'ils transportent.

#### 1.4.2.5. *Température du ciel*

Toutes les surfaces externes de l'enveloppe du bâtiment exposées au ciel subissent un échange de chaleur radiatif dans le spectre infrarouge à grande longueur d'ondes (c'est-à-dire entre 3 et 100 $\mu$ m). Bliss (Bliss, 1961) a estimé que 90% de ce rayonnement atmosphérique reçu au niveau du sol provient de la couche atmosphérique située en deçà d'1km d'altitude. Il est possible de mesurer l'intensité de ce rayonnement ou de connaître sa distribution spectrale à l'aide de logiciels basés sur des modèles de transfert radiatif entre les différentes couches de l'atmosphère. Afin de mieux quantifier l'influence de l'échange de rayonnement à grande longueur d'onde (GLO) sur la surface externe d'un bâtiment, de nombreux modèles et corrélations empiriques ont été proposés depuis le travail pionnier de (Ångström, 1915). Ces modèles sont basés sur différentes approches pour définir le ciel. Il peut être pratique, d'un point de vue calculatoire de considérer l'atmosphère comme un corps noir global, défini en termes d'une température apparente de rayonnement ( $T_{sky}$ ), appelée température de ciel, ce qui est fictive, mais permet notamment de simplifier les calculs de rayonnement entre le ciel et l'enveloppe du bâtiment. Une autre approche considère la voûte céleste comme un corps gris à faible altitude auquel on attribue une température apparente de rayonnement et une émissivité apparente ( $\varepsilon_{sky}$ ). Dans la littérature, il existe plusieurs modèles pour estimer la température et l'émissivité du ciel (Berdahl and Fromberg, 1982; Berdahl and Martin, 1984; Berger et al., 1984; Bliss, 1961; Garg, 1982; Swinbank, 1963). La plupart de ces modèles s'appliquent aux conditions de ciel dégagé. D'autres modèles utilisent des facteurs de correction pour tenir compte de la couverture nuageuse moyenne (Aubinet, 1994; Clark and Allen, 1978; Kasten and Czeplak, 1980). Algarni (Algarni, 2015) a catégorisé ces modèles en fonction des approches de calcul. Il distingue

deux groupes de modèles comme indiqués sur la Figure 1.15 : les expressions pour un ciel clair et pour un ciel nuageux.

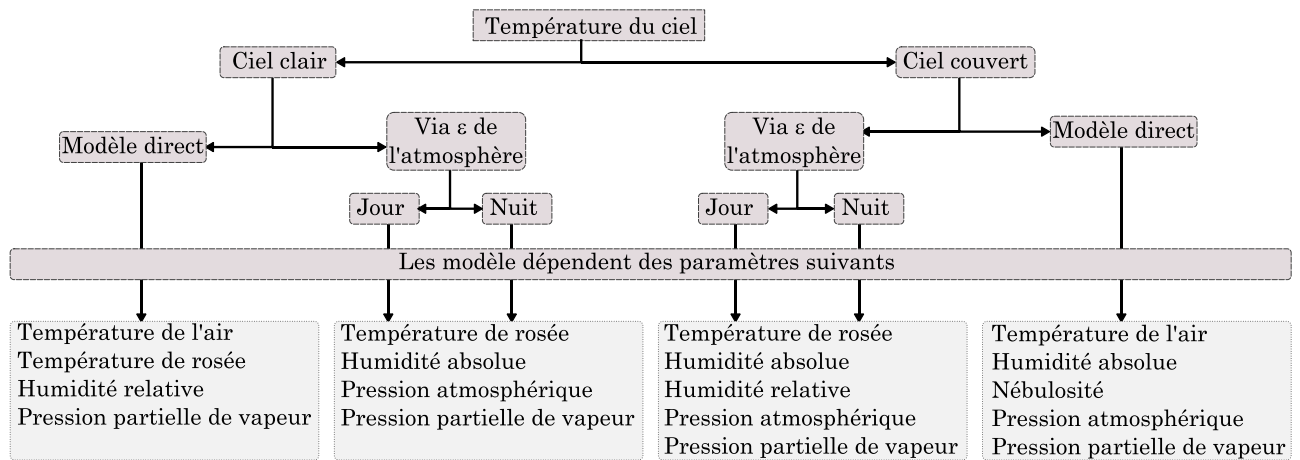


Fig.1. 15. Classification des modèles empiriques pour l'estimation de la température du ciel (Al-garni, 2015)

La plupart de ces modèles de température du ciel sont proposés de manière approximative en raison du manque de données mesurées. Étant donné qu'ils sont limités à certaines conditions météorologiques et à certains sites, chaque modèle peut ne pas s'appliquer à différents sites et conditions climatiques. En plus, l'accord des températures du ciel calculées par différentes corrélations est très pauvre.

Dans la littérature, on peut noter un manque de travaux sur le rayonnement GLO dans les bâtiments en climat chaud. À ce jour, aucune donnée sur l'importance des radiations GLO n'existe à Djibouti. Ce constat explique notre choix de modéliser la température du ciel grâce au modèle de Clark et Allen (Clark and Allen, 1978), utilisé aussi par le programme de simulation EnergyPlus pour obtenir la température de ciel via le calcul de l'émissivité apparente de la voûte céleste.

La Figure 1.16a montre les contours de température du ciel à Djibouti. Il en résulte plus de fraîcheur pendant l'hiver avec des températures moyennes comprises entre 12°C et 29°C la journée et entre 11°C et 27°C la nuit. Tandis que pour l'été chaud, les températures moyennes sont comprises entre 13°C à 37°C la journée et entre 13°C à 32°C la nuit.

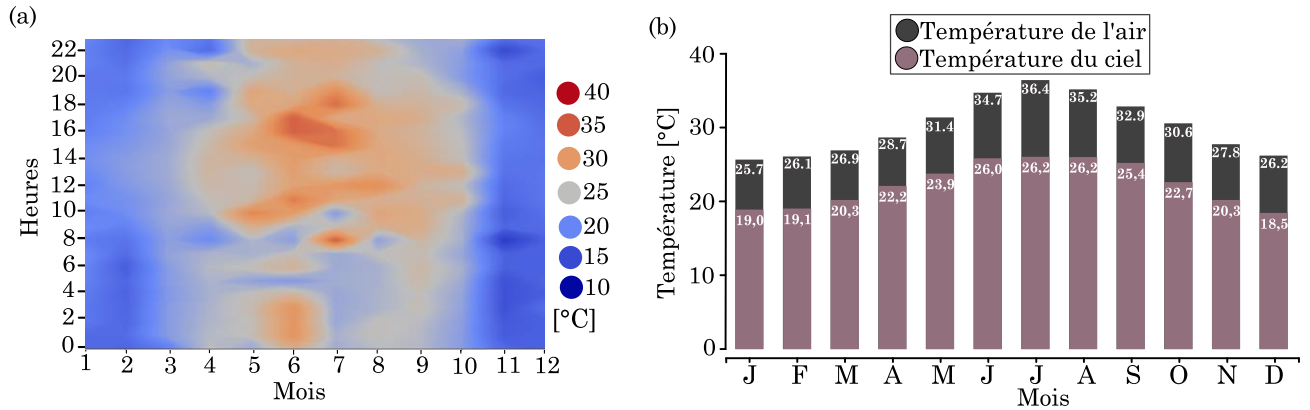


Fig.1. 16 (a) Variation de température horaire moyenne du ciel et (b) Comparaison entre les moyennes mensuelles de la température du ciel et celle de l'air à Djibouti.

Une comparaison entre la température moyenne mensuelle du ciel et la température de l'air à Djibouti est présentée sur la Figure 1.16b et plusieurs constats peuvent être tirés de son observation. Le modèle utilisé donne une température de ciel, comprise en moyenne entre 19°C et 26°C, systématiquement inférieure à la température de l'air. Une surface à la température de l'air extérieur émettra donc plus d'énergie vers la voûte céleste qu'elle n'en reçoit de cette dernière : le ciel se comportera plutôt comme une source de fraîcheur, exploitable pour réduire les besoins d'un bâtiment. De plus, la différence entre la température de l'air ambiant et la température du ciel est plus élevée durant la saison chaude. Cela est dû à des températures de l'air élevées et n'implique pas forcément plus de fraîcheur disponible. Cependant, la corrélation empirique utilisée pour l'estimation de l'émissivité et de la température du ciel n'étant pas précise, des données locales sont nécessaires si des applications basées sur l'exploitation de la voûte céleste doivent connaître un véritable développement dans les zones chaudes et humides.

#### 1.4.2.6. Température du sol

La température du sol dépend de la profondeur et la nature du sol ainsi que des conditions météorologiques du site tels que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent, etc.

Faute des données expérimentales de la température de la surface du sol à Djibouti ou même dans la région, nous allons nous servir du modèle basé sur le bilan énergétique au niveau de la surface du sol en vue d'en déduire une expression pour sa température. La Figure 1.17 représente les principaux apports de flux de chaleur à la surface. Le sol est assimilé à un massif semi-infini homogène

dont les propriétés physiques sont constantes et indépendantes de la profondeur  $z$ , la surface du sol ( $z=0$  m) reçoit une quantité d'énergie sous forme de rayonnement solaire et sous forme de chaleur sensible en échange convectif avec l'air ambiant. Elle perd à son tour une partie de sa chaleur par rayonnement GLO avec le ciel et par conduction avec le sol (Khatry et al., 1978; Kusuda and Achenbach, 1965). L'ensemble des échanges sol-environnement est gouverné par les équations suivantes:

$$\Phi_{cd} = \Phi_{CLO} + \Phi_{GLO} + \Phi_{cv} \quad (1.1)$$

$$\Phi_{GLO} = \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_g^4) = h_r (T_{sky} - T_g(0, t)) \quad (1.2)$$

$$\Phi_{cv} = h_c (T_{a_{ext}} - T_g(0, t)) \quad (1.3)$$

avec  $\Phi_{CLO}$ , le flux solaire direct et diffus (courte longueur d'onde) absorbé par la surface du sol,  $\Phi_{GLO}$ , le flux radiatif (grande longueur d'onde) échangé avec la voûte céleste,  $\Phi_{cv}$ , le flux échangé par convection avec l'air extérieur et  $\Phi_{cd}$ , le flux de conduction dans le sol.

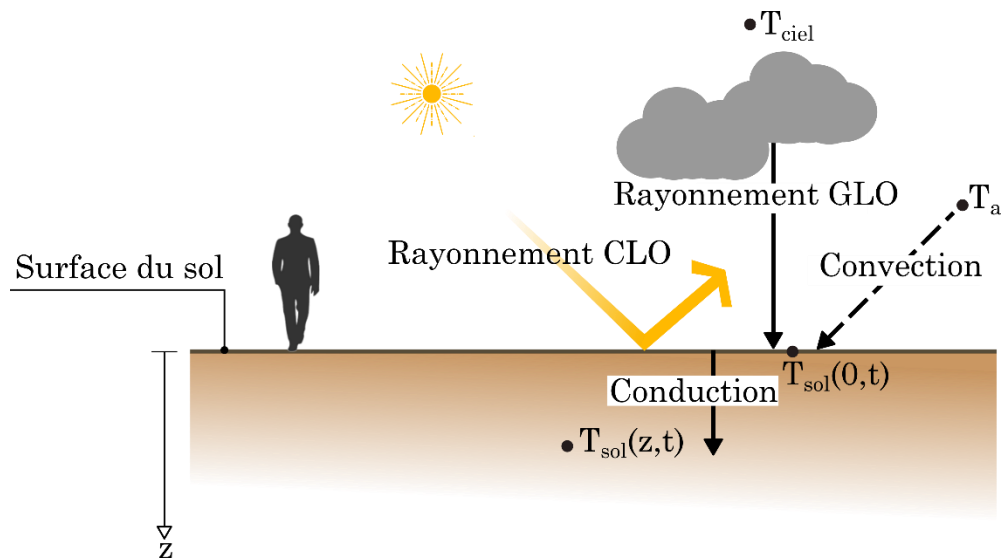


Fig.1. 17.Principaux flux de chaleur à la surface du sol

Pour résoudre ce bilan énergétique, les données météorologiques de Djibouti sont utilisées, en tenant compte de tous les apports et pertes de chaleur sur la surface du sol. Cependant, la précision de ce modèle de bilan dépend fortement de l'estimation du coefficient d'échanges convectif qui est déterminé par la corrélation empirique de (McAdams, 1985) et de la température du ciel.

La détermination de la température du sol en profondeur à partir du bilan thermique de la surface du sol est basée sur la résolution de l'équation de la chaleur dans le sol suivant :

$$\frac{\partial T_{sol}}{\partial t}(z, t) = k \frac{\partial^2 T_{sol}}{\partial z^2}(z, t) \quad (1.4)$$

Quant aux conditions aux limites et initiale, il est supposé qu'avec suffisamment de profondeur, il n'y a pas de fluctuations de température par rapport au temps. En effet, avec l'augmentation de la profondeur, la masse thermique croissante du sol rend la température à de telles profondeurs indépendantes des variations météorologiques à la surface du sol. Par conséquent, cela forme les conditions initiales et limites suivantes :

- $T_{sol}(z, 0) = T_m$
- En  $z=0$ ,  $\rho c \Delta z \frac{\partial T_{sol}}{\partial t}(0, t) = \Phi_{CLO} + \Phi_{cv} + \Phi_{GLO} + \lambda \frac{\partial T_{sol}}{\partial z}(0, t)$
- Pour  $z \rightarrow \infty$ ,  $T_{sol}(\infty, t) = T_m$

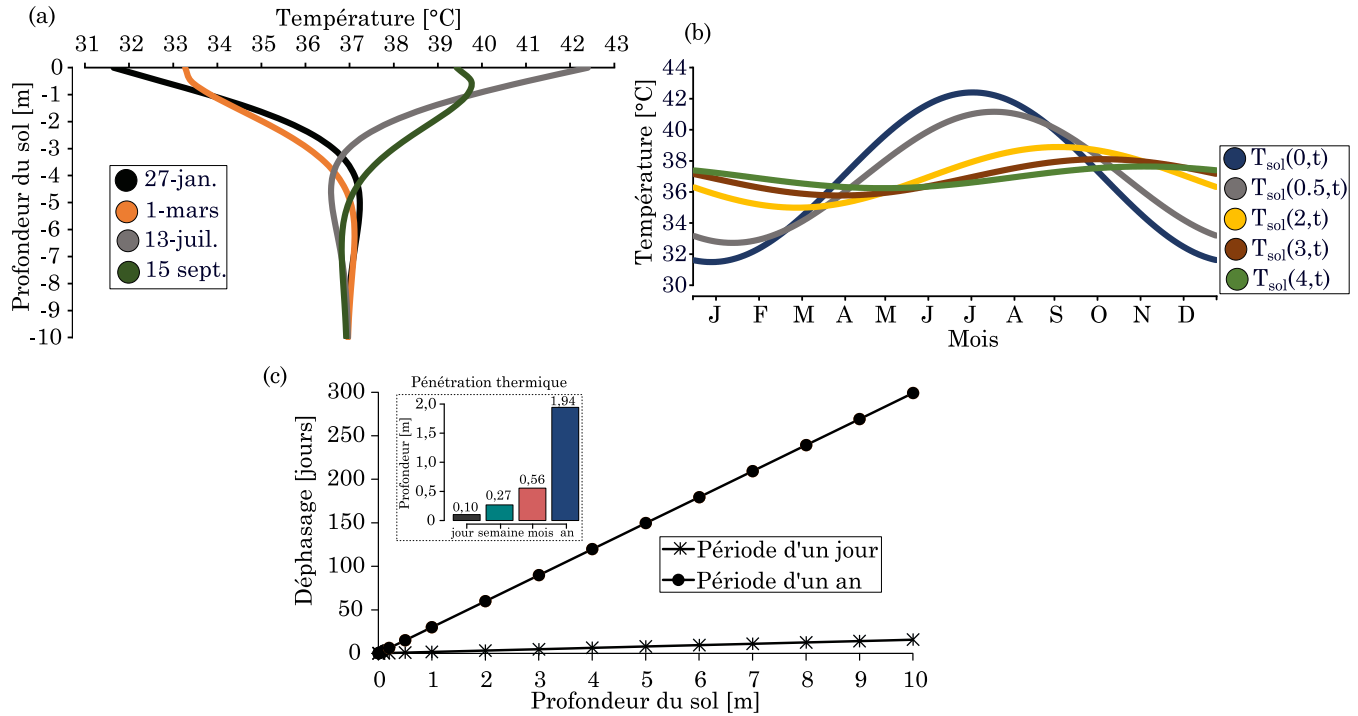
Où  $T_m$  représente la moyenne annuelle de la température du sol (37°C, calculée en prenant en compte les effets combinés du soleil de la convection et des radiations GLO),  $h_c$ , le coefficient d'échange convectif et  $h_r$ , le coefficient de transfert de chaleur radiatif linéarisé.

La résolution de cette équation est faite par la méthode de différence finie et les caractéristiques du sol sableux (cas de Djibouti) sont résumées dans le Tableau 1 :

Tableau 1. 1. Nature du sol et propriétés physiques.

$z$	Capacité Calorifique Cp[J/(kg.K)]	Diffusivité thermique $k$ [m <sup>2</sup> /s]	Masse Volumique $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/m.K]
Sable	1390	$3.76 \times 10^{-7}$	1780	0.93





**Fig.1. 18** - (a) Variation de Température en fonction de la profondeur du sol ; (b) Température moyenne annuelle à différentes profondeurs du sol et (c) Variation du déphasage en fonction de la profondeur du sol et Profondeur de pénétration thermique.

La température en profondeur du sol est caractérisée par deux paramètres : l'amplitude et le déphasage par rapport au signal thermique en surface. Avec la profondeur, on observe bien une diminution de l'amplitude des variations (figures 1.18a et 1.18b) et une augmentation du déphasage. Donc, la température de la surface du sol demeure presque en phase avec celle de l'air, mais les valeurs maximales ou minimales des couches sous la surface sont atteintes plus tard qu'en surface. À une profondeur de 4 m, par exemple, la température maximale du sol est atteinte environ 3 mois après la température maximale moyenne de la surface qui a lieu en été. Quant à la profondeur de pénétration, on observe sur la Figure 1.18c que la profondeur associée à une période d'une année reste inférieure de deux mètres. Cela veut dire que les variations climatiques ne sont ressenties que par une couche peu profonde de la croûte terrestre. En outre, l'évolution de la température du sol au cours d'une année en fonction de sa profondeur montre que l'amplitude du signal de température décroît quand la profondeur augmente. Au-delà d'une distance de plus de quatre mètres, la température du sol n'a plus la forme d'une sinusoïde et se stabilise autour de 37 °C (figures 18a et 18b). Par conséquent, pour une certaine profondeur, et malgré une température moyenne du sol élevée, la température du sol sera plus grande que la température

ambiante en saison fraîche, tandis que la température ambiante en été sera rarement plus grande que celle du sol dans la même période. Pour la saison chaude, même si le sol reste la plupart du temps plus frais que l'air extérieur, il reste cependant plus chaud que la température de confort des habitations : ce qui conduit à la difficulté d'utiliser le sol comme source naturelle pour rafraîchir les bâtiments.

---

## 1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, un regard sur le contexte énergétique des pays au climat chaud en général et à Djibouti en particulier a été présenté. Ainsi, la tendance haussière de la consommation d'énergie des bâtiments actuels a un impact environnemental extrêmement important. Cela résulte du recours excessif aux systèmes de climatisation et des incohérences dans la conception des bâtiments contemporains face à un climat extrême. La pratique d'une architecture passive semble de plus en plus oubliée. Ce constat offre un grand potentiel pour la démarche bioclimatique.

Les ressources de l'environnement ont été aussi décrites dans ce chapitre faisant de l'analyse climatique un point de départ de toute conception bioclimatique. Pour chacune de ces ressources, nous avons présenté l'état des connaissances sur leur caractérisation pour une utilisation par l'enveloppe du bâtiment.

Il en résulte des conditions climatiques combinant des températures moyennes élevées, des faibles amplitudes jour/nuit (5°C à 10°C) et saison chaude/saison fraîche (10°C), des fortes humidités relatives et des vents océaniques sauf durant la saison chaude.

Du point de vue énergétique, ces paramètres climatiques induisent des niveaux élevés de besoin de rafraîchissement. Par ailleurs, l'efficacité relative des éventuelles solutions bioclimatiques dépendent de ces conditions climatiques. Ce climat chaud-humide pose donc un défi considérable à la recherche de source de rafraîchissement pour le bâtiment. Coch (Coch, 1998) note qu'en général, plus les conditions climatiques sont extrêmes, plus limitées sont les solutions. Enfin, l'utilité des ressources énergétiques environnementales ainsi que les technologies bioclimatiques censées les exploiter sont présentées dans les prochaines sections.



## 2. Analyse bibliographique sur l'architecture bioclimatique

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>
<b>2.2.</b>	<b>Démarche de conception bioclimatique</b>
2.2.1.	Architecture bioclimatique
2.2.1.	Démarche symptomatique
2.2.2.	Démarche analytique
<b>2.3.</b>	<b>Indicateurs bioclimatiques</b>
2.3.1.	Indicateurs pour l'évaluation du confort
2.3.1.	Indicateurs bioclimatique pour l'analyse du site
2.3.2.	Indicateurs en phase de conception du bâtiment
<b>2.4</b>	<b>Solution constructives et systèmes bioclimatiques</b>
2.4.1	Techniques de protections solaires
2.4.2	Techniques d'amortissements de la chaleur
2.4.3	Techniques de dissipation de la chaleur
<b>2.5</b>	<b>Conclusion</b>

---

### 2.1. Introduction

Le présent chapitre abordera tout d'abord les principes et les éléments clés de la démarche de conception bioclimatique. Ensuite, nous aborderons les outils existants dédiés à l'évaluation des performances climatiques des bâtiments. À la fin de cette section, un aperçu structuré des solutions de conception bioclimatique les plus couramment utilisées en climat chaud est proposé.

### 2.2. Démarche de conception bioclimatique

#### 2.2.1. L'architecture bioclimatique

Le concept de conception bioclimatique est le plus souvent défini comme une pratique utilisée afin d'adapter les bâtiments aux conditions climatiques d'un emplacement donné en fonction des besoins et des attentes des occupants, tout en optimisant la consommation d'énergie (Almusaed, 2011; Košir, 2019; Lee and Givoni, 1971; Maciel et al., 2007; Olgyay and Olgyay, 1963; Szokolay, 2014). Lorsque la prise en compte de l'environnement se fait aussi dans l'utilisation des matériaux, les émissions de gaz à effet de

serre, la gestion de l'eau ou des déchets, ce type de conception architecturale est appelé « *architecture écologique* », « *architecture durable* », ou « *architecture verte* ».

L'architecture bioclimatique met l'accent sur le potentiel des bâtiments en tant qu'intermédiaire entre l'environnement intérieur et extérieur pour une conception s'inscrivant pleinement dans leur environnement (Hastings, 1989).

L'approche a été introduite et popularisée par Victor Olgyay (Olgyay, 2015), et quelques années plus tard entre autres par Baruch Givoni (Givoni, 1969). Ce n'est que récemment (c'est-à-dire au cours des 60 dernières années) que la conception bioclimatique a fait l'objet d'investigations et d'applications scientifiques et techniques modernes, notamment à travers un intérêt récent pour la durabilité des bâtiments, dont la conception bioclimatique est une partie importante (Košir, 2019; Lechner, 2015).

Dans le contexte climatique de cette thèse, la conception bioclimatique vise principalement à minimiser la demande en climatisation des bâtiments tout en valorisant les ressources énergétiques naturelles de l'environnement.

Dans la pratique, la conception architecturale bioclimatique est une tâche complexe qui répond à une variété d'objectifs étroitement liés les uns aux autres. Pour exploiter les potentiels énergétiques de l'environnement local, le concepteur a besoin d'informations suffisantes afin d'élaborer son concept et faciliter ses prises de décisions. Pour ce faire, il existe essentiellement deux approches possibles de la conception de bâtiments bioclimatiques. (Kanters et al., 2014; Looman, 2017).

La première est caractérisée par la réplique de solutions vernaculaires : c'est la démarche « symptomatique ». La seconde est basée sur l'étude analytique des spécificités climatiques : c'est la démarche « analytique ».

### 2.2.2. Démarche symptomatique

De nombreux exemples de bâtiments vernaculaires montrent des caractéristiques qui peuvent être associés aux principes de l'architecture bioclimatique (Oliver, 1997; Zhai and Previtali, 2010). Les bâtiments traditionnels présentent souvent certaines caractéris-

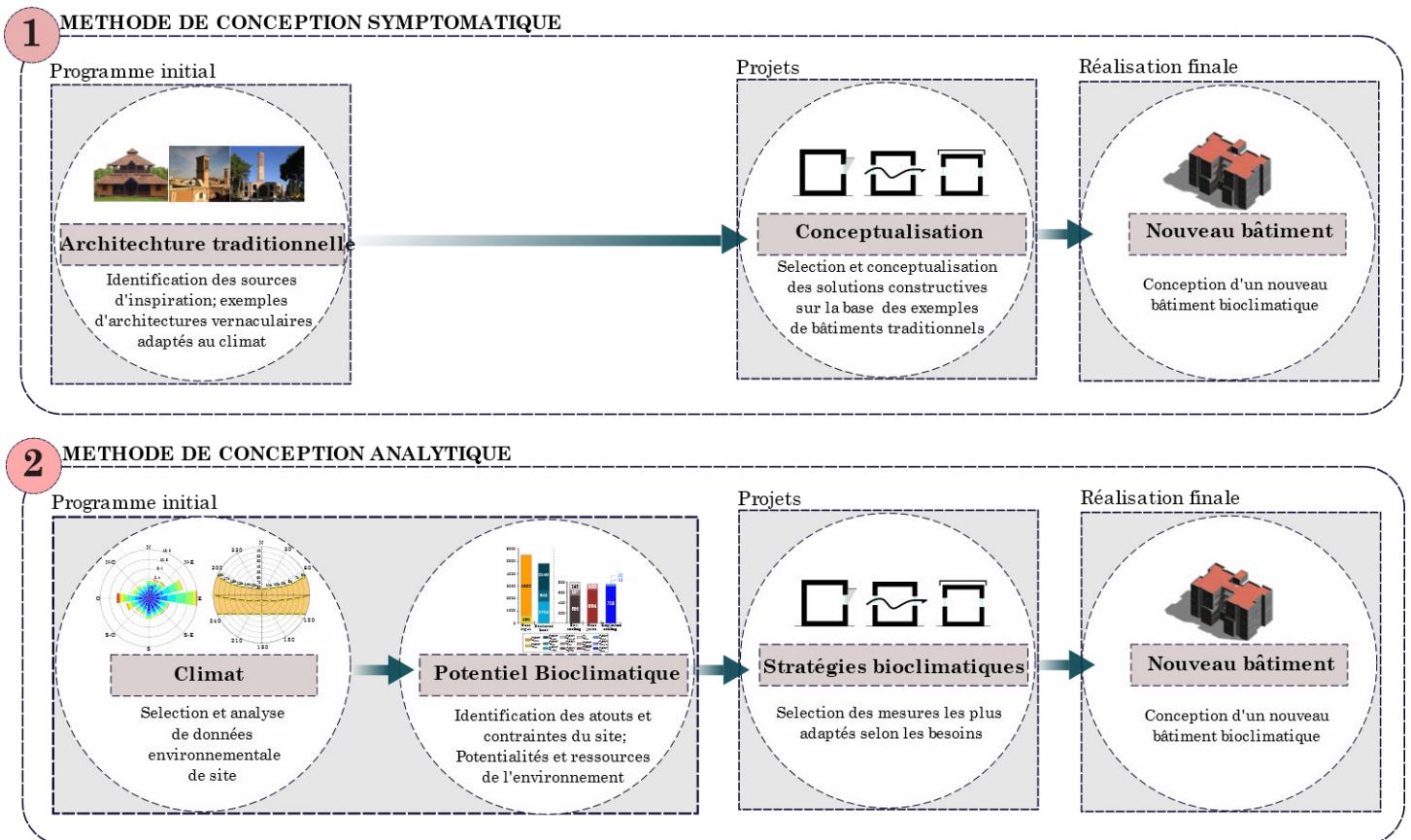
tiques, spécifiquement adaptées à leur certain climat. Cette adaptation aux spécificités climatiques locales a été principalement réalisée suivant un mécanisme qualifiée dans la littérature par d'« essais et erreurs », perfectionnée à travers des siècles d'« évolution » bioclimatique (Cañas and Martin, 2004; Desogus et al., 2016; Košir, 2019; Lechner, 2015; Pajek and Košir, 2017; Zhai and Previtali, 2010). Ce développement évolutif n'a pas été dirigé uniquement par le climat mais aussi par le développement technologique, la disponibilité des matériaux et les facteurs sociaux et économiques. Ce processus a vraisemblablement eu une boucle de rétroaction culturellement importante, où les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment adaptées au climat ont été incorporées dans le langage esthétique d'un style architectural régional et, par conséquent, se sont propagées dans le temps en tant qu'entité culturelle.

On suppose que les bâtiments vernaculaires sont devenus « idéalement » adaptés à un ensemble spécifique de conditions climatiques prévalant sur une zone distincte depuis des centaines et des milliers d'années. Certains auteurs ont basé leurs outils de quantification des ressources environnementales sur des conceptions de bâtiments vernaculaires. Ils supposent alors que la conception vernaculaire est la conception de bâtiment la plus adaptée pour exploiter ces ressources. C'est peut-être vrai, mais il n'y a pas de preuve définitive de cela.

Ainsi, pour concevoir des bâtiments bioclimatiques, les bâtiments traditionnels représentent un catalogue de solutions déjà développées (Coch, 1998; Fernandes et al., 2015; Manzano-Agugliaro et al., 2015). Par conséquent, il suffit de reproduire l'architecture vernaculaire dans la région où ce nouveau bâtiment va être érigé. Une telle approche représente un moyen relativement simple de reproduire les solutions existantes. Elle est largement pratiquée parmi les architectes et les ingénieurs du monde entier qui tentent de concevoir en fonction du climat (Košir, 2019). C'est la démarche de conception bioclimatique dite « symptomatique » présentée sur la Figure 2.1 suit trois étapes de base.

La démarche de conception « symptomatique » suit trois étapes de base présentée sur la Figure 2.1. La première étape consiste à identifier des exemples d'architecture vernaculaires appropriés, où il faut veiller à identifier véritablement des bâtiments suffisamment

adaptés au climat pour servir de sources d'inspiration. Ensuite, sur la base des exemples de bâtiments sélectionnés, les solutions bioclimatiques dominantes (forme et orientation, masse de l'enveloppe, ouvertures, etc.) utilisées pour adapter ces bâtiments au climat local doivent être identifiées et conceptualisées. La dernière étape consiste à mettre en œuvre les mesures bioclimatiques identifiées de manière appropriée, en utilisant les techniques et les méthodes de conception actuelles.



**Fig.2.1.** Représentation schématique de processus de conception symptomatique (1) et analytique (2) de la conception bioclimatique.

La démarche symptomatique basée uniquement sur la réplique de modèles bioclimatiques existants. Elle présuppose que le climat est un processus statique plutôt que dynamique. Aussi, les usages, les besoins et l'accès à l'énergie évoluent. Il est donc prudent d'évaluer l'efficacité d'une telle approche par des méthodes scientifiquement fondées afin de vérifier la performance et la validité des solutions

bioclimatiques vis-à-vis des potentiels et des contraintes de l'environnement local du site.

### 2.2.3. Démarche analytique

L'alternative à la méthode précédente dans la conception bioclimatique est une approche analytique (Figure 2.1, méthode 2), où les concepteurs appliquent une analyse climatique afin de déterminer les solutions bioclimatiques les mieux adaptées (Coch, 1998; Košir, 2019; Szokolay, 2014; Zhai and Previtali, 2010; Pajek and Košir, 2017). Ici, la démarche de conception bioclimatique commence par une phase de diagnostic du site d'implantation et de son climat. Le diagnostic est considéré comme une étape préalable pour bien cerner les contraintes et potentialités du site (ressources environnementales locales, milieu physique, nuisances de proximité...etc.). Les atouts et contraintes ainsi identifiés permettent de guider les actions architecturales à adopter pour concevoir le bâtiment bioclimatique. Le contenu du diagnostic n'est pas fixe, mais l'approche la plus largement utilisée dans la littérature consiste à effectuer un calcul de potentiel bioclimatique en se basant sur des caractéristiques météorologiques de base. Quelques-uns sont résumés dans la section 2.4. En outre, les indicateurs développés dans le cadre de cette thèse rentrent aussi dans ce type de démarche.

La procédure progresse dans la phase de projet avec l'étape de la conception du bâtiment. Cette étape est cruciale pour le concepteur puisse sélectionner la forme appropriée du bâtiment (orientation, compacité, emplacement des fenêtres), la composition des murs (inertie thermique et isolation), les stratégies de refroidissement appropriées (solutions de rafraîchissement passives et actives) etc.

Au cours de cette étape, le concepteur doit pouvoir prédire qualitativement et vérifier l'efficacité de stratégies bioclimatiques. Cela donne effectivement aux concepteurs un aperçu des mesures de conception possibles et satisfaisantes qui peuvent être mises en œuvre.

Bien que cette démarche de conception analytique ait été introduite par des scientifiques dès les années 1960, les architectes et les ingénieurs l'ont rarement mise en œuvre au cours du processus de conception des bâtiments. La raison en est peut-être qu'ils ont trouvé que cela prenait trop de temps, les analyses climatiques



étaient longues, ou qu'elles étaient simplement considérées comme inutiles, car l'approche par l'architecture traditionnelle était plus facile et plus intuitive, en particulier pour les architectes habitués à cette méthode. Certaines procédures encouragent, cependant, une approche hybride combinant les deux démarches de conception.

## 2.3. Indicateurs bioclimatiques

Pour mettre en œuvre les démarches de conception bioclimatique analytique et hybride, les concepteurs doivent s'appuyer sur des indicateurs d'analyse bioclimatique. Les indicateurs peuvent servir, non seulement, à diagnostiquer le site d'implantation du projet, mais aussi évaluer la qualité de la conception du bâtiment. La plupart des indicateurs bioclimatique existants sont basés sur des indicateurs permettant d'évaluer le confort thermique dans les espaces habités. Cette section aborde d'abord dans un premier temps les indicateurs de confort thermique usuels, avant de décrire les indicateurs bioclimatiques.

### 2.3.1. Indicateurs pour l'évaluation du confort

#### 2.3.1.1. La température Opérative

La température opérative,  $T_{op}$ , est définie comme la température d'une enceinte isotherme dans laquelle un occupant échange la même quantité de chaleur par rayonnement et convection que dans l'enceinte dans laquelle il se trouve réellement (ASHRAE, 2017; ISO, 2005).

Son calcul intègre l'effet de la convection et du rayonnement et peut être exprimée comme suite :

$$T_{op} = \frac{T_{mr} \times h_r + T_a \times h_c}{h_r + h_c} \quad (2.1)$$

Avec :  $T_a$ , la température d'air,  $T_{mr}$  température moyenne radiante et  $h_r$  et  $h_c$  représentent respectivement le coefficient de transfert de chaleur radiatif et convectif.

Il convient de souligner que température opérative n'inclut pas l'influence de l'humidité relative. Aussi, elle ne fournit pas d'indication sur le ressenti subjectif des occupants dans un espace ayant une certaine température.

### 2.3.1.2. Le Predicted Mean Vote

L'indicateur de confort le plus largement utilisé est le « Predicted Mean Vote » (PMV) proposé par Fanger (Fanger, 1970). Il repose sur une expression du bilan énergétique du corps humain. Le PMV prévoit le vote moyen de sensation thermique (globale) d'un groupe de personnes. Il a servi pour développer les norme ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) et NF EN 7730 (ISO, 2005). L'indice PMV peut être décrit comme une fonction de sept facteurs de base du confort thermique et peut-être écrit sous la forme suivante :

$$PMV = f(M, W, f_{cl}, p_a, T_a, T_{cl}, h_c) \quad (2. 2)$$

Avec  $M$  la production de chaleur métabolique le travail externe effectué par les occupants,  $f_{cl}$  le facteur d'habillement,  $p_a$  la pression de vapeur d'eau dans l'air et  $T_{cl}$  la température de la surface externe du vêtement.

Le calcul de l'indice PMV permet d'évaluer le confort thermique dans un environnement intérieur défini sur une échelle de -3 à 3, allant du froid au chaud (tableau 2.1). En conséquence, la relation entre le PPD (le pourcentage des personnes qui seront insatisfaites dans l'ambiance considérée) et le PMV est décrite par une courbe en cloche inversée avec un PPD minimum de 5% correspondant à l'environnement thermiquement neutre (c'est-à-dire  $PMV = 0$ ).

Tableau 2. 1. Relation entre les indices PMV et le PPD.

Sensation	Très froid	Froid	Légèrement froid	Neutre	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
PMV	-3	-2	-1	0	1	2	3
PPD [%]	100	75	25	5	25	75	100

Le PMV est surtout utilisé dans les bâtiments dont les conditions thermiques internes sont statiques. La stabilité de ces conditions est assurée par des systèmes de chauffage et de climatisation.

### 2.3.1.3. Les indicateurs de confort adaptatifs

Pour les environnements en évolution libre, il a été démontré que le PMV sous-estimait considérablement le confort thermique perçu par les occupants, car il ne prend pas en compte les aspects socio-culturels de l'emplacement du bâtiment (Nicol and Stevenson, 2013; Nicol and Humphreys, 2002; Nicol and Roaf, 2017). En effet, si un changement d'environnement thermique extérieur se pro-

duit, les occupants tentent activement de la restaurer par l'adaptation (Taleghani et al., 2013). L'approche adaptative de l'évaluation du confort thermique a été développée pour prendre en compte ce mécanisme.

L'approche adaptative suppose que la température de confort dans un local varie linéairement avec la température extérieure :

$$T_c = a \times T_{rm} + b \quad (2.3)$$

où  $T_c$  représente la température de confort,  $a$  et  $b$  sont des constantes et  $T_{rm}$  est la moyenne glissante exponentielle de la température telle que définie dans l'équation (2.4) :

$$T_{rm} = (1 - \alpha) \times (T_{rm-1} + \alpha \times T_{rm-2} + \dots + \alpha^{n-1} \times T_{rm-n}) \quad (2.4)$$

La constante  $a$  dans l'équation varie entre 0 et 1, tandis que  $T_{rm-n}$  représente la moyenne de la température extérieure au nième jour précédent. Les équations permettant de calculer la température de confort ont été obtenues à partir de résultats d'enquêtes de terrain sur le ressenti des occupants. La Figure 2.2. montre les résultats de l'une de ces enquêtes ainsi que la loi linéaire qui en résulte.

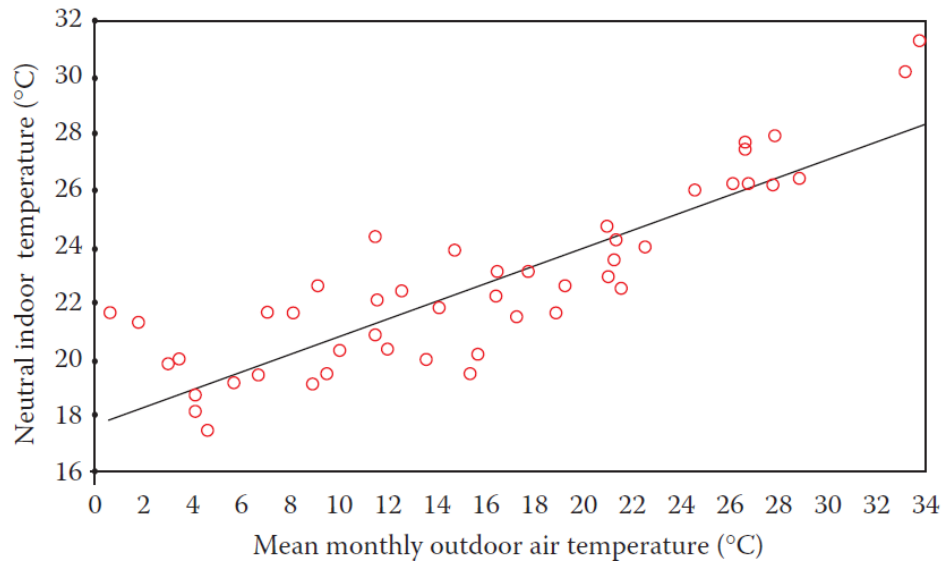


Fig.2. 2. La corrélation entre la température de confort et la température moyenne extérieure pour un bâtiment non climatisé. Le changement de la température de confort avec la température extérieure moyenne mensuelle pour les bâtiments non climatisés et les bâtiments climatisés, (Roche, 2017)

Le calcul des indices de confort adaptatif a été intégré dans les normes ASHRAE 55, et EN 15251 (CEN, 2007) L'image ci-dessous montre l'évolution de la température de confort pour la norme ASHRAE55. Ces deux normes définissent des catégories de confort

qui sont caractérisées par l'écart entre la température observée et la température de confort  $T_c$ . (Tableau 2.2, et Figure 2.3).

Catégorie	Description	Limite	PMV
I	Niveau élevé	$T_c \pm 2$	$-0.2 < PMV < 0.2$
II	Niveau normal	$T_c \pm 3$	$-0.5 < PMV < 0.5$
III	Niveau modéré acceptable	$T_c \pm 4$	$-0.7 < PMV < 0.7$
IV	Acceptable pour une partie restreinte de l'année	$T_c \pm > 4$	$-0.7 > PMV$ et $PMV > 0.7$

Tableau 2. 2. Niveau de confort recommandées par la norme NF EN 15251. (CEN, 2007)

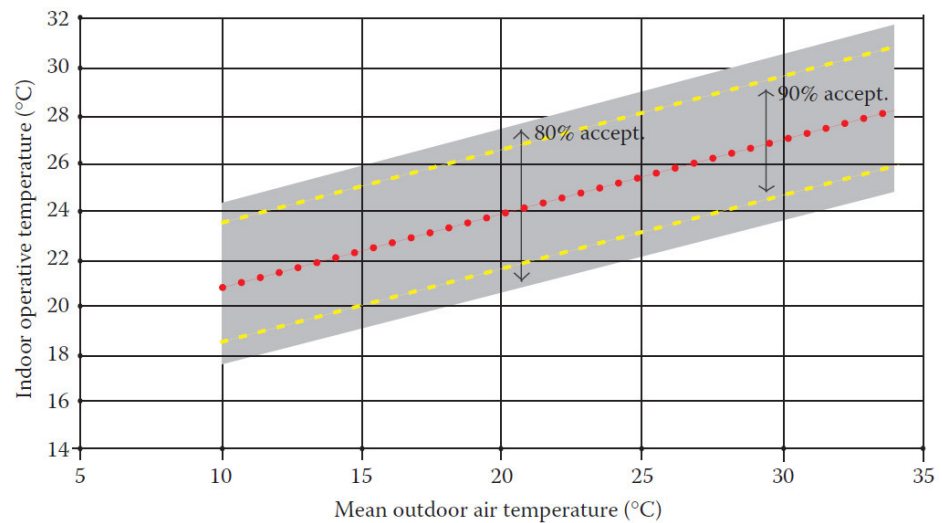


Fig.2. 3. Norme de confort adaptatif proposée pour la norme ASHRAE 55, applicable aux bâtiments à ventilation naturelle (Roche, 2017).

### 2.3.2. Indicateurs bioclimatiques pour l'analyse de site

Lors de la phase de diagnostic de l'environnement d'un site, il n'existe pas de moyen universel d'analyser des paramètres climatiques pour quantifier ses ressources et ses contraintes de l'environnement du site. Néanmoins, l'évaluation de la performance bioclimatique du site doit se faire au moyen d'indicateurs appropriés. Il s'agit de donner un ordre de grandeur de ce que peut apporter une technique bioclimatique sur un site sans faire de présupposition sur la configuration architecturale du projet. Les définitions des indicateurs associés dépendent donc de la nature de la ressource (source de chaleur ou puit de chaleur), de l'objectif d'exploitation de cette ressource (minimiser les besoins de rafraîchissement ou maximiser le confort) et des caractéristiques climatiques

locales (qui pourraient restreindre la disponibilité de certaines ressources).

### 2.3.2.1. Diagramme de Givoni

Le diagramme de Givoni (Givoni, 1992) est un outil largement utilisé pour la conception bioclimatique. L'objectif de ce diagramme n'est pas de quantifier les ressources exploitables dans le site, mais d'identifier quelles solutions de régulation de température (ventilation naturelle, rafraîchissement par évaporation, inertie, etc) doivent être mis en œuvre pour maintenir, de manière passive, le confort dans le bâtiment.

Le diagramme de Givoni est un diagramme psychométrique sur lequel la zone de confort hygrothermique a été tracée (Figure 2.4). Cette zone a été délimitée en utilisant l'indice PMV-PPD pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale et les tenues vestimentaires moyennes d'hiver et d'été.

Les données météorologiques horaires de température et d'humidité du site sont reportés sur ce diagramme. Si elles s'écartent du polygone de confort, il faut mettre en œuvre une solution de régulation de température. Le choix de la solution à mettre en œuvre dépend de la direction vers laquelle sont situées les points en dehors du polygone de confort. Chaque solution correspond à une zone d'extension définie autour du polygone de confort.

Le potentiel  $P_i$  d'une solution donnée est calculé (en % pour un mois donné) avec l'équation suivante.

$$P_i = \left( \frac{N_i}{\sum_i^n t_i} \right) \times 100 \quad (2.5)$$

Où  $N_i$  représente le nombre de points de données climatiques dans la zone d'extension correspondant à la solution donnée, pour un mois donné,  $t_i$  est le nombre total d'heures par jour et  $n$  est le nombre total de jours pour un mois donné. Ainsi, la valeur de  $P_i$  correspond à la proportion du temps total pendant une année où le confort est réalisable en utilisant la solution étudiée

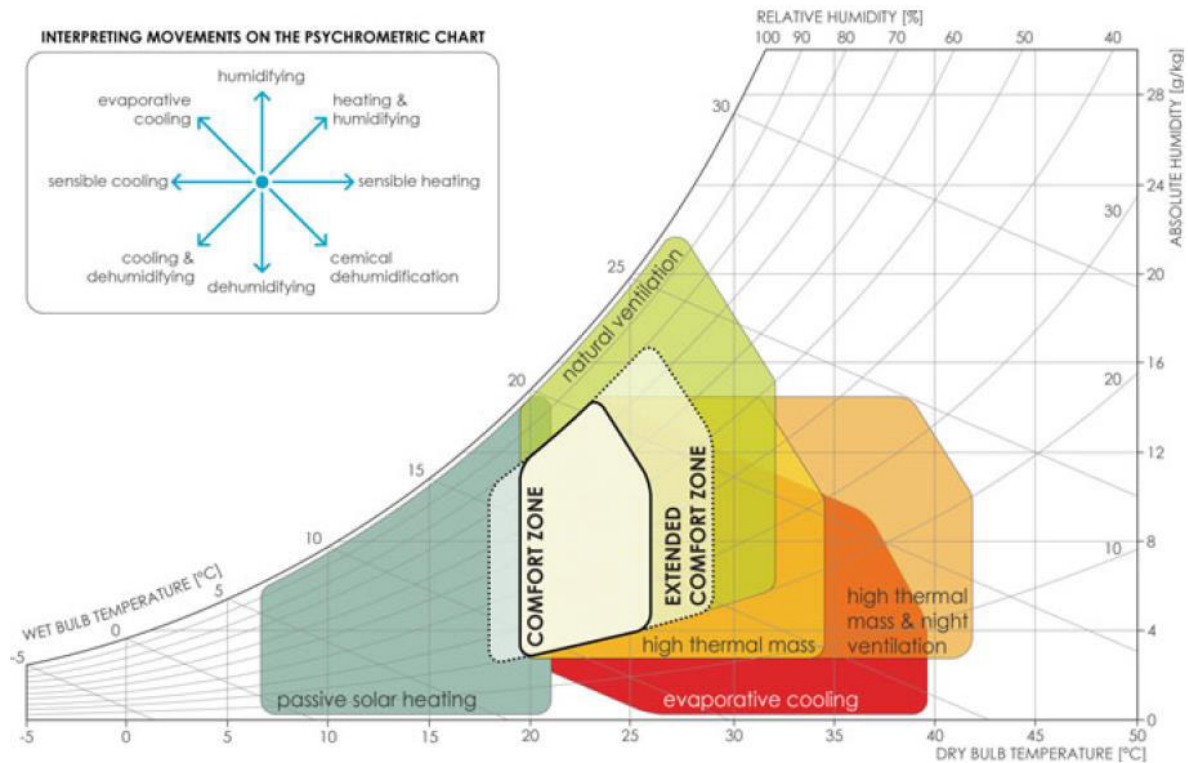


Fig.2. 4. Diagramme bioclimatique tel que défini par Milne et Givoni. Les différents polygones représentent les stratégies de confort passives (Košir, 2019).

Plusieurs chercheurs ont contribué à ce diagramme psychrométrique en intégrant des modèles de confort tel que le modèle adaptatif (Attia et al., 2019; Katafygiotou and Serghides, 2015; Szokolay, 2014). Le diagramme a été fréquemment adapté à des conditions climatiques spécifiques par d'autres auteurs (Al-Azri, 2016; Attia et al., 2019; Desogus et al., 2016; Pajek and Košir, 2017; Szokolay, 1986).

### 2.3.2.2. Indicateurs basés sur le degré-jour

Le degré-jour est une grandeur qui quantifie le besoin de chauffage (degré-jour de chauffage DJC) ou de refroidissement (degré-jour de refroidissement DJR) dans un site donné. Les DJR et les DJC sont définis à partir de températures limite haute et basse de confort (typiquement  $26^{\circ}\text{C}$  et  $19^{\circ}\text{C}$ ). Le DJR est l'intégrale de la portion de la courbe d'évolution de la température extérieure située au-dessus de la température limite haute de confort. Le DJC est l'intégrale de la portion de la courbe d'évolution de la température extérieure située au-dessous de la limite basse. Les DJR et DJC peuvent être calculés à n'importe quel intervalle de temps, et des intervalles plus courts donnent plus de précision (Belleri et al., 2018; Emmerich et al., 2001).

Ghiaus et al. (Ghiaus and Allard, 2006) évaluent le potentiel de refroidissement de la ventilation naturelle avec des indicateurs qui s'apparentent à des degrés-heures mais avec une base dynamique. Les auteurs déterminent d'abord la relation entre les températures de confort limite haute  $T_{cu}$ , et basses  $T_{cl}$ , en fonction de la température extérieure  $T_o$ , en se basant sur les équations du confort adaptatif. Ils estiment ensuite avec un modèle très simplifié la relation entre température à l'intérieur du bâtiment en évolution libre  $T_{fr}$ , et la température extérieure  $T_o$ . Ils obtiennent alors le graphique de la Figure 2.5.

Sur ce graphique, ils identifient les plages de température extérieure  $T_o$  pour lesquelles

- Il est nécessaire de chauffer (zone 1 :  $T_o < T_{cl}$ ),
- Il est nécessaire de climatiser (zone 2 :  $T_o > T_{cu}$ ),
- La ventilation naturelle peut permettre de réguler la température interne pour maintenir le confort (zones 3, 4, 5)

A partir de ce graphique et de données météorologiques de température extérieure, ils peuvent quantifier les besoins en chauffage  $D_c$ , en climatisation  $D_R$ , et en rafraîchissement par ventilation  $D_v$ , sous forme de degrés-heure, avec les équations suivantes :

$$\delta_R = \begin{cases} 1, \text{quand } T_{fr} > T_{cu} \text{ et } T_o > T_{cu} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$D_R = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i,j) - T_{cu}(i,j)] \delta_R \quad (2.7)$$

$$\delta_v = \begin{cases} 1, \text{quand } T_{fr} > T_{cu} \text{ et } T_o < T_{cu} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$D_v = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i,j) - T_{cu}(i,j)] \delta_v \quad (2.9)$$

$$\delta_c = \begin{cases} 1, \text{quand } T_{fr} < T_{cl} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$D_c = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i,j) - T_{cl}(i,j)] \delta_c \quad (2.11)$$

Avec  $i$ , indice relatif aux heures ;  $j$ , indice relatif aux jours (1 à 365).

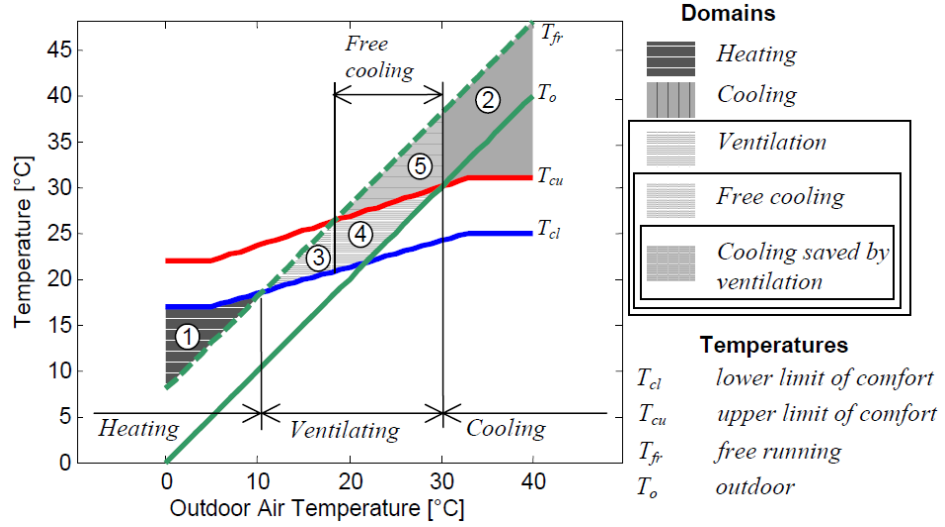


Fig.2. 5.Zones de pertinence des CVC repris de (Ghiaus and Allard, 2006).

Artmann et al. (Artmann et al., 2007) Proposent comme indicateur le CCP (Climatic Cooling Potential), afin de caractériser le potentiel de rafraîchissement par ventilation nocturne à l'aide de données climatiques.

Celui-ci se base sur un bâtiment fictif caractérisé par un profil d'évolution de température interne  $T_{i,h}$  ayant la forme d'une oscillation harmonique :

$$T_{i,h} = 24.5 + 2.5 \cos\left(2\pi \frac{h - h_i}{24}\right) \quad (2.12)$$

Le CCP est défini de la façon suivante :

$$CCP = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{h=h_i}^{h_f} m_{n,h} (T_{i,n,h} - T_{a,n,h}) \quad (2.13)$$

$$m = \begin{cases} 1h, & \text{si } T_i - T_a \geq \Delta T_c \\ 0, & \text{si } T_i - T_a < \Delta T_c \end{cases} \quad (2.14)$$

Où  $h_i$  et  $h_f$  sont les heures de début et de fin de la ventilation nocturne et  $\Delta T_c$  la différence de température nécessaire pour assurer le refroidissement.

$$T_{i,h} = 24.5 + 2.5 \cos\left(2\pi \frac{h - h_i}{24}\right) \quad (2.15)$$

Le CCP est exprimé en °Ch/nuit. Artmann et al. ont présenté de manière cartographiée les résultats du calcul de CCP pour différentes régions du globe (Figure 2.6 pour l'Europe).



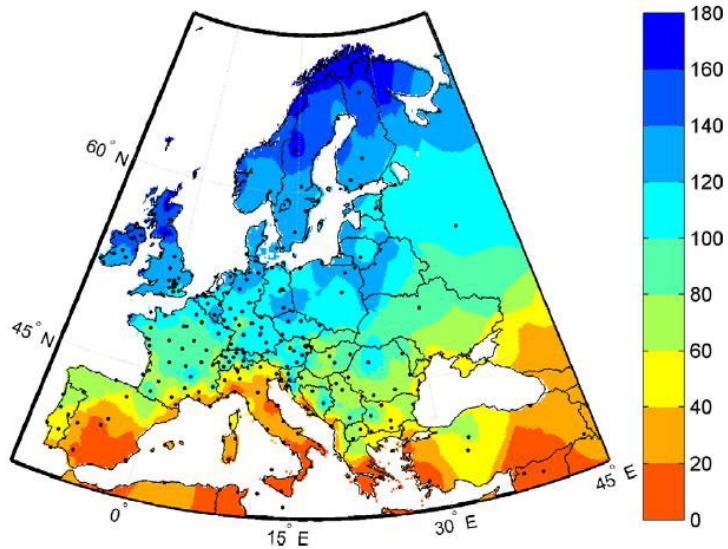


Fig.2. 6. Carte du CCP moyen (Kh/nuit) en juillet (Artmann et al., 2007).

### 2.3.2.3. Autres indicateurs

Faggianelli et al. (Faggianelli et al., 2014) ont proposé un ensemble de six indicateurs pour le potentiel de ventilation naturelle traversant : trois indicateurs pour le profil de température (température maximale moyenne, la température minimale moyenne, l'amplitude thermique) et trois pour le profil du vent (vitesse, direction et régularité du vent). Ces indicateurs sont regroupés dans un radar (Figure 2.7) avec une note entre 0 et 5 selon des critères pour mettre en évidence les points forts et les limites du site étudié.

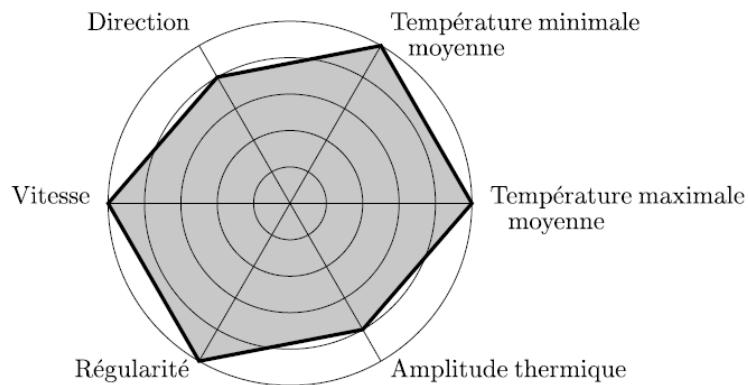


Fig.2. 7. Représentation radar pour le site de Campo dell'Oro, Ajaccio (Faggianelli et al., 2014).

Garcia (Yusta Garcia, 2018) a aussi utilisé le degré-jour comme base quantitative pour définir des saisons thermiques (Figure 2.8).

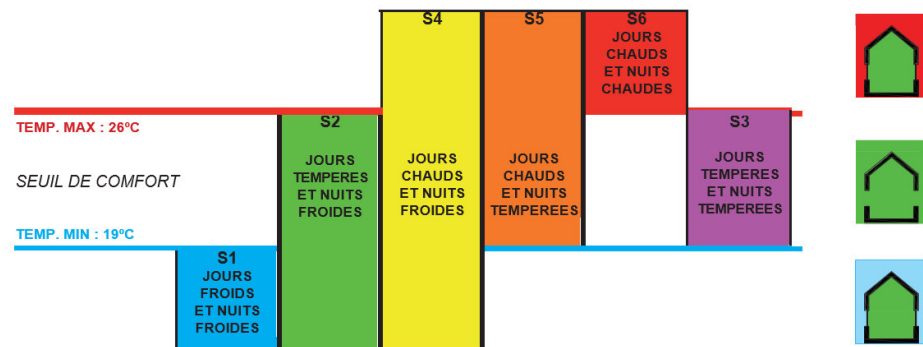


Fig.2. 8. Schéma des saisons climatiques.

Une fois classé le site du futur projet en saisons thermiques, il propose une distribution des techniques bioclimatiques les plus adéquates par situation climatique. En d'autres termes, il procède à une association saisons-actions en séparant le climat selon les trois situations, fermée à cause du froid, ouverte, et fermée à cause du chaud.

#### 2.3.2.4. Discussion

Nous notons que tous les indicateurs listés ci-dessus sont applicables lorsque la stratégie bioclimatique vise à maximiser le confort dans des ambiances non climatisées. Les indicateurs sont donc inapplicables dans un objectif de minimisation des besoins de rafraîchissement pour des bâtiments climatisés comme c'est le cas dans cette thèse. Ils ne sont pas adaptés à notre cadre d'étude mais restent intéressants car ils permettent d'identifier les zones de pertinence des stratégies de rafraîchissement.

Aucun des indicateurs listés ci-dessus ne permet de quantifier le gisement énergétique disponible dans l'environnement. Plus important encore, la plupart des indicateurs présupposent une conception de bâtiment particulière. Les valeurs de ces indicateurs dépendent donc à la fois des opportunités/contraintes du site, et de la conception du bâtiment support. Elles ne dépendent donc pas exclusivement du site, et c'est exclusivement le site que l'on souhaiterait évaluer lors du diagnostic.

### 2.3.3. Indicateur en phase de conception de bâtiment

Dans la phase de conception, le concepteur doit évaluer la performance bioclimatique de différentes solutions architecturales vis-à-vis de leur aptitude à exploiter les potentialités d'un site. L'analyse devrait être effectuée à partir des résultats de simulation énergétique du bâtiment via des indicateurs de performance. Cependant, il n'y a pas de définition claire des indicateurs de performance, car il est assez difficile de distinguer la contribution thermique de chaque ressource environnementale sur le comportement thermique global d'un bâtiment où tous les transferts de chaleur sont mélangés.

Plusieurs indicateurs de performance thermique ont été conçus pour décrire le comportement dynamique des éléments d'enveloppe d'un bâtiment. Parmi ces indicateurs se trouve le déphasage thermique à travers l'enveloppe ou le facteur d'amortissement des surfaces cité dans plusieurs références (Barrios et al., 2012; Chandra, 1980; Kabre, 2010; Kontoleon and Bikas, 2007).

Kaboré et al. (Kaboré et al., 2018) ont défini trois indicateurs ( $\eta_{FRout}$ ,  $\eta_{FRin}$ ,  $\eta_{CEP}$ ) pour évaluer et comparer les performances énergétiques des trois solutions (cool-roof, sur-ventilation nocturne et un dispositif d'ombrage). L'indicateur  $\eta_{FRout}$  est calculé avec l'équation (2.13) et représente la diminution relative de la chaleur transmise à l'environnement urbain ( $Q_o$ ) par rapport à un bâtiment générique de référence. C'est la contribution anthropogénique du bâtiment au microclimat local. L'indicateur  $\eta_{FRin}$  calculé avec l'équation (2.14), il correspond à l'efficacité du rafraîchissement par rapport à un bâtiment de référence, il est basé sur les degrés-heures d'inconfort intérieur. Il caractérise la capacité de la solution à refroidir le bâtiment. Finalement, l'indicateur  $\eta_{CEP}$  représente la diminution relative de la consommation annuelle d'énergie primaire du bâtiment.

Ces indicateurs sont calculés à partir de résultats de simulations du bâtiment et sont donnés en pourcentage. Les résultats sont visualisés sous forme de diagramme de Sankey comme illustré sur la Figure 2.9. avec les énergies exprimées sous la forme de ratio de l'irradiation solaire totale de l'enveloppe du bâtiment.

$$\eta_{FRout} = 100 \frac{Q_o^{ref} - Q_o}{Q_o^{ref}} \quad (2.16)$$

$$\eta_{FRin} = 100 \frac{DH^{ref} - DH}{DH^{ref}} \quad (2.17)$$

$$\eta_{CEP} = 100 \frac{C_{EP}^{ref} - C_{EP}}{C_{EP}^{ref}} \quad (2.18)$$

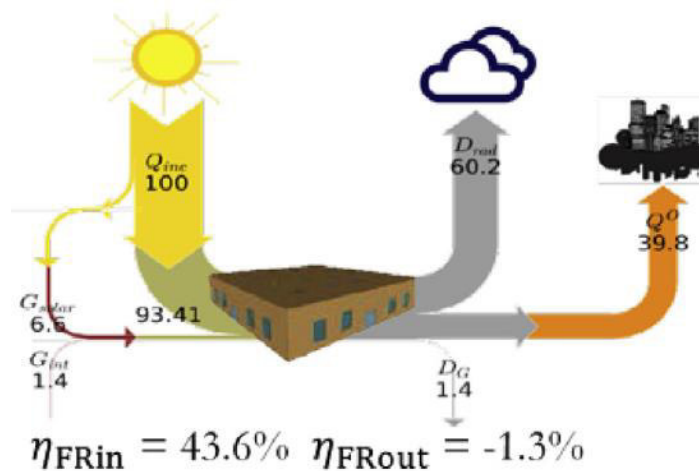


Fig.2. 9. Diagramme de Sankey (Kaboré et al., 2018).

On peut que, pour les indicateurs définis dans cette section, la performance bioclimatique des bâtiments est toujours quantifiée comme une réduction de l'inconfort qu'ils permettent d'obtenir. La performance bioclimatique n'est pas exprimée en termes d'exploitation du gisement énergétique disponible. Or, dans notre étude, nous nous intéressons principalement à l'aspect énergétique de la conception bioclimatique.

#### 2.3.4. Jeux d'indicateur bioclimatique complet

Il existe dans la littérature un jeu d'indicateurs bioclimatique très complet. Ce jeu d'indicateur a été développé par Chesné et al. (Chesné et al., 2012), pour la réduction de la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation sous un climat tempéré.

Le jeu d'indicateur développé couvre les deux étapes de la conception bioclimatique analytique : le diagnostic du site et la conception du bâtiment. Il couvre des ressources environnementales de nature différente : la chaleur du soleil en saison froide, la ventilation naturelle ainsi que le rafraîchissement radiatif en saison chaude. Les indicateurs sont des grandeurs énergétiques.

La philosophie du calcul des indicateurs est similaire selon le type de ressource environnemental.

Ils ont introduit plusieurs types de potentiels de la ressource solaire en fonction de sa concomitance avec les besoins de chaleur.

Afin de calculer ces potentiels, deux simulations sont réalisées avec et sans apports solaires. Elles sont représentées respectivement par les indices  $ss$  et  $as$  dans les équations suivantes. Le potentiel total de la ressource représente le gisement de la ressource disponible à chaque instant sur le site  $P_{tot}(t)$ . Le potentiel concomitant  $P_{conc}(t)$  est égal au potentiel total si un besoin de chauffage existe (quand la ressource est absente), c.a.d. si  $|\varphi_{sys,ss}(t)| > 0$ , et nul sinon :

$$P_{conc}(t) = \begin{cases} P_{tot}(t), & \text{si } |\varphi_{sys,ss}(t)| > 0 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.19)$$

Le potentiel ajusté  $P_{ajust}(t)$  représente la quantité maximale de ressource exploitable pour répondre aux besoins lorsque la ressource est absente :

$$P_{ajust}(t) = \min(P_{tot}(t), |\varphi_{sys,ss}(t)|) \quad (2.20)$$

Finalement, le potentiel exploité évalue les besoins de chauffage évités grâce à la présence de la ressource :

$$P_{exploit}(t) = \left| \varphi_{sys,ss}(t) - |\varphi_{sys,as}(t)| \right| \quad (2.21)$$

Cependant, leurs indicateurs présentent plusieurs limites par rapport au cadre de cette thèse. Tout d'abord, leur démarche a été développée sur la définition du soleil comme une ressource. Par ailleurs, ils considèrent que la manière la plus simple de valoriser une ressource, en générale, est de le faire de manière instantanée. Ils tiennent compte uniquement de la portion d'énergie de la ressource disponible quand il y a besoin d'énergie, or il peut y avoir des déphasages surtout pour des ressources de froid. Cela exclut toute possibilité d'optimiser la couverture de ressources par du stockage. Enfin, les indicateurs de performances ont été calculés à partir de simulations énergétiques des bâtiments avec et sans la présence de la ressource environnementale, une démarche initiée par Tittlein (Tittlein, 2008). Dans notre cas l'annulation de l'effet de certains puits de chaleur environnementaux conduirait à une dynamique du comportement thermique irréaliste sous les climats chauds, notamment en ce qui concerne l'effet du rafraîchissement radiatif qui compense une grande partie du rayonnement solaire entrant (Cela se traduirait par des températures de surface très élevées par exemple).

---

## 2.4. Solutions constructives et systèmes bioclimatiques

Dans cette partie, nous voulons étudier les techniques de construction bioclimatiques. Il s'agit pour nous de donner au lecteur une vision synthétique d'ensemble pour comprendre les différentes possibilités de rafraîchissement passifs. On peut définir le rafraîchissement passif comme l'ensemble des processus naturels et des techniques de refroidissement ne nécessitant pas de systèmes énergétique (Lechner, 2015). Cependant, avant de rafraîchir l'intérieur du bâtiment, il est important de se protéger de la chaleur indésirable. Dans ce contexte, le rafraîchissement bioclimatique peut être envisagé dans un sens un peu plus large que ne le suggère la définition stricte ci-dessus.

La définition inclut des mesures de protection contre la chaleur ainsi qu'une possibilité de modulation des flux de chaleur, pour améliorer les processus naturels de dissipation de la chaleur et de l'apport de froid.

Il existe trois grandes stratégies de rafraîchissement bioclimatique des bâtiments :

- protéger l'intérieur du bâtiment contre le rayonnement solaire et les apports de chaleur,
- moduler les transferts de chaleur vers l'intérieur du bâtiment,
- dissiper la chaleur et refroidir naturellement l'intérieure.

Ces trois stratégies sont présentées graphiquement sur le diagramme dans la Figure 2.10.

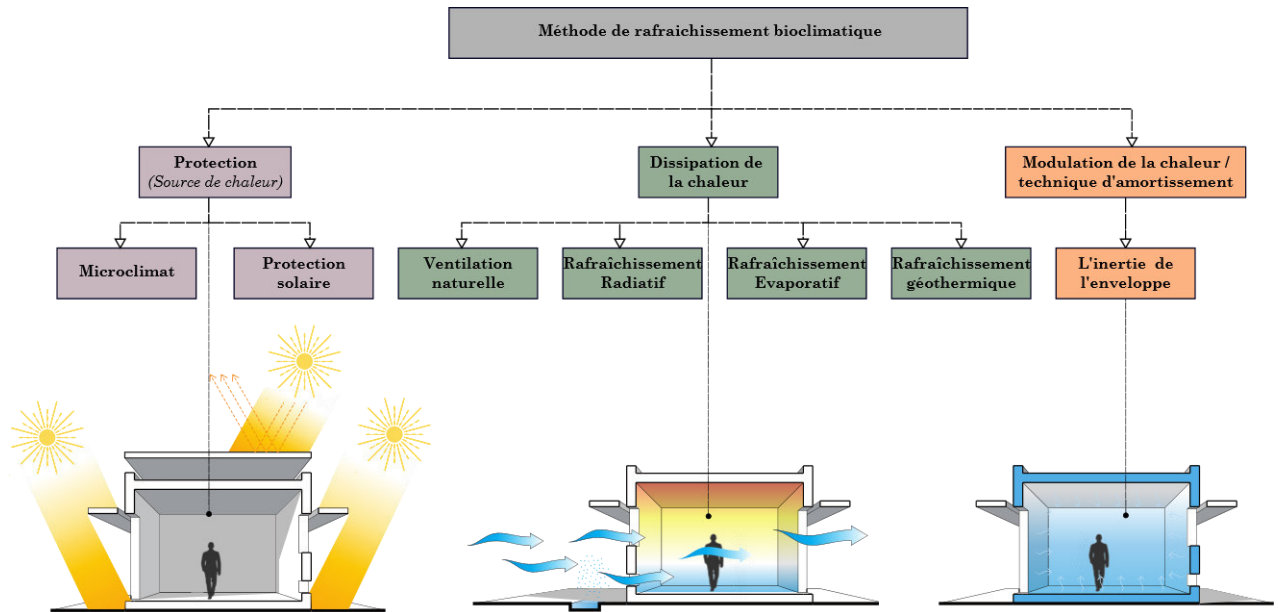


Fig.2. 10 - Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments.

En pratique, une combinaison de ces techniques de rafraîchissement est presque toujours utilisée pour réduire les besoins de climatisation.

#### 2.4.1. Techniques de protection solaire

Dans cette catégorie, les solutions constructives tentent de réduire les apports de chaleur de l'environnement extérieur dans le bâtiment afin d'éviter une augmentation de la température intérieure et des charges de climatisation des bâtiments. Ce concept fondamental de la construction dans les pays chauds (Edmonds and Greenup, 2002; Freewan et al., 2008) concerne toutes les ouvertures de bâtiment, mais peut également s'appliquer de manière générale à l'enveloppe du bâtiment. Kumar et al. (Kumar et al., 2005) ont évalué diverses solutions de rafraîchissement bioclimatique et ont constaté que la protection solaire seule réduisait d'environ 2,5 à 4,5 °C la température intérieure du bâtiment. Elle peut être mise en œuvre naturellement par projection d'ombre réciproque et par mise en place de masques proches. En effet, un bâtiment, par sa simple présence, influe sur le microclimat en créant des ombres au sol et sur d'autres bâtiments voisins.

La végétation, en particulier les arbres à feuilles persistantes, peut aussi jouer le rôle de masque solaire. Cependant, elle constitue aussi des masques de voûte céleste (Givoni, 1991; Papadakis et al., 2001; Yu and Hien, 2006). Son potentiel n'est pas encore exploré au maximum dans les pays chauds.

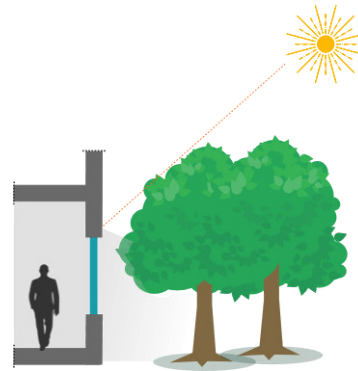


Fig.2. 11. Végétation et protection solaire

Au contraire, l'habitude de tailler les arbres qui ont atteint leur maturité est un phénomène observé notamment dans la ville de Djibouti, par exemple, et qui pose un problème du point vu bioclimatique.

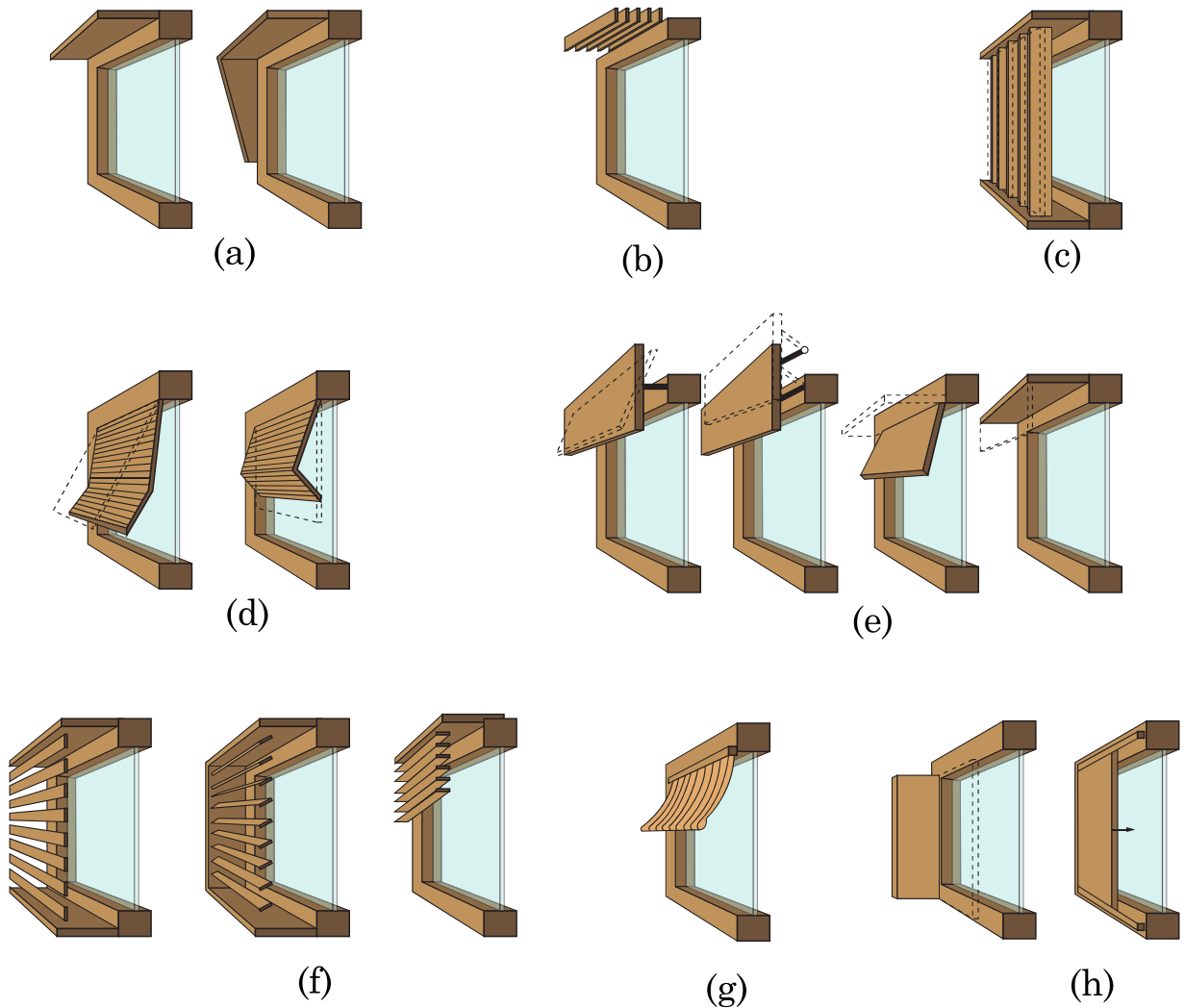
Une orientation optimisée du bâtiment par rapport au soleil peut aussi atténuer les apports solaires. Cependant, très souvent, la meilleure orientation par rapport au soleil n'est pas la meilleure orientation par rapport au vent. Givoni (Givoni, 1994) alerte sur le fait qu'optimiser l'orientation d'un bâtiment est une tâche difficile, et que la stratégie à adopter n'est pas la même pour un climat humide ou un climat sec. Pour le climat chaud et sec, les orientations à éviter pour les ouvrants sont l'ouest et l'est. En revanche en climat humide et chaud, et puisque les vents soufflent souvent O-E, il est d'abord conseillé de favoriser la ventilation naturelle et l'orientation des parties vitrées viendra en deuxième. Au contraire, les travaux de Hassan Fathy (Fathy et al., 1986) sur l'architecture en climat chaud nous conseillent des murs aveugles sur les façades E et O recevant la plus grande partie de la radiation solaire.

Au niveau des ouvrants, la protection solaire peut être réalisée par plusieurs techniques telles que les écrans extérieurs qui mettent les fenêtres à l'ombre comme illustré sur la Figure 2.12. Le but d'un tel dispositif est d'intercepter le rayonnement solaire incident avant qu'il n'atteigne les surfaces vitrées ou toute autre ouverture sans affecter les effets de la lumière du jour à travers les vitrages. Ils sont opaques et peuvent être fixes ou mobiles (Bellia et al., 2014; Gherri, 2015; Roche, 2017). Les brise-soleils fixes, simples et relativement peu coûteux, comprennent des éléments structurels tels que les balcons et les casquettes, mais aussi des éléments non structurels tels que les auvents, les persiennes et les stores. Les pare-soleils mobiles, réagissent plus adéquatement à la trajectoire du soleil que les pare-soleil fixes. Ces éléments peuvent être mis



en place pour intercepter les rayons solaires lorsque cela est nécessaire et ils peuvent être ouverts à la vue et à la brise lorsque l'ensoleillement direct n'est pas un problème.

Cependant, les systèmes d'ombrage influent en même temps sur l'éclairage naturel. Par conséquent, une coordination appropriée entre les effets thermiques et lumineux des dispositifs d'ombrage est nécessaire (Košir, 2019; Robinson and Selkowitz, 2013). Paradoxalement, dans les climats chauds où l'éclairage est élevé tout au long de l'année, l'éclairage naturel n'est pas suffisamment exploité en comparaison aux climats tempérés (Ochoa and Capeluto, 2006).



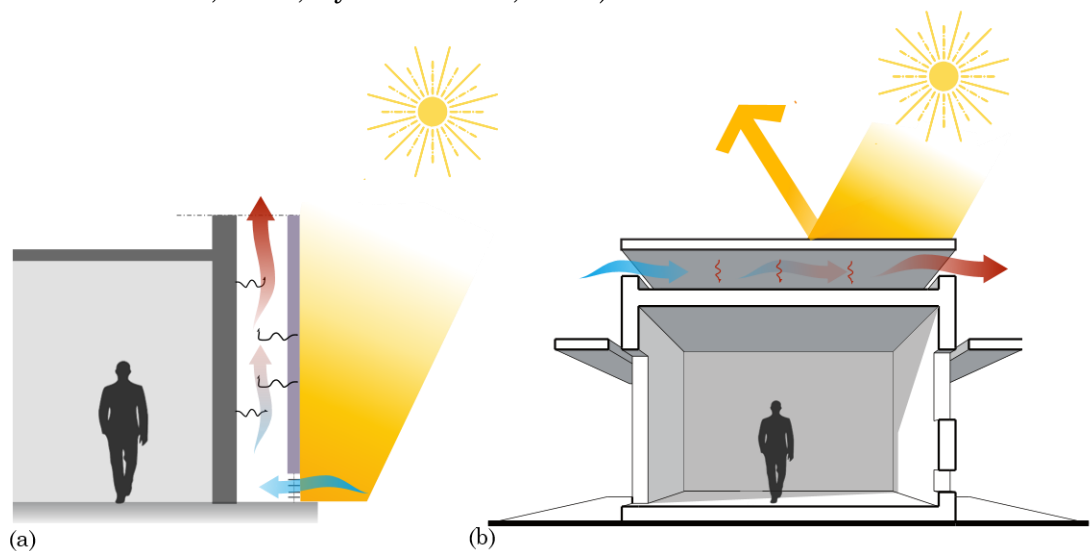
**Fig.2. 12** – (a) Casquette horizontal et vertical, (b) Persiennes horizontales, fixes ou amovible, (c) Persiennes verticales ajustable, (d) Stores mobiles, (e) Panneaux glissant ou tournant autour d'axes horizontaux, (f) Brises-soleil à lames, (g) Auvent et (h) Volets tournant ou coulissant, repris de (Roche, 2017)

La dernière approche en matière de protection solaire consiste à utiliser des vitrages qui diminuent la transmission IR. Il s'agit de recouvrir le vitrage d'un film ayant des propriétés angulaires sélectives spécifiques ou en utilisant la structure interne du vitrage (création de micro-irrégularités, utilisation de micro-prisme, utilisation de panneaux en polycarbonate creux) pour contrôler la transmission des rayons (Edmonds, 1993; Lorenz, 2001; Reppel and Edmonds, 1998; Smith et al., 1998). Ces films sélectifs transparents représentent une option intéressante pour le contrôle des apports solaires. D'autres solutions permettent aux vitrages de changer de propriétés radiatives en fonction de stimuli extérieurs : on les appelle alors vitrages chromogènes (électrochrome, thermochrome et photochrome) (Granqvist et al., 2010; Papaefthimiou et al., 2006). Baetens et al. (Baetens et al., 2010) ont réalisé une étude sur des prototypes de ces vitres intelligentes actuellement commercialisées et ont conclu que les dispositifs les plus performants en termes de réduction des besoins de rafraîchissement sont les verres électrochromes et thermochromes, même si ces derniers ont une plus faible efficacité en ce qui concerne la réduction des besoins d'éclairage. Les verres photochromes sont les moins performants en termes de réduction des besoins de rafraîchissement, ils apparaissent même comme moins performants que des verres réfléchissants.

En plus de la protection des éléments transparents, la protection solaire des surfaces opaques est aussi essentielle. Les apports de chaleur par les murs représentent 54% des apports totaux contre 46% par le toit en climat chaud et humide (Dunham, 1983). Ces apports peuvent être contrôlés grâce à l'utilisation de la double peau, comme illustré sur la Figure 2.13. Cette dernière s'appuie sur l'effet combiné d'une première couche qui sert de protection contre le rayonnement solaire et la ventilation d'air entre les deux peaux pour évacuer la chaleur (Baldinelli, 2009; Ciampi et al., 2003; Hamza, 2008). L'auteur a étudié cette solution dans (Omar et al., 2017). L'utilisation de parois double peau permet, aussi, de pallier à la très faible épaisseur, voire absence d'isolation. Habituellement, une couche à faible émissivité thermique (par exemple, une feuille d'aluminium,  $\varepsilon = 0,04$ ) est appliquée sur la face inférieure de l'écran pour inhiber d'avantage la transmission du flux de chaleur vers l'intérieur et augmenter l'efficacité du dispositif (Biwole et al., 2008; Butera et al., 2014; Ibañez-Puy et al., 2017).

Une autre méthode consiste à appliquer un revêtement réflecteur caractérisé par une réflectivité en courtes longueurs d'onde très haute (et donc une basse absorptivité du rayonnement solaire) particulièrement en toiture (« cool roofs » en anglais), afin de refléter la majeure partie du rayonnement solaire incident (Al-Obaidi et

al., 2014; Hernández-Pérez et al., 2014; Synnefa et al., 2007). Ces matériaux possèdent également une forte émissivité en grandes longueurs d'onde pour mieux évacuer l'énergie absorbée sous forme de rayonnement infrarouge. Il s'agit typiquement de matériaux clairs présentés sous forme de films polyéthylène à faible densité (LDPE) d'épaisseur 0.2 mm ou de peinture liquide (Muselli, 2010; Parker and Barkaszi, 1997; Pisello et al., 2014; Prado and Ferreira, 2005). En règle générale, tous les matériaux de construction conventionnels, à l'exception des surfaces métalliques brillantes, sont des radiateurs thermiques relativement bons, avec une émissivité grande longueur d'onde généralement comprise entre 0,60 et 0,90 (Ascione et al., 2010; Lechner, 2015). Les résultats d'utilisation de la toiture fraîche dans plusieurs climats montrent que la réduction des besoins de rafraîchissement est proportionnelle à l'augmentation de la réflectivité en courtes longueurs d'onde. Cette réduction peut atteindre jusqu'à 50 % par rapport aux autres matériaux de toiture classiques (Androutsopoulos et al., 2017; Givoni, 1994; Muselli, 2010; Oleson et al., 2010; Parker and Barkaszi, 1997; Romeo and Zinzi, 2013; Synnefa et al., 2007).



**Fig.2. 13** – (a) Section d'un mur à double peau, (b) Toiture ventilée.

#### 2.4.2. Techniques d'amortissements de la chaleur

Alors que les techniques de conception d'ombrage visent à réduire le flux du rayonnement solaire sur l'enveloppe du bâtiment, les techniques d'amortissement de la chaleur sont principalement axées sur la modulation de la transmission à travers l'enveloppe du bâtiment. Ils en existent deux méthodes.

Dans la première, la masse thermique de l'enveloppe du bâtiment est utilisée pour absorber les apports de chaleur pendant la journée

et déphaser l'amplitude thermique. Ce qui empêche les hautes températures de la journée d'atteindre l'intérieur du bâtiment. Une partie de la chaleur absorbée est transférée vers l'intérieur plus tard pendant la soirée et contribue à rendre l'intérieur plus chaud. Pour limiter ce phénomène, il est possible d'associer la ventilation (section 2.4.3) à l'inertie lorsque la température extérieure est favorable à une ventilation naturelle (Figure 2.14). L'air ventilé favorise, par la convection, la dissipation de la chaleur stockée dans les parois en l'évacuant vers l'extérieur et, donc, pré-refroidir le bâtiment.

La contribution d'une forte inertie associée à une sur-ventilation nocturne varie profondément en fonction de la nature des cycles des sollicitations extérieures auxquelles le bâtiment est soumis (Roucoult et al., 1999). Cette mesure de conception bioclimatique est d'autant plus efficace que la variation de température jour/nuit est importante (Flourentzou et al., 1998; Givoni, 1992), cela signifie qu'il convient particulièrement aux climats chauds et arides où de telles conditions sont régulièrement réunies.

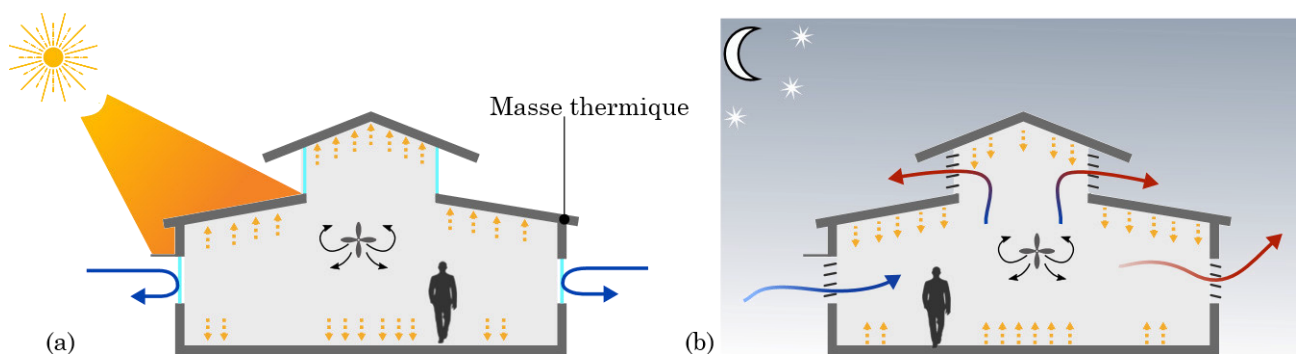


Fig.2. 14 - Masse thermique et sur-ventilation nocturne a) fermeture de toutes les fenêtres pendant la journée, (b) Sur-ventilation nocturne.

Les aspects positifs d'une forte inertie dans les climats chauds ont été démontrés par de nombreux chercheurs (Al-Sanea and Zedan, 2012; Balaras, 1996; Blondeau et al., 1997; Braun, 1990; Butera et al., 2014; Geros et al., 2005; Givoni, 1992; Kolokotroni and Aronis, 1999; Moldovan et al., 2017; Ruud et al., 1990; Voss et al., 2007; Yang and Li, 2008). Cependant, les bénéfices la masse thermique sur les besoins de rafraîchissement ne font pas l'unanimité dans la littérature qui révèle certaines divergences. Certaines études indiquent une augmentation de besoins en climatisation en raison de l'augmentation de l'inertie thermique dans les climats chauds.

L'opinion générale selon laquelle plus d'inertie thermique est bénéfique n'est pas généralisable. Les bâtiments ayant une masse thermique élevée ont besoin de plus de temps pour évacuer la chaleur et atteindre la température de consigne de rafraîchissement. Cela pourrait entraîner une augmentation de la consommation d'énergie en plus de causer un inconfort thermique pour les occupants (Karlsson et al., 2013).

Pour le climat chaud de Las Vegas, Zhu et al. (Zhu et al., 2009) ont montré que l'augmentation de la masse thermique dans les murs augmente la consommation d'énergie liée à la climatisation. Ceci est attribué au fait que la température ambiante élevée et le rayonnement solaire amènent les murs à stocker plus d'énergie pendant la journée, énergie qui doit être dissipé pendant la nuit. La même observation a été faite par Kalogirou et al. (Kalogirou et al., 2002) pour un bâtiment, à quatre zones, situé à Chypre, avec une augmentation de 4,5% du besoin de rafraîchissement par zone.

Par ailleurs, des structures à faible inertie sont conseillées, dans des conditions climatiques telles que celles décrites dans la première partie, pour une mise à profit rapide des sources de fraîcheur disponibles.

La deuxième solution consiste à utiliser une isolation supplémentaire, quantifiée par un coefficient d'échange global faible. Cela permet, non seulement, de conserver la fraîcheur acquise au cours de la nuit, mais aussi de limiter la transmission vers l'intérieure de la chaleur. Cette solution est d'autant plus intéressante lorsqu'il existe un écart important de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, notamment dans les bâtiments climatisés avec une température de consigne basse. (Alvarado et al., 2009; Brown and DeKay, 2013; Halwatura, 2018; Megri et al., 1998; Tsielingiris, 2006; Vijaykumar et al., 2007).

L'influence de l'isolation a été étudiée par Chesné et al. (Chesné et al., 2012) qui ont mis en évidence les limites de l'efficacité de l'isolation dans un climat tempéré. En effet, au-delà d'un certain niveau de résistance thermique (de l'ordre de  $4\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ) isoler n'apporte presque pas d'amélioration en plus de limiter l'exploitation du rayonnement solaire pour la réduction des besoins énergétiques en climat froid.

#### 2.4.3. Techniques dissipation de la chaleur

Les stratégies de rafraîchissement plus avancées incluent la dissipation de la chaleur excédentaire via des processus naturels de

transfert de chaleur. Ils peuvent être classifiés en quatre grandes familles selon les ‘puits thermiques’ vers lesquels sont canalisées la chaleur en excès (Santamouris and Kolokotsa, 2013):

- Rafraichissement par ventilation et par convection,
- Rafraichissement par radiation grande longueur d’onde,
- Rafraichissement par évaporation,
- Rafraichissement par évaporation par le sol.

#### 2.4.3.1. *Rafrâichissement par ventilation*

La conception réussie d'un bâtiment ventilé naturellement nécessite une bonne compréhension des schémas de circulation d'air autour du bâtiment et de l'effet des bâtiments voisins. Il existe deux stratégies permettant de créer naturellement une circulation d'un flux d'air dans le bâtiment, l'une exploitant l'effet du vent et l'autre l'effet de tirage thermique.

Il existe aussi plusieurs configurations de ventilation naturelle, parmi lesquelles la ventilation naturelle traversante (Figure 2.15).

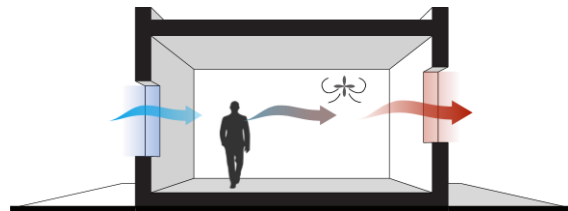


Fig.2. 15. Ventilation traversante

Dans une configuration traversante, une différence de pression, entre deux ouvertures disposées sur deux côtés opposés, est provoquée par le vent et/ou par la différence de températures entre les deux côtés (Kato et al., 1992; Stavrakakis et al., 2008). Par conséquent, s'il n'y a pas d'obstruction importante à l'écoulement, l'entrée de l'air se fait par les ouvertures du côté en surpression et la sortie par les ouvertures en sous-pression (Caciolo, 2010).

Dans le contexte de notre étude, la plupart des pièces (dans ce qu'il a été possible de voir) n'ont qu'un mur donnant sur l'extérieur et une seule ouverture, la circulation d'air qui en résulte est très faible et selon Butera et al., (Butera et al., 2014), si en plus la fenêtre est face au vent, la vitesse du vent disponible correspond à environ 10 % de sa vitesse à l'extérieur, jusqu'à une distance équivalant au sixième de la largeur de la pièce. Au-delà, la vitesse du vent diminue rapidement, et la circulation d'air dans la portion de la pièce sous le vent est pratiquement nulle.

Plusieurs études sur la ventilation naturelle traversante ont été effectuées dans divers pays. Ces études ont notamment porté sur

les effets de la taille des ouvrants et l'orientation des façades généralement compris entre 0 à 60° par rapport à l'axe des vents dominants (Al-Tamimi et al., 2011; Burnett et al., 2005; Givoni, 1994; Sahabuddin and Longo, 2015). L'efficacité d'un tel système dépend fortement du profil de vent du site.

En l'absence de vent, la ventilation naturelle peut être provoquée par l'effet du tirage thermique.

Les configurations les plus courantes font usage d'une cheminée thermique ou d'un atrium avec des ouvertures au sommet, afin de favoriser ce tirage thermique (Butera et al., 2014; Gan and Riffat, 1998; Stavrakakis et al., 2008).

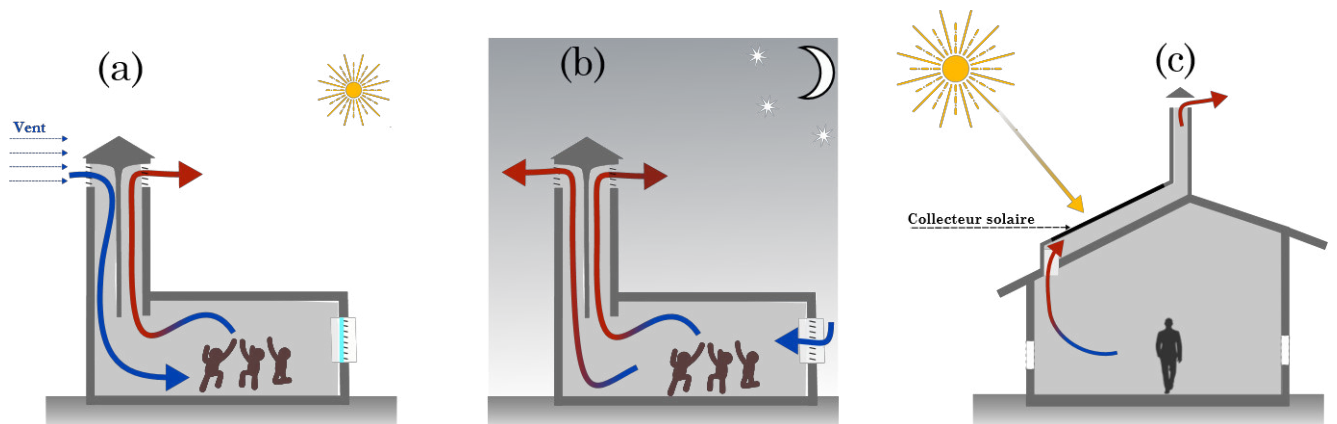
Dans la pratique, le rafraîchissement par ventilation naturelle dans un bâtiment résulte de la combinaison de l'effet du vent et de l'effet de cheminée. Les deux forces peuvent se combiner ou s'opposer, selon la direction du vent et selon la température intérieure ou extérieure.

Dans certains cas, il arrive que la ventilation fournisse difficilement un rafraîchissement adéquat en raison d'accès difficile à un bon débit de ventilation (agglomérations denses, conflit entre la meilleure orientation pour l'ombrage et le vent, forme du terrain etc.). Une solution traditionnelle à ce type de problème est l'utilisation des capteurs de vent «wind catcher». Ce dernier est une tour capable de capter les vents au-dessus du bâtiment pour amener à l'intérieur l'air frais venant de l'extérieur (Bahadori, 1978; Jomehzadeh et al., 2017; Khani et al., 2017) (Figure 2.16). Ce type de stratégie a été utilisé dans les régions chaudes et arides, en particulier dans la région du golfe Persique (aussi appelé « Badgir » ou « Malqaf »), au nord de l'Afrique (Bouchahm et al., 2011; El-shorbagy, 2010; Hughes et al., 2012; Hughes and Ghani, 2008; Ionescu et al., 2015; Yaghoubi et al., 1991).

La partie supérieure de la tour est divisée en plusieurs passages d'air verticaux qui se terminent par des ouvertures sur les côtés de la tour. Le fonctionnement de ces tours à vent n'est pas très compliqué, mais une condition préalable à leur utilisation est que le site doit avoir des vents constants d'une vitesse suffisante. Elles possèdent traditionnellement quatre faces. Cela rend le système plus efficace aux changements de vent périodiques (Lechner, 2015). Il existe différentes formes architecturales de capteurs de vent en termes de hauteur de la tour, de section transversale de la tour et de nombre d'ouvertures (Fathy et al., 1986; Foruzanmehr, 2012; Montazeri et al., 2010; Roaf, 2019). La plus simple est la tour à une face qui prend l'air frais depuis l'entrée supérieure et la ca-

nalise à l'intérieur du bâtiment (Saadatian et al., 2012; Tavakoliana, 2011). Ce type de capteur est généralement utilisé dans les zones où l'air souffle dans une seule direction spécifique. Les conduits plus complexes ont deux, six, voir huit ouvertures et servent aussi d'extraction d'air. La tour à deux ouvertures sur deux côtés opposés de sorte que pour chaque ouverture face au vent (d'entrée pour l'air frais), il y en a une sous le vent (sortie pour l'air chaud) comme illustré sur la Figure 2.16 (Hughes and Cheuk-Ming, 2011).

Dans les zones où il n'y a pas de direction spécifique pour le vent, la tour à vent avec quatre côtés est fréquemment utilisée parce que sa conception offre la possibilité de capter les vents dominants de toutes les directions ce qui augmente l'efficacité du capteur. Quant aux capteurs à six et huit côtés, ils sont rarement construits dans les bâtiments résidentiels (Saadatian et al., 2012). Enfin l'application de la tour cylindrique est limitée car moins performante et on en trouve quelques exemples en Iran et à Dubaï (Bahadori, 1978; Butera et al., 2014). La surface carrée provoque une plus grande différence de pression entre le côté au vent et le côté sous le vent (Elmualim and Awbi, 2002).



**Fig.2. 16** - Capteurs de vent multidirectionnel, (a) mode jour, (a) mode nuit et (c) cheminée solaire.

Le fonctionnement de cette dernière dépend des conditions de vent et de l'heure de la journée. Pendant la nuit et en l'absence de vent, la tour évacue l'air intérieur par tirage thermique (Figure 2.16b). En effet, les parois transfèrent la chaleur absorbée pendant la journée à l'air frais dans le capteur, ce qui crée un courant d'air ascendant. L'air dans le bâtiment est extrait par la tour tandis que de l'air frais est aspiré vers l'intérieur du bâtiment par les fenêtres. Le processus se poursuit pendant la nuit, de sorte que l'air frais



circule dans le bâtiment. De plus, la masse thermique de la tour permet de stocker du froid pendant la nuit.

Quand il y a du vent pendant la nuit, l'air frais circule dans la direction opposée. L'intérieur du bâtiment est rafraîchi par la ventilation nocturne. Le fonctionnement d'un capteur de vent est directement lié à la dynamique du vent. L'air frais est aspiré au niveau de l'orifice du capteur face au vent (pression positive) vers l'intérieur du bâtiment, tandis que l'air chaud de l'intérieur est extrait par la pression négative créée du côté sous le vent de la tour. Ici, bien que l'air frais soit réchauffé par les murs de la tour avant d'entrer dans le bâtiment, le rafraîchissement peut toujours être suffisamment efficace pour réduire la température dans le bâtiment proche de celle de l'air ambiant. L'enveloppe du bâtiment est refroidie davantage par les échanges radiatifs vers le ciel.

Pendant la journée et en l'absence de vent, le fonctionnement du capteur de vent est l'inverse d'une cheminée. La fraîcheur emmagasinée pendant la nuit rafraîchit l'air extérieur dans la tour, créant ainsi un courant descendant. L'air refroidi est canalisé vers l'intérieur du bâtiment et peut être extrait à travers les portes et les fenêtres. Quand il y a du vent, la circulation d'air s'intensifie avec plus de ventilation dans le bâtiment (Figure 2.16a).

Bien entendu, le fonctionnement de la tour n'est pas constant pendant une journée. L'effet de rafraîchissement et la durée de chaque phase de fonctionnement changent en fonction des fluctuations de la température de l'air, de l'intensité du rayonnement solaire, de la vitesse du vent, etc.

De nos jours, il y a eu une prise de conscience croissante de l'application de ce concept dans le monde et qui a conduit à la conception de nombreux capteurs de vent commerciaux plus compacts et modernes. Certains incluent également de l'énergie solaire alimentant un ventilateur pour augmenter le débit d'air (Hughes et al., 2012).

Plusieurs auteurs ont étudié les contributions des tours à vent sur le rafraîchissement d'un bâtiment. Une étude expérimentale d'un capteur à une ouverture d'un bâtiment résidentiel dans un climat chaud et humide en Inde a été réalisée par Priya et al. (Shanthi Priya et al., 2012). Les résultats de la mesure in situ ont montré qu'en plus d'avoir une vitesse moyenne du vent à l'intérieur du bâtiment de 0,8 m/s, le système était capable de réduire l'humidité relative et la température de l'air intérieur de 15% et d'environ 5°C respectivement. D'autres études ont aussi prouvé la capacité du capteur du vent à rafraîchir l'intérieur d'un bâtiment en climat

chaud, même par temps calme (Shanthi Priya et al., 2012; Yaghoubi et al., 1991).

Un moyen d'améliorer et d'augmenter le potentiel de la ventilation naturelle avec le capteur à vent est de le combiner avec une cheminée solaire (Nouanégué et al., 2008; Pearlmutter et al., 1996) (Figure 2.16c). Cette dernière possède une surface très absorbante conçue pour capter un maximum de rayonnement solaire. La cheminée chauffe l'air à l'intérieur du canal et l'air chaud monte dans la tour pour ainsi être évacué par le haut, ce qui attire plus d'air en bas de la cheminée (Lee and Strand, 2009; Zhai et al., 2011). Cependant, il est important que la cheminée soit isolée du bâtiment lui-même afin que les apports solaires ne se transmettent pas dans les espaces intérieurs. L'étude numérique et expérimentale sur la combinaison d'un capteur de vent et d'une cheminée solaire conduit par Kalantar (Kalantar, 2009) dans le climat chaud et aride de Yazd en Iran, a révélé une baisse de la température de l'air jusqu'à 15°C par ce système. D'autres études sur la performance d'une cheminée solaire en climat chaud montre que cette solution réduit la consommation liée à la climatisation de 10-20% (Bansal et al., 1994; Khedari et al., 2003).

Malgré tous les avantages qu'offre cette stratégie, on peut opposer à son utilisation le fait que ses ouvertures laissent facilement entrer les insectes et la poussière (Butera et al., 2014; Karakatsanis et al., 1986). Ce problème est particulièrement grave en zone chaude où la dengue et le paludisme tuent des milliers de personnes par année. Les tours plus récentes sont équipées d'écrans au niveau des ouvertures d'entrée pour éloigner au moins les insectes et des systèmes de contrôle de débit de ventilation, ce qui a pour effet de réduire le flux d'air d'environ 50 % (Brown and DeKay, 2013; Koenigsberger, 1974).

#### 2.4.3.2. *Rafraîchissement radiatif*

Le refroidissement radiatif est basé sur la perte de chaleur par émission de rayonnement grandes longueurs d'onde d'un corps à un autre corps de température plus basse, qui joue le rôle de récepteur de chaleur. Dans le cas des bâtiments, la ressource ciel joue le rôle de puits d'énergie quand sa température est inférieure aux températures de surfaces du bâtiment. Dans le contexte climatique de l'étude, nous avons vu qu'un rafraîchissement radiatif très limité des parois se produit naturellement la nuit pendant une grande partie de l'année (cf. section 1.4). En effet, la nécessité de se protéger contre le rayonnement solaire pendant les journées

chaudes fait que les solutions constructives utilisées dans ces régions limitent, fortement, les échanges thermiques, potentiellement bénéfiques, entre le bâtiment et la voûte céleste plus fraîche pendant les nuits de la saison fraîche. Les stratégies de rafraîchissement radiatif visent, donc, une meilleure évacuation de la chaleur reçue par les surfaces, quand cela est possible, pour réduire le besoin de climatisation. Les surfaces les plus influencées par les radiations thermiques vers la voûte céleste sont les surfaces horizontales, comme la toiture du bâtiment.

Il existe deux méthodes d'application de refroidissement radiatif dans les bâtiments : le rafraîchissement radiatif (direct), et le rafraîchissement radiatif hybride (indirect) (Cole, 1976; Košir, 2019; Lechner, 2015; Santamouris and Asimakopoulos, 2013; Zhang et al., 2018). Dans le premier cas, l'enveloppe du bâtiment rayonne vers le ciel et se refroidit ce qui induit une perte de chaleur dans le bâtiment. Dans le second cas, le radiateur n'est pas l'enveloppe du bâtiment, mais habituellement une plaque métallique dans laquelle circule un liquide calo-porteur.

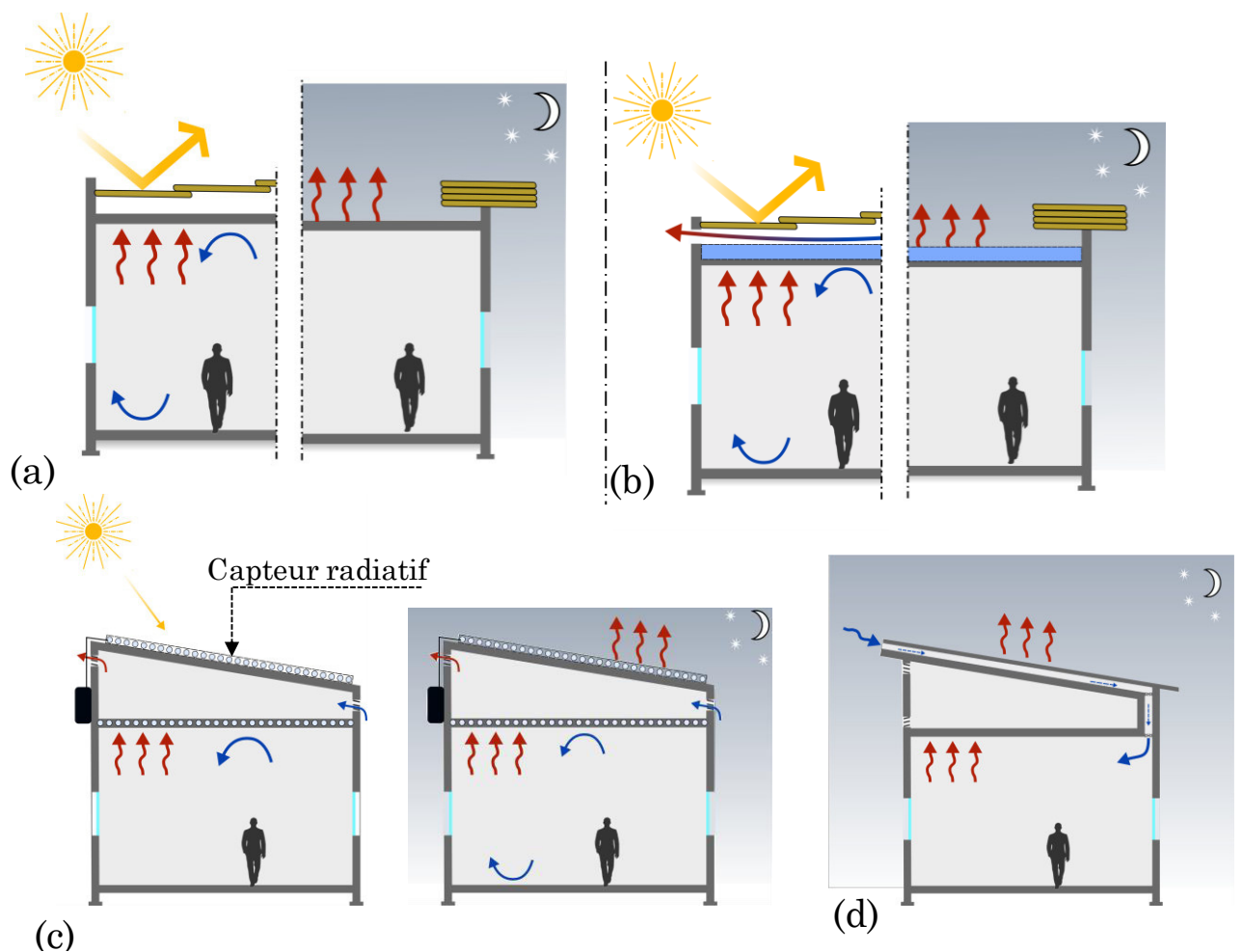
Le système d'isolation thermique amovible placé entre un toit rayonnant et l'environnement intérieur (Bozonnet et al., 2011; Lechner, 2015; Roche, 2017; Xu et al., 2012) est une solution de rafraîchissement radiatif comme illustré dans la Figure 2.17a. Pendant la journée, des panneaux isolants mobiles sont placés sur la toiture pour minimiser les apports de chaleur par rayonnement solaire et par convection avec l'air ambiant plus chaud, tandis que pendant la nuit, la toiture reste exposée à la fois aux échanges radiatifs nocturnes vers le ciel et aux échanges convectifs avec l'air extérieur. Ce concept simple peut se combiner avec une toiture à haute capacité de stockage thermique (par exemple une dalle en béton). La fraîcheur emmagasinée dans le béton peut alors servir de puits de chaleur dans le bâtiment. Les performances de ce concept ont été testées par Givoni (Givoni, 1994) en Israël. Il a observé une baisse la température moyenne intérieure d'environ 4 °C par rapport au cas témoin. Bien qu'il ait été démontré que les toits en béton couramment utilisés dans de nombreux pays, peuvent fournir un rafraîchissement radiatif efficace, cela ne peut être possible qu'avec l'application d'une isolation dynamique.

Le rafraîchissement radiatif indirect consiste à exposer un liquide caloporteur aux échanges radiatifs vers la voûte céleste dans un capteur radiatif. Ce liquide est par la suite stocké dans des réservoirs ou dans l'enveloppe pour rafraîchir l'intérieur du bâtiment pendant la journée (Košir, 2019; Lechner, 2015). Le capteur radiatif peut être constitué d'une plaque métallique avec un revêtement « cool roof », placé sur un toit isolé, sous lequel on fait passer l'air

de ventilation (Figure 2.17d). Pendant la nuit, l'air passe sous la tôle et commence à se rafraîchir. La fraîcheur récupérée est transférée à l'intérieur du bâtiment pour dissiper la chaleur absorbée par les parois, de la même manière que la ventilation nocturne décrite ci-dessus.

La chute de température attendue serait d'environ 2 à 6 °C en fonction du débit d'air à la sortie du système (Givoni, 1994; Khedari et al., 2000).

Le système de refroidissement radiatif « NightCool » conçu par Parker et al. (Parker et al., 2008) utilise ce principe. Les résultats de test ont montré que le « NightCool » pouvait couvrir 46% des besoins de rafraîchissement annuels dans une maison en Floride.



**Fig.2. 17** - Quelques systèmes de rafraîchissement radiatif : (a) Système de toiture à isolation dépliable : le jour elle déployée et le soir repliée pour permettre l'évacuation de la chaleur par radiation ; (b) Skytherm ou système de toiture-bassin : l'eau se refroidit par radiation et rafraîchi la sous-toiture ; (c) Capteur

radiatif nocturne ; (d) Récupération de l'air frais sous toiture pendant la nuit, le jour le système est condamné.

D'autres versions plus sophistiquées ont été proposées utilisant l'eau comme fluide caloporteur dans un collecteur placé sur la toiture (Figure 2.17c). Le fonctionnement d'un tel radiateur est l'opposé d'un capteur solaire. L'eau refroidie est stockée dans un réservoir pour ensuite être utilisée pour refroidir le bâtiment pendant la journée.

Il existe aussi les « skytherms » d'Harold Hay (Givoni, 1994; Gonzalez, 1997; Lechner, 2015; Spanaki et al., 2011; Yannas et al., 2019). Dans ce système, le toit est constitué de plaques en acier, au-dessus desquelles des sacs en plastique remplis d'eau, sont placés. L'eau est utilisée ici comme élément radiatif et masse thermique pouvant stocker et véhiculer la fraîcheur (Figure 2.17b). Au-dessus, des panneaux isolants peuvent être actionnés manuellement ou automatiquement afin de couvrir ou d'exposer les sacs d'eau. Pendant la nuit, les bidons d'eau sont exposés et rafraîchis par radiation vers le ciel mais aussi par convection avec l'air extérieur. L'eau ainsi rafraîchie est en contact direct avec la tôle métallique qui amplifie les échanges radiatifs et sert donc d'élément de rafraîchissant pour tout l'espace situé au-dessous. Le système est complètement isolé durant la journée et la fraîcheur stockée par l'eau est restituée. Les panneaux isolants peuvent être, en plus, recouverts d'un revêtement « cool roof ».

Des travaux expérimentaux réalisés en climat chaud et aride ont montré que le Skytherm pouvait réduire la température intérieure d'environ 6°C et couvrir environ 29% les besoins de rafraîchissement par rapport à un bâtiment témoin avec un toit standard (Givoni, 2011; Kharrufa and Adil, 2008). Raeissi et Taheri (Raeissi and Taheri, 2000) ont modélisé un bâtiment avec cette technique de rafraîchissement dans le contexte climatique Iranien. Ils ont conclu une puissance de rafraîchissement maximale fournie par le système en été de 18 W/m<sup>2</sup> avant l'aube et un minimum de 8 W/m<sup>2</sup> en fin de soirée. Les besoins de rafraîchissement totaux, quant à eux, ont été réduits de presque 52% avec ce système. Les performances de ce système peuvent être améliorées par combinaison d'un système de rafraîchissement évaporatif (avec une pulvérisation d'eau sur les sacs limitée à la nuit uniquement) (Tiwari et al., 1982; Yannas et al., 2019).

D'autres variantes du Skytherm avec un bassin d'eau sur une dalle en béton recouverte d'une membrane imperméable et non sur de la tôle sont présentées dans la littérature (Sharifi and Yamagata,

2015). D'autres versions consistent à séparer l'isolation de la surface de l'eau par une lame d'air ventilée (Bravo and González, 2013; Kharrufa and Adil, 2008; Santamouris and Asimakopoulos, 2013; Spanaki et al., 2014; Yannas et al., 2019). Le principal avantage de cette dernière solution est qu'elle utilise plusieurs dissipateurs de chaleur environnementaux simultanément. Bien que le vent puisse circuler librement entre le niveau d'eau et le panneau isolant, le système peut être complété par une ventilation mécanique pour augmenter le flux d'air, et améliorer l'évaporation et réduire la température de l'eau même pendant la journée lorsque le système est couvert (Figure 2.17b).

Un autre concept de toiture « diode » développé par (Berger et al., 1985) qui provient de la volonté de conserver la technique du Skytherm sans recourir à une isolation amovible. Il s'agit d'un lit de galets avec un peu d'eau qui repose sur le plafond du bâtiment en tôle galvanisée, développé pour les constructions en pays chauds. La face intérieure de la tôle recouverte d'une peinture émissive favorise les échanges radiatifs dans l'habitat.

Une autre tôle galvanisée avec un revêtement « cool roof » ferme l'ensemble du dispositif comme illustré sur la Figure 2.18. Le dispositif forme donc un milieu fermé étanche. La couche d'air entre l'eau et l'écran supérieur assure l'isolation diurne, mais devient conductrice lorsque le processus d'évapo-condensation fonctionne.

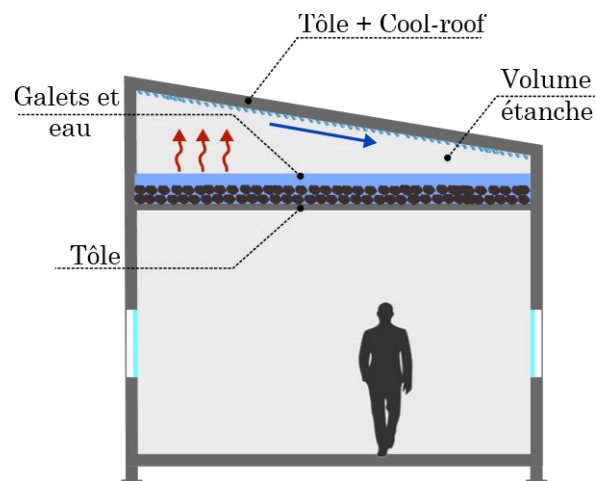


Fig.2. 18. Toiture diode.

Une autre tôle galvanisée avec un revêtement « cool roof » ferme l'ensemble du dispositif. Ce dernier est maintenu en un milieu fermé bien étanche et la couche d'air entre l'eau et l'écran supérieur assure l'isolation diurne, mais devient conductrice lorsque le processus d'évapo-condensation fonctionne. En effet, pendant la nuit, la tôle supérieure est refroidie par rayonnement grande longueur d'onde, et par convection lorsqu'elle est plus chaude que l'air ambiant. Le transfert de chaleur de l'intérieur de l'habitat vers l'extérieur est assuré par une partie de l'eau de la masse inertielle : l'évaporation entraîne une saturation en humidité de la couche

d'air et une condensation sur la face intérieure de l'échangeur supérieur dont la température est plus basse. Le condensat redescend au plus bas de la masse thermique par gravité. Dans la journée, l'échauffement de l'absorbeur supérieur est limité par le « cool roof » et la couche d'air est immobile et se comporte comme un isolant. La fraîcheur stockée pendant la nuit par effet caloduc (mouvements verticaux ascendants de l'eau évaporée, et descendant gravifique du condensat) est restituée pendant la journée.

Cependant, la disponibilité d'une isolation dynamique simple, peu coûteuse, pratique et sans problèmes est toujours en cause pour ce genre de système. Ce concept nécessite une conception de toit spéciale avec une structure du bâtiment renforcée pour supporter le poids de la masse thermique et un traitement supplémentaire contre l'humidité. Il est aussi moins avantageux pour les bâtiments à plusieurs étages parce que seul le dernier étage bénéficiera du refroidissement passif fourni par ces solutions bioclimatiques. Par ailleurs, l'efficacité du rafraîchissement radiatif est plus importante sous un ciel dégagé et une faible humidité. Néanmoins, même dans des conditions humides un rafraîchissement est toujours réalisable avec une efficacité inférieure. Étant donné ce faible refroidissement, la surface du toit pourrait être augmenté par débordement, à la fois pour protéger les murs verticaux et augmenter la surface d'échange radiative. En outre, tous les travaux cités précédemment sont principalement axés sur l'évaluation des économies d'énergie liées aux systèmes de refroidissement radiatif, mais il n'existe pas d'analyse économique approfondie pour la mise en œuvre de ces techniques de refroidissement radiatif dans les bâtiments. Pour ces raisons, l'utilisation du refroidissement radiatif n'est pas encore répandue et des recherches supplémentaires sur les applications pratiques sont nécessaires.

Enfin, on observe de nos jours le développement d'une nouvelle génération des technologies de rafraîchissement radiatif diurne très avancé reposant sur une sélectivité des longueurs d'ondes réfléchies et émises. Ils sont munis de dispositifs photoniques, conçus dans le but de réfléchir pratiquement tous les rayonnements solaires et d'émettre majoritairement le rayonnement grande longueur d'onde solution pouvant refroidir jusqu'à 20°C en dessous de la température ambiante dans un climat humide et jusqu'à 40 °C dans un environnement aride (Raman et al., 2014; Rephaeli et al., 2013; Sun et al., 2017; Zhu et al., 2013). Cependant, une grande partie de ce travail en est aux toutes premières étapes de la recherche et, dans certains cas, n'a pas encore été montrée expérimentalement même à l'échelle du laboratoire. Bien que les économies d'énergie potentielles soient impressionnantes, ces activités

sont en début de recherche et de développement et il n'existe actuellement aucune technologie dans l'industrie pour fabriquer ce genre de technologie de manière économique sur de grandes surfaces pour réduire leurs coûts probablement excessivement chers. Il ne s'agit probablement pas d'une solution à court terme, mais, les voies menant à une fabrication évolutive et éventuellement rentable à grande échelle doivent être identifiées pour ces nouveaux revêtements.

#### 2.4.3.3. *Rafraîchissement par évaporation*

Jusqu'à présent, nous n'avons abordé que les changements de température dus au refroidissement sensible. Les stratégies de rafraîchissement par évaporation conduisent aussi à une réduction de la température. Le refroidissement peut être direct ou indirect.

Le principe physique du rafraîchissement évaporatif direct (Figure 2.19) consiste à humidifier de l'air non saturé et de refroidir par ce biais l'air selon un processus d'humidification adiabatique. L'eau est fournie par un asperseur, sous forme de fines gouttelettes, c'est le cas du capteur de vent dans lequel l'eau est pulvérisée en haut de la tour (Lechner, 2015; Tiwari et al., 1982).

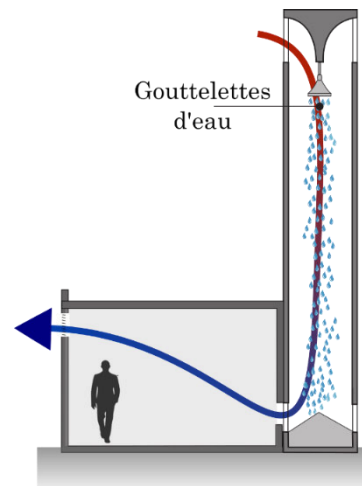


Fig.2. 19. rafraîchissement par évaporation direct

Les gouttelettes s'évaporent très rapidement sans atteindre les usagers et puisent sa chaleur latente dans l'air qui voit sa température sèche décroître et son humidité augmenter tout en conservant une enthalpie quasiment constante. L'air rafraîchi est ensuite canalisé dans la tour et se propage dans le bâtiment. La température minimale qui peut être atteinte dans ce système est la température humide de l'air entrant.



Une autre façon d'exploiter le rafraîchissement évaporatif direct consiste à faire passer un flux d'air dans un milieu poreux saturé d'eau de type panneaux de cellulose (Bahadori, 1978; Belarbi et al., 1997; Chan et al., 2010; Jomehzadeh et al., 2017) ou plaque de céramique (systèmes à pads ou à buses), comme illustrer sur la Figure 2.20 ci-contre, avant de rafraichir l'intérieur du bâtiment.

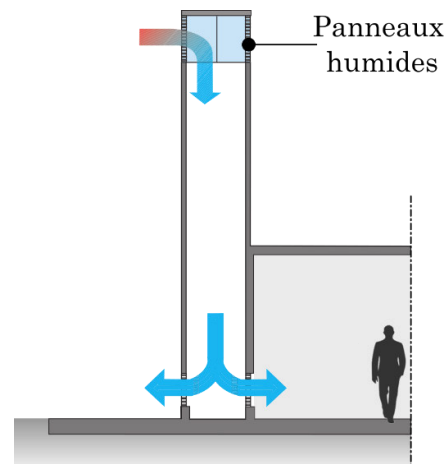


Fig.2. 20. rafraîchissement par évaporation direct avec des panneaux humides

L'étude expérimentale de Khani et al. (Khani et al., 2017) combinant surface humide et capteur de vent a démontré une réduction moyenne de 10°C et une augmentation de l'humidité de 36%.

Les systèmes évaporatif directs passifs incluent aussi l'utilisation de la végétation, de fontaines, ou des bassins d'eau dans les cours, la pulvérisation d'eau sur l'enveloppe ou à l'intérieur pour réduire la température de l'air.

Ces méthodes ne fonctionnent que dans des régions au climats chauds et sec. Cependant c'est paradoxalement dans ces climats que l'eau est une ressource rare et souvent source des conflits sociaux et de tension régionale, ce qui rend difficile son utilisation.

Le processus peut être contre-productif et inefficace dans le climat chaud avec un taux d'humidité fort (Cuce and Riffat, 2016). L'exploitation indirecte du potentiel de rafraîchissement de l'eau serait alors une solution appropriée (Figure 2.21). Ce processus permet de ne pas influencer l'hygrométrie de l'espace rafraîchi.

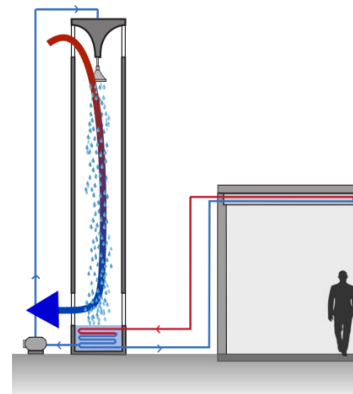


Fig.2. 21. rafraîchissement par évaporation indirect.

Ce système envoie de l'air, rafraîchi et humidifié par évaporation, dans un échangeur de chaleur, traversé par l'air injecté dans le bâtiment.

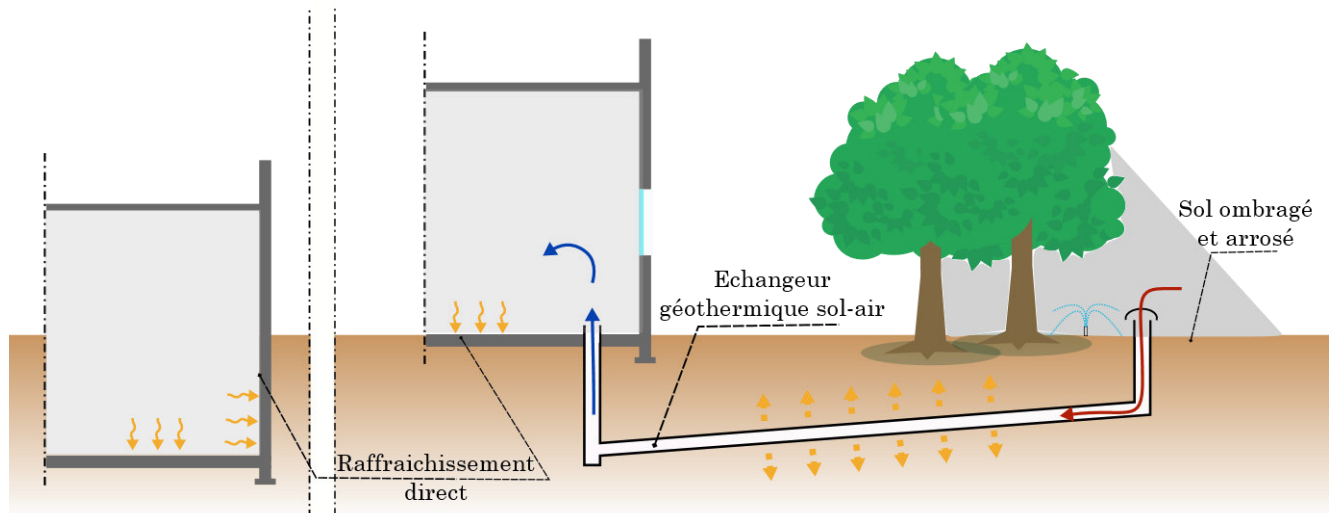
Par conséquent, l'humidité absolue de l'air reste la même et l'augmentation de l'humidité relative de l'air rafraîchi n'est qu'une conséquence de la diminution de la température de l'air.

#### 2.4.3.4. *Rafraîchissement géothermique*

Contrairement au climat tempéré où la température du sol à 2 à 3 m de profondeur peut être une source de fraîcheur pendant l'été, dans les régions à climat chaud et humide la température du sol est souvent très élevée (cf. partie 1.4) pour être utilisée comme source de frigorifères. Néanmoins, cette stratégie serait aussi appropriée dans les régions chaudes et sèches avec des hivers doux (Givoni, 1994; Lechner, 2015; Santamouris and Asimakopoulos, 2013). Dans de tels endroits, lorsque la température du sol est suffisamment fraîche, il est possible de l'utiliser pour rafraîchir un bâtiment avec plusieurs méthodes.

Le rafraîchissement par le sol est basé sur la dissipation de la chaleur d'un bâtiment vers le sol dont la température devient plus stable à des profondeurs relativement faibles parce que les conditions dynamiques ambiantes sont atténuées. L'idée est d'exploiter la grande capacité de stockage thermique de la terre.

Ce rafraîchissement peut être exploité avec des systèmes directs et/ou indirects. Dans les systèmes directs, l'interface entre le bâtiment et le sol est utilisée directement, le contact direct qu'un bâtiment établit avec la terre sous-jacente permet l'échange d'énergie thermique par conduction. En règle générale, la dalle du rez-de-chaussée d'un bâtiment peut être conçue pour récupérer la fraîcheur du sol. Comme alternative à la dalle de fondation à contact direct (Figure 2.22), le bâtiment peut être également hypogé ou semi-hypogé en utilisant la masse thermique de la terre comme écran de protection contre la chaleur qui contribue à garder stable la température du bâtiment (Givoni, 1994; Looman, 2017). Le principe est de diminuer significativement les apports de chaleur par convection et par rayonnement tout en augmentant les échanges de chaleur par conduction. La température du bâtiment baisse, si le sol est à une température inférieure à celle de l'air.



**Fig.2. 22** Rafraîchissement géothermique direct et indirect.

Il existe aussi la possibilité d'exploiter la fraîcheur du sol, sans pour autant enterrer le bâtiment, au moyen d'échangeurs thermiques air-sol ou eau-sol (rafraîchissement géothermique indirect) (Lechner, 2015; Santamouris and Asimakopoulos, 2013). Les échangeurs air-sol sont des tubes enterrés à travers lesquels on fait circuler de l'air de ventilation progressivement introduit dans le bâtiment afin de le pré-rafraîchir. Le diamètre et la longueur des tubes dépendent des caractéristiques du bâtiment à rafraîchir, du climat du site et des caractéristiques du sol.

Pour obtenir un effet de rafraîchissement maximal, les études présentes dans la littérature scientifique recommandent un enfouissement aussi profond que possible (généralement 1 et 2 m dans le sol), une longueur de l'échangeur importante (généralement 40 à 50 m), un diamètre de conduite faible (généralement 20 cm) et une vitesse modérée afin de favoriser les échanges entre l'air et le sol (Benhammou et al., 2015; Florides and Kalogirou, 2007; Nebbar et al., 2014). Les tubes peuvent être placés dans une configuration verticale qui nécessite des forages ou placés horizontalement dans des tranchées, ce qui élimine le besoin de forer mais nécessite plus d'espace.

En plus des collecteurs à air, les échangeurs eau-sol peuvent aussi être utilisés. Ils consistent en de petits tuyaux enterrés à travers lesquels on fait passer un liquide qui, une fois rafraîchi, réduit la température intérieure du bâtiment, soit directement avec des planchers radiants, soit en rafraîchissant l'air à travers des systèmes de récupération des frigorifiques. Il est intéressant de souligner

ici qu'un procédé similaire est utilisé pour extraire la fraîcheur de l'eau de mer à une certaine profondeur. Dans ce dernier système, il est important que la profondeur à partir de laquelle l'eau est extraite soit suffisante pour que cette ressource soit suffisamment froide pour assurer un rafraîchissement.

Plusieurs travaux de recherche ont étudié le potentiel rafraîchissement de cette solution en climat chaud. L'analyse théorique d'Al-Ajmi et al. (Al-Ajmi et al., 2006) dans le climat chaud et aride du Koweït ainsi que l'analyse paramétrique menée par Lee et Strand (Lee and Strand, 2009) sur plusieurs conditions climatiques (tempéré et sec, tempéré et humide, chaud et sec, chaud et humide) ont montré une réduction allant jusqu'à 50% des besoins de rafraîchissement.

D'autres travaux ont conclu qu'il était aussi possible d'abaisser la température du sol pour un rafraîchissement dans des contextes climatiques chauds et humides (Brown and DeKay, 2013; Gao et al., 2018; Manzano-Agugliaro et al., 2015; Roche, 2017; Slee et al., 2013). Cela passe par l'utilisant des moyens très simples, en maintenir le sol humide et ombragé en permanence. Cependant, il est important de noter que l'extraction de la fraîcheur du sol s'use progressivement. Si cette opération se répète d'année en année sans arrêt, la température moyenne du sol augmente et son utilisation devient presque non exploitable.

---

## 2.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté le concept de l'architecture bioclimatique fondé sur la connaissance des interactions entre le bâtiment et son environnement. L'objectif est de moduler autant que possible l'enveloppe du bâtiment qui sert de filtre entre l'environnement intérieur et extérieur pour maximiser la valorisation des ressources énergétiques environnementales permettant une conception confortable et à faible énergie.

Au cœur de cette notion se trouve une démarche de conception adoptée par les concepteurs dès la phase d'esquisse du bâtiment. Deux approches de conception bioclimatiques ont été identifiées. La première caractérisée par la copie ou la réinterprétation des enseignements de l'architecture traditionnelle pourrait ne pas représenter l'approche optimale en raison de récents phénomènes d'îlot de chaleur urbain ou de chaleur anthropique. La seconde est basée sur l'étude analytique des spécificités climatiques lors de la phase de diagnostic, et de la performance des solutions constructives lors de la phase de conception pour un choix optimal et justifié.

Les mesures de conception les plus courantes ont été aussi décrites et regroupées selon les trois grandes stratégies : La protection solaire, la modulation de la chaleur ainsi que le rafraîchissement passif. Presque toutes les solutions présentées fonctionneront dans les climats chauds et secs. Dans les régions très humides les choix sont limités, mais la combinaison de diverses stratégies peut être bénéfique et réduire le besoin de climatisation. Ce dernier est considéré comme un acquis de base pour assurer un confort intérieur acceptable.

Malgré ces solutions constructives, il existe différentes raisons qui expliquent leur utilisation rare dans le contexte climatique chaud : critères d'évaluation de leurs performance complexes, manque d'intérêt pour la réduction des besoins énergétiques surtout dans les pays chauds où seul le rafraîchissement passif ne permet pas le confort, barrières économiques (coût élevé, durabilité, coût de maintenance, etc.), sécurité, ou représentation sociale. Afin de remédier au manque de conscience bioclimatique dans ce contexte, la recherche scientifique a permis le développement des méthodes et outils d'analyse présentés. Cependant, il n'existe pas de jeu d'indicateurs complet, qui puissent être appliqué pour des climats chauds, capables d'analyser systématiquement les potentiels des ressources énergétiques de l'environnement et d'évaluer les solutions constructives au regard de ce potentiel bioclimatique. Dans cette optique, l'objectif principal de cette thèse est de proposer des nouveaux critères d'analyse pouvant servir de base dans la démarche de conception bioclimatique des bâtiments adaptée pour le climat chaud. C'est l'objet du chapitre qui suit.

## 3. Nouveau jeu d'indicateurs bioclimatiques pour les climats chauds et humides

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>
<b>3.2</b>	<b>Cadre d'application des indicateurs</b>
<b>3.3</b>	<b>Identification des sources de rafraîchissement environnementales</b>
3.3.1.	Définition d'une ressource et d'une contrainte bioclimatique
3.3.2.	Identification des ressources bioclimatiques
<b>3.4.</b>	<b>Définition des indicateurs bioclimatiques</b>
3.4.1.	Méthode générale de calcul et bases de la démarche
3.4.2.	Indicateurs de Ressources Environnementales
3.4.3.	Indicateur de Performances du Bâtiment
3.4.4.	Fermeture de Bilan énergétique
3.4.5.	Représentation graphique
3.4.6.	Indicateurs relatifs
<b>3.6</b>	<b>Confrontation des indicateurs à un cas d'étude</b>
3.6.1	Objectifs
3.6.2.	Description du cas d'étude
3.6.3.	Analyse des indicateurs bioclimatiques – Indicateurs de ressources environnementales
3.6.4.	Analyse des indicateurs bioclimatiques – Indicateurs de Performance des bâtiments
3.6.5.	Discussion
<b>3.7</b>	<b>Conclusion</b>

---

### 3.1. Introduction

Il a été démontré dans le chapitre précédent, la nécessité de développer des nouveaux outils capables non seulement de diagnostiquer les potentiels énergétiques d'un site, mais aussi les performances bioclimatiques de solutions constructives. Pour ce faire un ensemble d'indicateurs est développé dans ce chapitre. Ils sont fondés sur des méthodes de calcul simples qui peuvent être comprises et utilisées par tout concepteur. Nous allons tout d'abord préciser le cadre de notre étude et introduire quelques nouvelles terminologies nécessaires pour la compréhension des notions qui seront abordées par la suite, avant de définir les nouveaux indicateurs. Enfin une application sur un cas d'étude est proposée pour juger la pertinence de ces nouveaux indicateurs.

---

## 3.2. Cadre d'application des indicateurs

L'objectif ultime d'une démarche bioclimatique est d'obtenir un bâtiment entièrement passif, qui assure les conditions de confort intérieur sans système mécanique ou thermique. Cependant, dans le contexte climatique de cette étude (chaud et humide), cet objectif est rarement atteignable. En conséquence, le cadre d'application des indicateurs développée dans ce chapitre est limitée aux bâtiments entièrement climatisés. Grâce au système de climatisation, la température de l'air à l'intérieur du bâtiment est constamment égale ou inférieure à la température de consigne de rafraîchissement  $T_{cr}$ .

Dans ce contexte, les stratégies de conception bioclimatiques restent similaires aux stratégies de conceptions des bâtiments passifs. Elles visent à protéger l'environnement intérieur du bâtiment des sources de chaleur externes, et à exploiter au maximum les puits de chaleur disponibles dans l'environnement du bâtiment. Seul l'objectif de ces stratégies change, car elles sont mises en œuvre pour minimiser les consommations d'énergie liée à la climatisation, au lieu d'être mises en œuvre pour assurer directement le confort.

---

## 3.3. Identification des sources de rafraîchissement environnementales

### 3.3.1. Définition d'une ressource et d'une contrainte bioclimatique.

Pour qu'une ressource environnementale puisse participer au rafraîchissement de l'ambiance intérieure du bâtiment, il faut que sa température soit inférieure à la température de consigne de rafraîchissement  $T_{cr}$ .

Une ressource bioclimatique est donc définie comme un élément de l'environnement dont la température caractéristique est inférieure à  $T_{cr}$ . Cette ressource doit être exploitable, c'est-à-dire qu'il doit être possible de transférer une partie de sa fraîcheur à l'ambiance interne du bâtiment.

A l'inverse, une contrainte bioclimatique est une source de chaleur pouvant potentiellement réchauffer l'intérieur du bâtiment, avec une température caractéristique supérieure à  $T_{cr}$ . De manière générale, on parlera de source énergétique environnementale pour faire référence à ces deux termes.

### 3.3.2. Identification des ressources bioclimatiques

Un bâtiment échange de la chaleur avec quatre éléments environnementaux : le soleil, l'air extérieur, la voûte céleste, et les surfaces extérieures (incluant les parois des bâtiments environnant et le sol).

De toute évidence, le soleil ne sera jamais une ressource bioclimatique ; sa température caractéristique est évidemment trop élevée. Ce qui fait de lui la principale contrainte dans le climat chaud.

L'analyse du climat présentée dans la section (section 1.3) a montré que la température de l'air extérieur  $T_{a,ext}$  passait dessous de  $T_{cr}$  pendant une partie non négligeable de l'année (les nuits durant la saison fraîche particulièrement). L'air extérieur est donc potentiellement une ressource bioclimatique.

Un bâtiment échange de la chaleur avec l'air extérieur par :

- Convection sur la surface externe de son enveloppe : la fraîcheur de l'air extérieur doit transiter par conduction au travers de l'enveloppe avant d'atteindre le milieu intérieur.
- Ventilation naturelle : la fraîcheur est transférée directement au milieu intérieur au travers des ouvertures.

Les modes de transfert de chaleur étant très différents, l'auteur distingue deux ressources bioclimatiques, la ressource convection externe et la ressource ventilation.

L'enveloppe du bâtiment échange aussi de la chaleur avec les surfaces extérieures par rayonnement en grandes longueurs d'ondes. Les surfaces externes comprennent le sol, les murs des bâtiments environnants et la voûte céleste. Au tout début de la conception du bâtiment et notamment à l'étape de diagnostic du site (cf. section 2.2), il n'est guère possible de prédire les températures du sol et des bâtiments environnants, mais la température de la voûte du ciel  $T_c$  peut être estimée à partir de données météorologiques. Or, on a vu (cf. section 1.4.2.5) que la température de la voûte céleste est presque toujours inférieure à  $T_{cr}$ . Elle agit donc généralement comme une ressource bioclimatique, que l'on nommera ressource ciel.

L'analyse de la température du sol dans le climat chaud et humide de Djibouti (c.f. section 1.3.2.2) a montré que la température du sol en profondeur est toujours supérieure à  $T_{cr}$ . Des températures inférieures à  $T_{cr}$  ne peuvent être atteintes que sur une épaisseur de sol limitée à quelques centimètres près de la surface sur sol et pendant une période limitée de la journée. Il est difficile de dissiper la





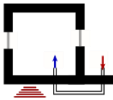
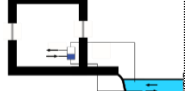



chaleur d'un bâtiment vers le sol dans ce contexte. Le sol ne sera pas considéré comme une ressource bioclimatique.

Enfin, l'analyse des valeurs d'humidité ambiante dans le climat chaud et humide de Djibouti (c.f. 1.3.2.2) a montré que l'humidité moyenne systématiquement supérieure à 40%, et dépassait même 70% en saison fraîche. Dans ce contexte, des solutions de rafraîchissement par évaporation sont difficilement envisageables. L'humidité de l'air ne sera pas considérée non plus comme une ressource bioclimatique.

Pour résumer, seuls les quatre premiers éléments du tableau 3.1 suivant sont alors étudiés dans ce travail.

**Tableau 3. 1** Matrice des sources énergétique environnementales

	Ressource	Contrainte	Etudiée
			
 Convection externe			
 Ventilation naturelle			
 Ciel			
 Sol			
 Eau de mer			
 Humidité			

### 3.4. Définition des indicateurs bioclimatiques

#### 3.4.1. Méthode générale de calcul et bases de la démarche

Tous les indicateurs bioclimatiques définis dans cette section sont des quantités d'énergie. La notion de potentiel énergétique fait référence à une ressource bioclimatique alors que le terme antipotentiel énergétique est utilisé pour une contrainte bioclimatique.

Ces potentiels énergétiques sont des intégrales quotidiennes de la partie entrante / sortante des flux de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment (Figure 3.1). Le choix de la période d'intégration de 24 heures découle de la volonté d'intégrer les effets de l'inertie dans la valeur des potentiels. En effet, lorsqu'un potentiel de rafraîchissement est disponible alors que la demande est inexistante, il peut être stocké dans la masse thermique du bâtiment pour une utilisation ultérieure. La première composante fréquentielle de ce stockage d'énergie correspond au stockage diurne.

Considérons un flux de chaleur  $\Phi$  traversant l'enveloppe du bâtiment. Le flux de chaleur  $\Phi$  est positif lorsque la chaleur circule vers l'environnement intérieur. Le potentiel  $\bar{Q}^*$  vaut l'intégrale de la partie négative de  $\Phi$ , et représente un potentiel de rafraîchissement. L'antipotentiel  $\bar{Q}$  est l'intégrale de la partie positive de  $\Phi$ , et il représente les apports de chaleur dans le bâtiment.

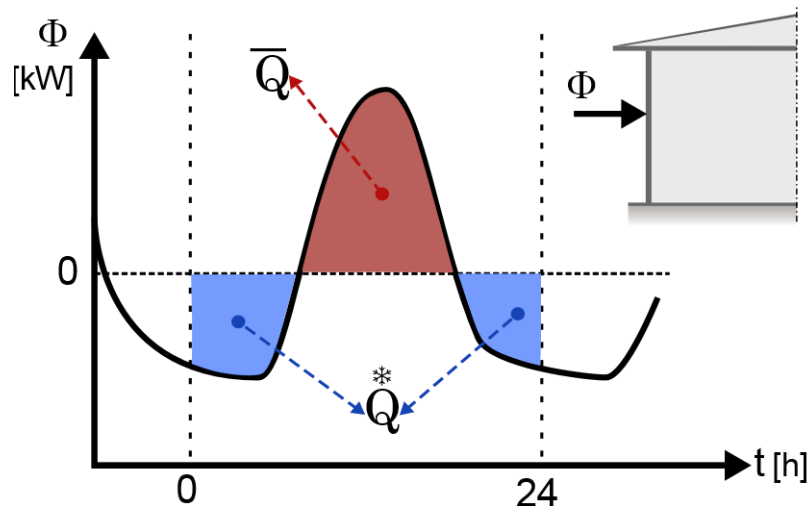


Fig.3. 1. Principes de base pour le calcul des potentiels énergétiques.

Les potentiels et les antipotentils énergétiques sont calculés à partir des flux représentatifs des différents modes de transport de la chaleur entre le bâtiment et son environnement : convection, rayonnement courtes longueurs d'onde, rayonnement grandes longueurs d'onde, et advection.

Le premier ensemble de potentiels énergétiques repose sur des données météorologiques spécifiques du lieu de construction et sur un cahier des charges minimal du bâtiment (surface habitable et nombre de niveaux). Il s'agit des « indicateurs de ressources environnementales » (ERIs). Ces indicateurs évaluent, pour chaque ressource bioclimatique, la quantité d'énergie maximale disponible sur le site.

Le deuxième ensemble de potentiels et antipotentils énergétiques permet d'évaluer la quantité réelle d'énergie utilisée par le bâtiment, caractérisé par un ensemble spécifique de solutions architecturales. Ces indicateurs sont conçus pour orienter le choix du concepteur, durant la phase de conception, vers des solutions pertinentes qui optimisent l'exploitation des ressources bioclimatiques et la protection contre les sources de chaleur. Les potentiels énergétiques associés sont appelés « indicateurs de performances du bâtiment » (BPIs). Enfin, un troisième ensemble d'indicateurs fournit des ratios représentatifs.

### 3.4.2. Indicateurs de Ressources Environnementales

#### 3.4.2.1. Problématique : Définition du Virtual Highly Permeable Building

Les ERIs doivent caractériser un site, pas un bâtiment. Leur dépendance à des solutions architecturales et technique doit être minimale.

Ces contraintes nous ont amené à baser les calculs des ERIs sur un bâtiment concept appelé Virtual Highly Permeable Building (VHPB). Ce bâtiment a des caractéristiques telles qu'il représente un optimum en termes de perméabilité avec l'environnement. C'est donc le bâtiment qui exploiterait au mieux les ressources bioclimatiques disponibles sur le site.

Les seules données nécessaires pour dimensionner le VHPB sont la surface habitable du projet de construction  $S_{hab}$ , le nombre d'étages  $N$  prévu, ainsi que la hauteur des étages  $H$ . Ces données sont disponibles lors des phases très en amont des projets de construction, elles font partie du cahier des charges transmis à la maîtrise d'œuvre.

La géométrie du VHPB correspond à un bâtiment de base carré à  $N$  étages. La surface totale des étages du VHPB est égale à la surface habitable du projet de construction  $S_{hab}$ . La forme du VHPB est la forme la plus compacte possible pour un bâtiment de surface habitable  $S_{hab}$  à  $N$  étages.

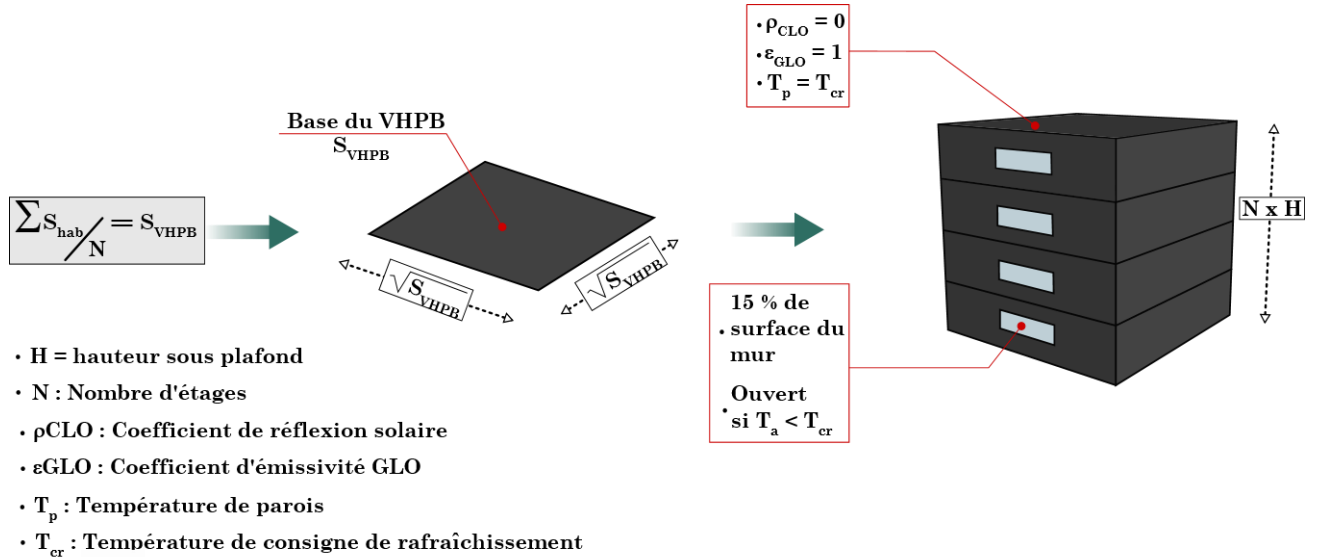


Fig.3. 2. Définition du VHPB

Le volume intérieur du VHPB est entièrement climatisé à la température  $T_{cr}$ . Etant donné que ce bâtiment est conçu pour maximiser les échanges thermiques avec l'environnement extérieur, la résistance thermique de son enveloppe est nulle. La seule résistance thermique entre l'environnement intérieur et extérieur est due au transfert de chaleur par convection sur la surface externe de son enveloppe. La température de l'enveloppe du VHPB est homogène et vaut  $T_{cr}$ .

L'albédo de l'enveloppe est nul, il absorbe l'intégralité du rayonnement solaire. Son émissivité est égale à 1, pour maximiser les échanges avec la voûte céleste. Le VHPB est supposé être un bâtiment isolé sur un site plat: il n'y a pas d'élément d'ombrage externe.

La perméabilité au vent du VHPB est assurée par des fenêtres qui sont ouvertes dès que la température de l'air extérieur est inférieure à  $T_{cr}$ , c'est-à-dire en présence de la ressource de ventilation. La surface des fenêtres  $S_{win}$  est supposée égale à 15% de la surface totale des murs. Ce ratio est le maximum recommandé dans les

climats chauds pour éviter des apports solaires excessifs à l'intérieur du bâtiment (Butera et al., 2014; Enteria et al., 2020; Inanici and Demirbilek, 2000).

Les fenêtres sont réparties de la manière suivante : la moitié sur le mur face au vent ( $S_{win}/2$ ), et l'autre moitié sur les murs sous le vent ( $S_{win}/2$ ). Le bâtiment est en permanence aligné avec la direction du vent.

De plus, les coefficients de pressions sont supposés égaux à 0,5 sur la paroi face au vent et à -0,7 sur la paroi sous le vent de telle sorte à avoir un  $\Delta C_p$  de part d'autre toujours égal à 1,2. Cette configuration maximise le débit de ventilation naturelle.

### 3.4.2.2. Calcul des indicateurs

Les indicateurs de ressource environnementale sont notés  $Q^{*ENV}$  pour les potentiels de rafraîchissement, et  $\bar{Q}^{ENV}$  pour les antipotentielles. Un aperçu complet des ERIs que le VHPB permet de calculer est donné à la Figure 3.3. Les termes  $Q_{sky}^{*ENV}$ ,  $Q_{cv}^{*ENV}$ ,  $Q_{vent}^{*ENV}$  désignent respectivement les potentiels de rafraîchissement des ressources bioclimatiques ciel, convection externe et ventilation naturelle. Les quantités  $\bar{Q}_{sun}^{ENV}$ ,  $\bar{Q}_{cv}^{ENV}$  et  $\bar{Q}_{sky}^{ENV}$  sont respectivement des antipotentielles provenant des contraintes bioclimatiques du soleil, de l'air extérieur (convection externe) et du ciel.

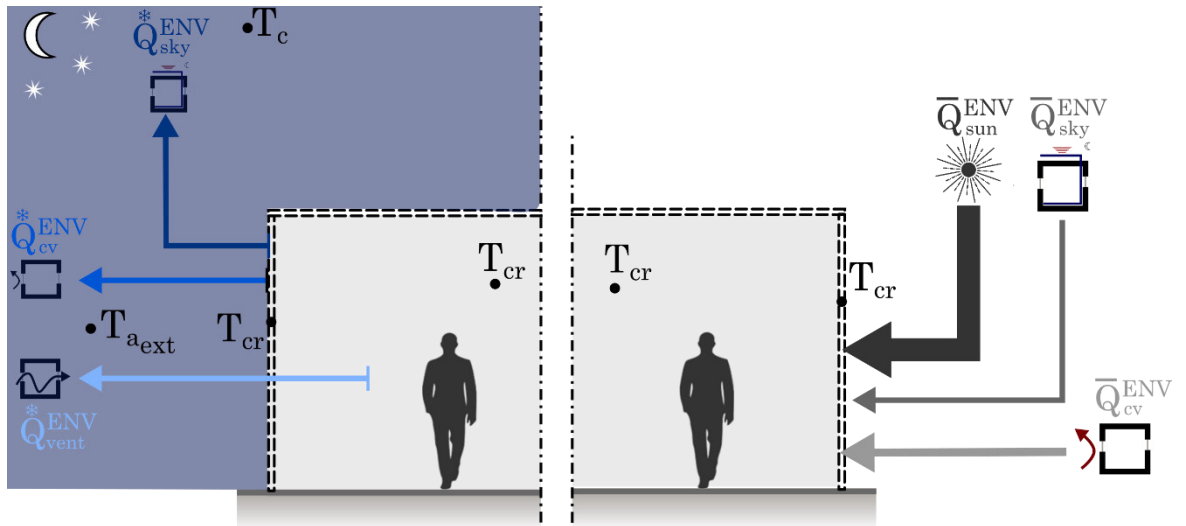


Fig.3. 3. Indicateurs de ressources environnementales

L'antipotentiel environnemental solaire est l'intégrale sur une journée du flux solaire global incident,  $\Phi_s^{ref}$ , absorbé sur l'ensemble de l'enveloppe du VHPB:

$$\overline{Q}_{sun}^{ENV} = \int_0^{24} \Phi_s^{ref}(t) dt \quad (3.1)$$

avec

$$\Phi_s^{ref}(t) = \sum_p (\varphi_{diff}^{ref}(t) + \varphi_{dir_p}^{ref}(t)) S_p \quad (3.2)$$

où  $\varphi_{diff}^{ref}$  représente la quantité de rayonnement solaire diffus sur l'enveloppe à chaque instant,  $\varphi_{dir_p}^{ref}$  le rayonnement direct incident sur chaque paroi  $p$ , et  $S_p$  la surface de la paroi.

La convection externe,  $\Phi_{cv}^{ref}$ , et le rayonnement infrarouge vers le ciel,  $\Phi_{sky}^{ref}$ , sur le VHPB sont définis par les expressions suivantes:

$$\Phi_{cv}^{ref}(t) = S_p h_{cv}(t) (T_{a_{ext}}(t) - T_{cr}) \quad (3.3)$$

$$\Phi_{sky}^{ref}(t) = \sigma S_p F_{sky} (T_{sky}^4(t) - T_{cr}^4) \quad (3.4)$$

Où  $T_{sky}$  est la température du ciel et  $F_{sky}$  le facteur de forme vers le ciel.

Pour estimer le coefficient de transfert de chaleur convectif extérieur  $h_{cv}$ , il existe plusieurs modèles dans la littérature scientifique avec beaucoup de disparité. Néanmoins, l'objectif étant de calculer un ordre de grandeur des indicateurs environnementaux dans cette première phase, le choix de la corrélation a peu d'impact sur les résultats. Nous avons sélectionné la corrélation de Booten et al. (Booten et al., 2012) qui dérive du modèle de Yazdanian et Klems (Yazdanian and Klems, 1993). Elle prend en compte les effets à la fois de la vitesse du vent et du gradient de température:

$$h_{cv}(t) = \sqrt{[0.84 |T_{a_{ext}}(t) - T_{cr}(t)|^{1/3}]^2 + [2.38 (v_{vent}(t))^{0.89}]^2} \quad (3.5)$$

Où  $v_{vent}$  représente la vitesse moyenne du vent à la hauteur du toit.

Les antipotentiels environnementaux de convection externe et du ciel sont obtenus en intégrant des flux  $\Phi_{cv}^{ref}$  et  $\Phi_c^{ref}$ :

$$\overline{Q}_{cv}^{ENV} = \int_0^{24} |\Phi_{cv+}^{ref}(t)| dt \quad (3.6)$$

$$\overline{Q}_{sky}^{ENV} = \int_0^{24} |\Phi_{sky+}^{ref}(t)| dt \quad (3.7)$$

Quant aux potentiels de rafraîchissement environnementaux de convection externe et du ciel, ils sont calculés en intégrant, pendant la nuit seulement, les flux échangés à chaque instant entre ces ressources et les parois du VHPB supposées à la température de consigne de rafraîchissement :

$$Q_{cv}^{*ENV} = \int_0^{24} |\Phi_{cv-}^{ref}(t)| I_{nuit} dt \quad (3.8)$$

$$Q_{sky}^{*ENV} = \int_0^{24} |\Phi_{sky-}^{ref}(t)| I_{nuit} dt \quad (3.9)$$

Les indices + et - indiquent respectivement que seule la partie positive ou négative des flux est conservée.

Ici,  $I_{nuit}$  est une fonction nulle pendant la journée, c'est-à-dire en présence du flux solaire, et égale à 1 pendant la nuit, c'est à dire en absence de rayonnement solaire. Avec cette restriction, l'auteur suppose que les potentiels de rafraîchissement environnementaux de convection et du ciel ne pourraient être exploités que lorsque l'enveloppe du bâtiment n'est pas chauffée par le rayonnement solaire. Pendant la journée, les flux échangés par radiation grande longueur d'onde avec la voûte céleste et par convection avec l'air extérieur ont pour principale fonction de compenser les radiations solaires, plutôt que de rafraîchir l'intérieur du bâtiment.

Enfin, le potentiel de rafraîchissement environnemental de la ventilation naturelle correspond à l'intégrale de la valeur négative du flux échangé entre l'air extérieur et l'air intérieur du VHPB.

$$Q_{vent}^{*ENV} = \int_0^{24} |\Phi_{vent-}^{ref}(t)| \cdot dt \quad (3.10)$$

avec,

$$\Phi_{vent}^{ref}(t) = cp_a \cdot \rho_a \cdot \dot{V}^{ref}(t) \cdot (T_{a_{ext}}(t) - T_{cr}(t)) \quad (3.11)$$

Le débit de ventilation dans le VHPB,  $\dot{V}^{ref}$ , est calculé avec l'Eq. 3.12:

$$\dot{V}^{ref}(t) = \min \left[ \frac{C_d \cdot S_{wind}}{2\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\Delta C_p} \cdot v_{vent}(t); \frac{10 \cdot V_{bat}}{3600} \right] \quad (3.12)$$

Ici,  $C_d$  est le coefficient de décharge (0.6),  $\Delta C_p$  est la différence de coefficient de pression du vent de part et d'autre du VHPB.

Ce taux de renouvellement est limité en valeur à  $10 \text{ vol.h}^{-1}$ . Cette valeur maximale est définie comme le débit d'air atteignable en utilisant des stratégies de ventilation naturelle couramment testées dans la littérature scientifique (Axley, 2019; Chesné et al., 2012; Hiyama and Glicksman, 2015). C'est également la limite à partir de laquelle les vitesses de l'air à l'intérieur du bâtiment peuvent gêner les usagers et ne sont plus acceptables.

La vitesse moyenne locale du vent  $v_{vent}$  est estimée à partir de la loi logarithmique de Von Karman rappelée par Allard et al. (Allard et al., 1998) et adaptée dans l'Eurocode 1:

$$v_{vent}(t) = v_b(t) \cdot c_r(z) \quad (3.13)$$

Cette vitesse est évaluée à hauteur du toit du VHPB. La vitesse  $v_b$  indique une mesure de référence, à savoir en station météorologique à une hauteur de 10 m au-dessus du niveau du sol.  $c_r$  est le coefficient de rugosité du terrain, qui prend en compte la hauteur au-dessus du sol et la rugosité du terrain:

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z_{min}) & z \leq z_{min} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{0.05}\right)^{0.07} \quad (3.15)$$

Avec  $z_0$ , la hauteur (Tableau 3.2) de rugosité,  $k_r$  un coefficient adimensionnel qui dépend de  $z_0$ ,  $z_{min}$  est la hauteur minimale en fonction de la catégorie de terrain, et  $z_{max}$  est égal à 200 m.

Type de Surface	Hauteur de rugosité	Classe de rugosité
Mer, Neige, Sable	0.0005	I
Mer avec vent fort	0.005	II
Herbe courte	0.01	III
Champs cultivés ouverts	0.05	IV
Plantation haute en champs ouvert	0.1	V
Campagne et habitat isolé	0.25	VI
Zone urbaine périphérique	0.5	VII
Centre-ville, forêt	1	VIII
Centre de mégapole, forêt tropicale	4	IX

**Tableau 3. 2.** Classe de rugosité (Allard et al., 1998)



### 3.4.3. Indicateurs de Performances du Bâtiment

#### 3.4.3.1. *Problématique*

C'est lors de la phase de conception d'un bâtiment qu'on définit sa morphologie (notamment sa compacité, son orientation, et l'emplacement de ses fenêtres), la composition de ses parois (avec son niveau d'isolation et d'inertie), et qu'on sélectionne les systèmes thermiques qui seront mis en œuvre.

Pour évaluer la solution obtenue au regard de ses performances bioclimatiques, il faut analyser l'ensemble des flux transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment. Les logiciels de simulation thermique dynamique permettent d'obtenir des profils temporels de ces flux.

La figure 3.4 montre le graphique que l'on obtiendrait en traçant sur un même graphique l'ensemble des résultats bruts de simulation nécessaires pour analyser le comportement du bâtiment. Ces résultats ne permettent pas de distinguer les contributions des différentes ressources environnementales. Il faudrait appliquer une analyse bioclimatique pour distinguer les flux selon leur mode de transport de chaleur (rayonnement courtes et grandes longueurs d'onde, convection, ventilation). Ces flux sont calculés au travers des surfaces interne et externe de l'enveloppe, pour évaluer la portion de flux qui atteint réellement l'ambiance intérieure.

Cette courbe est trop chargée. Elle contient beaucoup trop d'informations inutiles qui parasitent l'analyse des résultats. C'est encore pire si plusieurs solutions sont à comparer.

L'objectif des indicateurs de performance (Building Performance Indicators, ou BPIs) est d'extraire de ces données uniquement les informations utiles à l'analyse des performances bioclimatiques des bâtiments.

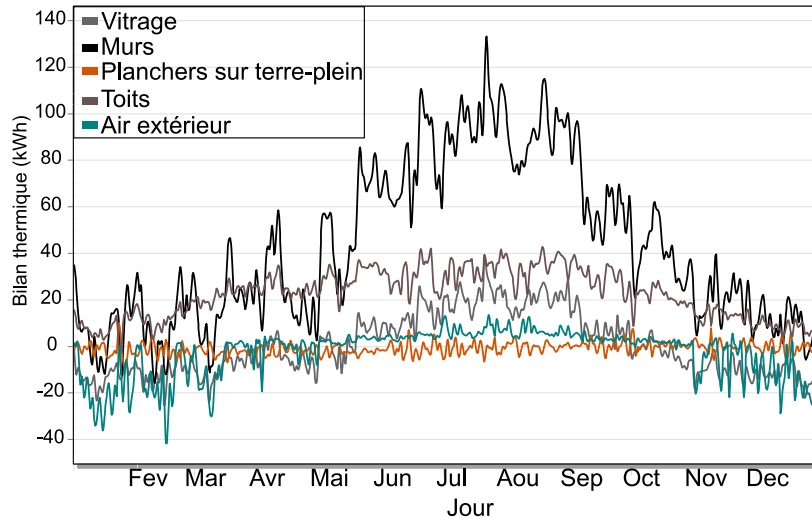


Fig.3. 4. Exemple de bilan thermique dans DesignBuilder (EnergyPlus)

3.4.3.2. Calcul des indicateurs

Les indicateurs de performance sont calculés à partir de résultats de simulations énergétiques du bâtiment dans son environnement. Les outils de simulation (EnergyPlus, Trnsys, DO2, etc.) donnent accès à tous les flux de chaleur nécessaires pour calculer les BPIs. Un aperçu complet des BPIs est illustré à la Figure 3.5. Ce sont des potentiels énergétiques. Ils sont notés  $Q^{EXP}$ , où l'exposant « EXP » signifie que les potentiels sont « exploités ».

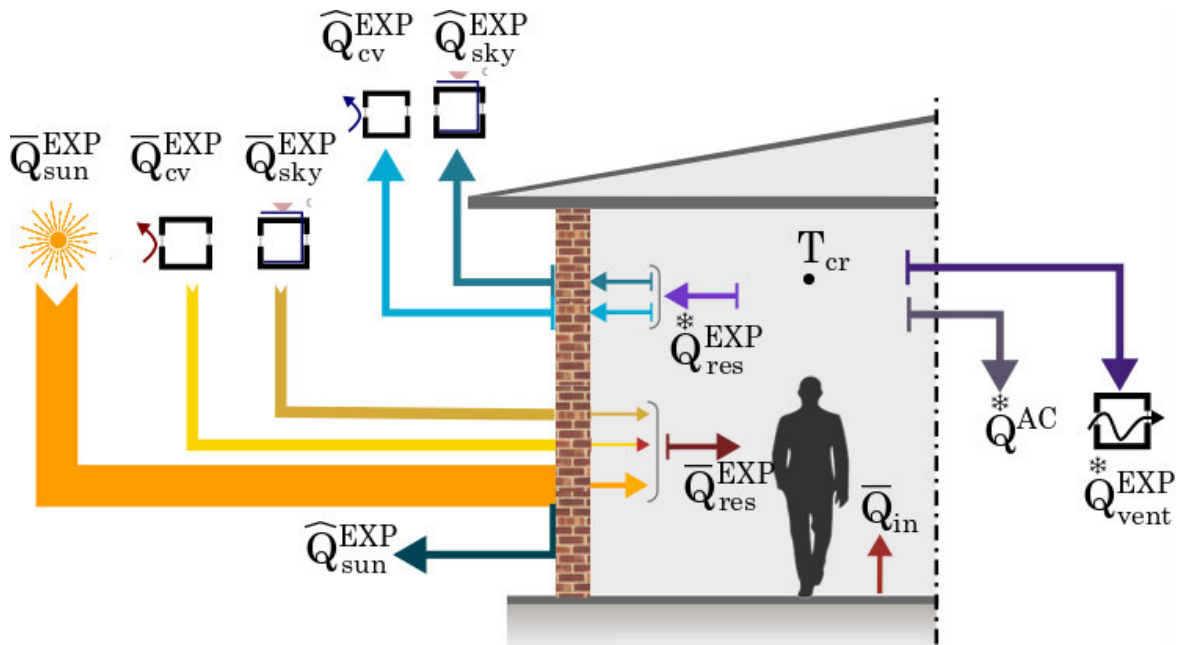


Fig.3. 5. Indicateurs de performances énergétiques

Les amplitudes des flux de chaleur sont beaucoup plus grandes sur la surface extérieure que sur la surface intérieure de l'enveloppe du bâtiment. Par conséquent, la méthode de calcul fait la distinction entre les potentiels exploités sur ces deux surfaces.

Sur la façade extérieure, les quantités  $\bar{Q}_{sun}^{EXP}$ ,  $\bar{Q}_{cv}^{EXP}$  et  $\bar{Q}_{sky}^{EXP}$  présentent respectivement les antipotentiel exploités du soleil, de la convection externe et du rayonnement infrarouge. Le potentiel  $\bar{Q}_{sky}^{EXP}$  tient compte des échanges de chaleur avec la voûte céleste, le sol, et les autres surfaces de l'environnement. Une grande partie de cette énergie incidente est renvoyée vers le milieu extérieur via la réflexion du flux solaire, et des échanges par rayonnement grandes longueurs d'onde et par convection. Trois autres quantités sont donc calculées sur la face externe de l'enveloppe :  $\hat{Q}_{sun}^{EXP}$ ,  $\hat{Q}_{cv}^{EXP}$  et  $\hat{Q}_{sky}^{EXP}$  qui représentent respectivement les potentiels de compensation du soleil, de la convection et du ciel. Ils sont appelés ainsi car leur principale fonction est de compenser les apports de chaleur du soleil. Ces potentiels rafraîchissent rarement l'environnement intérieur du bâtiment. L'effet de protection est symbolisé par le symbole chapeau sur la lettre  $\hat{Q}$ .

À partir de la simulation énergétique, on extrait le flux solaire global,  $\Phi_s$ , incident sur l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment, les flux de chaleur convectif  $\Phi_{cv}$  et radiatif  $\Phi_{lw}$  sur la surface extérieure de l'enveloppe du bâtiment. Les flux sont négatifs lorsque la chaleur est évacuée à l'extérieur. Les antipotentiel et potentiels sur la face externe sont calculés comme suit :

$$\bar{Q}_{sun}^{ENV} = \int_0^{24} \Phi_s(t) dt \quad (3.16)$$

$$\bar{Q}_{sky}^{EXP} = \int_0^{24} \Phi_{lw+}(t) dt \quad (3.17)$$

$$\bar{Q}_{cv}^{EXP} = \int_0^{24} \Phi_{cv+}(t) dt \quad (3.18)$$

$$\hat{Q}_s^{EXP} = \rho_{clo} \bar{Q}_{sun}^{EXP} \quad (3.19)$$

$$\hat{Q}_{sky}^{EXP} = \int_0^{24} |\Phi_{lw-}(t)| dt \quad (3.20)$$

$$\hat{Q}_{cv}^{EXP} = \int_0^{24} |\Phi_{cv-}(t)| dt \quad (3.21)$$

Les flux de chaleur externes atteignent la face intérieure de l'enveloppe après avoir traversé cette dernière par conduction. Il n'est plus possible de distinguer les contributions des ressources bioclimatiques « convection externe » et « ciel » dans la part du flux sortant au niveau de la face interne de l'enveloppe. On définit un potentiel de rafraîchissement exploité résiduel,  $Q_{res}^{EXP*}$ , résultant du rafraîchissement convectif et radiatif du côté externe de l'enveloppe.

Similairement, il n'est pas possible de distinguer les contributions des contraintes bioclimatiques « soleil », « convection externe », et « ciel » dans la part du flux entrant sur la face interne de l'enveloppe. On définit l'antipotentiel exploité résiduel,  $\overline{Q}_{res}^{EXP}$ , qui résulte des antipotentiels solaire, convectif et radiatif sur la face extérieure du bâtiment. Cet antipotentiel prend aussi en compte le rayonnement CLO transmis au travers des fenêtres.

Le potentiel  $Q_{vent}^{EXP*}$  est le potentiel de rafraîchissement exploité de la ventilation naturelle.  $Q^{AC*}$  est l'indicateur du besoin de rafraîchissement du bâtiment. C'est l'énergie qu'il reste à fournir par les systèmes énergétiques du bâtiment, pour maintenir la température interne à  $T_{cr}$ , une fois les ressources environnementales exploitées.

Les simulations fournissent les apports de chaleur résiduels par conduction au travers de la surface intérieure de l'enveloppe  $\Phi_{netin}$ , ainsi que les flux de chaleur par infiltration  $\Phi_{inf}$ , par ventilation naturelle  $\Phi_{vent}$  et le flux de chaleur prélevé à l'ambiance par le système de climatisation  $\Phi_{ac}$ . Les potentiels de rafraîchissement exploités à l'intérieur du bâtiment sont calculés comme suit:

$$Q_{res}^{EXP*} = \int_0^{24} |\Phi_{netint-}(t)| dt \quad (3.22)$$

$$Q_{vent}^{EXP*} = \int_0^{24} |\Phi_{inf-}(t) + \Phi_{vent-}(t)| dt \quad (3.23)$$

$$Q^{AC*} = \int_0^{24} |\Phi_{ac}(t)| dt \quad (3.24)$$

Enfin, l'antipotentiel exploité résiduel  $\overline{Q}_{res}^{EXP}$  est la quantité de chaleur qui traverse l'enveloppe et atteint l'environnement intérieur. Il est calculé à partir des valeurs positives de  $\Phi_{netin}$ , du flux solaire transmis ainsi que les apports par infiltration d'air :

$$\bar{Q}_{res}^{EXP} = \int_0^{24} (\Phi_{net_{int+}}(t) + \Phi_{tr}(t) + \Phi_{inf+}(t)) dt \quad (3.25)$$

#### 3.4.4. Fermeture du bilan énergétique

Enfin pour valider le calcul, deux bilans sont vérifiés pour chaque simulation.

Le bilan énergétique intérieur est calculé en prenant comme volume de contrôle le volume enfermé par les faces intérieures de l'enveloppe des bâtiments (Figure 3.6). Ce volume renferme le volume d'air intérieur, qui est maintenu à une température constante, ainsi que les cloisons internes et les planchers intermédiaires. Pour fermer ce bilan, on suppose que la variation de l'énergie contenue dans ces parois entre deux instants espacés de 24 heures (période d'intégration des potentiel) est négligeable.

Ainsi, les apports de chaleur provenant de l'enveloppe  $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ , du sol, et des charges internes  $\bar{Q}_{in}$  sont compensés par le rafraîchissement apporté par les ressources environnementales à travers l'enveloppe  $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ , à travers la ventilation naturelle  $\bar{Q}_{vent}^{EXP}$  et par l'énergie fournie par le système de climatisation  $\bar{Q}^{AC}$ . Il en résulte l'équation (3.26) de bilan intérieur :

$$\bar{Q}_{res}^{EXP} + \bar{Q}_{in} + \int_0^{24} \Phi_g(t) dt = \bar{Q}_{res}^{EXP} + \bar{Q}_{vent}^{EXP} + \bar{Q}^{AC} \quad (3.26)$$

Avec,  $\Phi_g$  flux de chaleur par le sol.

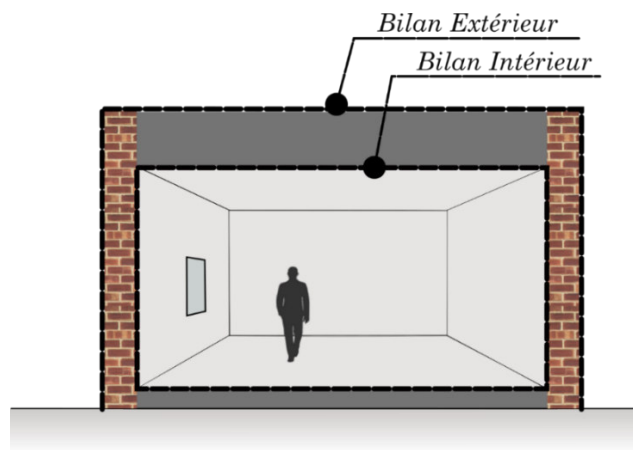


Fig.3. 6. Les limites du volume sur lesquels sont calculés les bilans.

L'équation de bilan extérieur est calculée en prenant pour volume de contrôle la surface externe de l'enveloppe du bâtiment (Figure 3.6). Ce volume comprend, en plus des éléments contenus dans le volume de contrôle du bilan interne, les parois de l'enveloppe. Pour fermer le bilan, on suppose alors la variation de la quantité d'énergie contenue dans les parois de l'enveloppe entre deux instants espacés de 24 heures est négligeable. On obtient l'équation (3.27) :

$$\sum_i \bar{Q}_i^{EXP} - \sum_i \hat{Q}_i^{EXP} = \bar{Q}_{res}^{EXP} - Q_{res}^{*EXP} - \int_0^{24} \Phi_{inf+}(t) dt \quad (3.27)$$

### 3.4.5. Représentation graphique

Nous avons exploré deux niveaux d'analyse basés sur les indicateurs bioclimatiques.

Le premier niveau est une analyse globale annuelle qui permet de comparer facilement plusieurs solutions de constructions. Les indicateurs journaliers sont additionnés sur une année entière. Ils sont rapportés à une unité de surface habitable du bâtiment. Tous les indicateurs sont condensés dans un unique graphique dont un exemple est montré sur la figure 3.7 à gauche. Cette présentation des résultats permet de visualiser clairement l'équilibre du bilan thermique, c'est-à-dire l'égalité des flux entrants et sortants dans le volume intérieur du bâtiment. Il permet d'apprécier la répartition entre les différents contributeurs de ces flux entrants et sortants.

Le second niveau d'analyse est une analyse temporelle. Elle a pour objectif d'évaluer la répartition de la disponibilité des ressources et la capacité du bâtiment à les exploiter tout au long de l'année. Pour réaliser cette analyse, une moyenne mensuelle des potentiels est calculée, puis les moyennes sont rapportées à un mètre carré de surface habitable. L'analyse est réalisée séparément selon les contraintes et les ressources bioclimatique. Un exemple de représentation graphique des valeurs obtenues est montré sur la Figure 3.7 à droite.

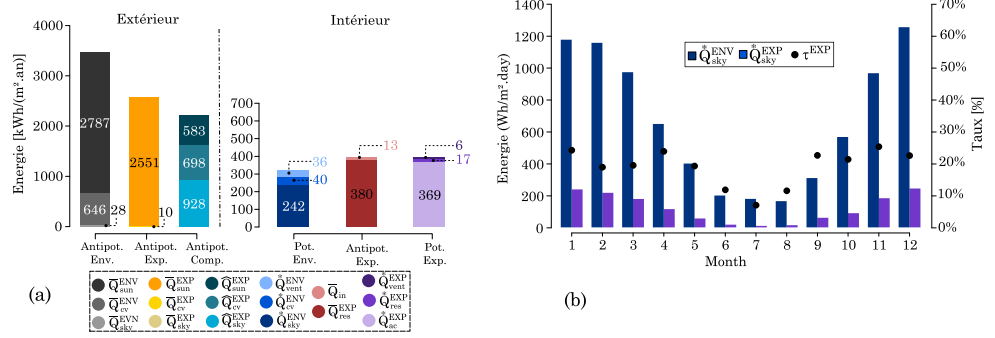


Fig.3. 7. Exemple de représentation graphique avec les nouveaux indicateurs

### 3.4.6. Indicateurs relatifs

Nous définissons, à partir des potentiels et antipotentiel absolus, quatre indicateurs relatifs complémentaires.

Le taux d'exploitation est le rapport du potentiel de rafraîchissement exploité d'une ressource bioclimatique sur son potentiel environnementale. Il représente la capacité du bâtiment à exploiter la ressource concernée. Il est nommé  $\tau^{EXP}$  avec le nom de la ressource en indice (« vent » pour ventilation naturelle, ou « res » pour le flux résiduel à travers l'enveloppe). Il est calculé comme suit:

$$\tau^{EXP} = \frac{Q^{EXP*}}{Q^{ENV*}} \quad (3.28)$$

Le taux de couverture est le rapport entre le potentiel exploité d'une ressource donnée  $Q^{EXP*}$  et la quantité totale de chaleur transitant au travers de l'enveloppe  $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ . Ce rapport quantifie la capacité de l'enveloppe à simultanément minimiser les apports de chaleur et maximiser l'exploitation des ressources. Il est nommé  $\tau^{COV}$  avec le nom de la ressource bioclimatique en indice. Il est calculé comme suit:

$$\tau^{COV} = \frac{Q^{EXP*}}{\bar{Q}_{res}^{EXP}} \quad (3.29)$$

Le taux de protection  $\tau^{SHE}$  est le rapport entre la somme des potentiels de compensation et la somme des antipotentiel exploités à l'extérieur de l'enveloppe. Il quantifie la capacité de l'enveloppe à agir comme une barrière face aux antipotentiel exploités externes. Ce taux est défini comme suit:

$$\tau^{SHE} = \frac{\widehat{Q}_{sun}^{RFX} + \widehat{Q}_{sky}^{EXP} + \widehat{Q}_{cv}^{EXP}}{(\overline{Q}_{sun}^{EXP} + \overline{Q}_{sky}^{EXP} + \overline{Q}_{cv}^{EXP})} \quad (3.30)$$

Enfin le dernier indicateur relatif est le taux d'ombrage,  $\tau^{SHA}$  qui relie les antipotentiel exploités externes aux antipotentiel environnementaux. Il est lié à la morphologie du bâtiment et quantifie la part des antipotentiel environnementaux qui n'atteignent pas l'enveloppe du bâtiment.

$$\tau^{SHA} = \frac{\overline{Q}_{sun}^{EXP} + \overline{Q}_{sky}^{EXP} + \overline{Q}_{cv}^{EXP}}{(\overline{Q}_s^{ENV} + \overline{Q}_{sky}^{ENV} + \overline{Q}_{cv}^{ENV})} \quad (3.31)$$

Un schéma récapitulatif des indicateurs développés est donné à la figure 3.8.

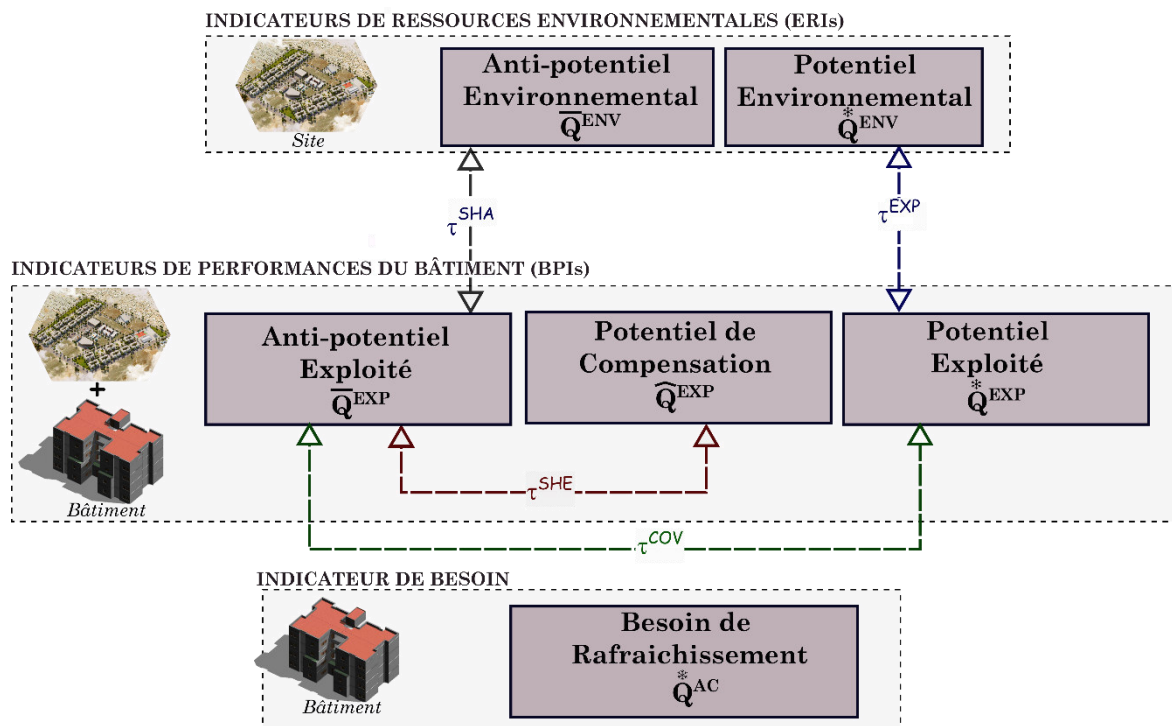


Fig.3. 8. Diagramme récapitulatif des indicateurs

### 3.5. Confrontation des indicateurs à un cas d'étude

#### 3.5.1. Objectifs

Le but principal de cette étude de cas est de montrer la nature des informations qui peuvent être tirées de l'analyse des indicateurs



précédemment définis et de démontrer la cohérence physique de leur évolution en fonction de la composition de parois.

### 3.5.2. Description du cas d'étude

La figure 3.9 montre une visualisation 3D du cas d'étude. C'est un bâtiment à deux étages d'une surface de plancher de 200 m<sup>2</sup>, d'une hauteur de 7 m et un volume total rafraîchi de 700 m<sup>3</sup>. Chaque étage est constitué d'une seule zone. Ce cas d'étude est implémenté et simulé avec l'outil EnergyPlus (Interface DesignBuilder) qui est un code validé pour la simulation énergétique des bâtiments.

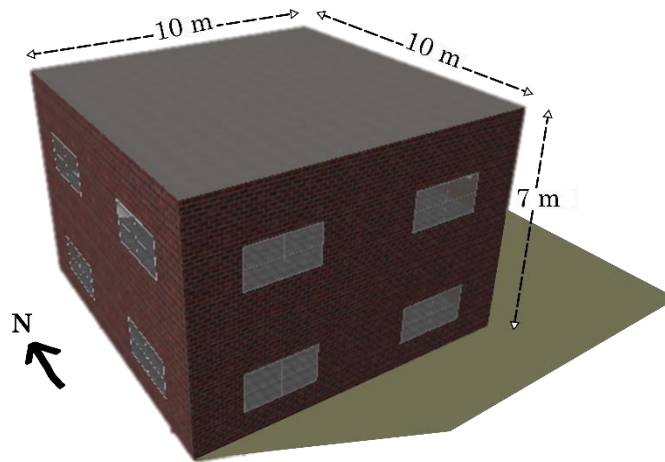


Fig.3. 9. Rendu géométrique du modèle Design Builder

L'un des enjeux de cette application est de pouvoir apprécier la pertinence de ces indicateurs sur l'analyse des caractéristiques bioclimatiques d'un bâtiment. Pour cela, quatre enveloppes ont été modélisées. L'inertie thermique de ces enveloppes varie de faible (noté « LW » pour LightWeight) à forte (noté « HW » pour HeavyWeight), le niveau d'isolation varie de forte à faible (notés « I » et « noI »). Ils sont simulés dans le climat chaud et humide de Djibouti. Le tableau 3.3 récapitule les caractéristiques des quatre types d'enveloppe. Les tableaux 3.4 à 3.6 explicitent les compositions des parois associées.

	Inertie thermique forte	Inertie thermique faible
Avec Isolation	HWI	LWI
Sans Isolation	HWnoI	LWnoI

Tableau 3. 3. Synthèse des quatre cas testés

La composition des parois pour les quatre versions du bâtiment sont répertoriées dans les tableaux suivants :

Mur extérieur	<p><math>U = 0.25 \text{ W/m}^2.\text{K}</math> (capacité calorifique interne = 145 <math>\text{kJ/m}^2.\text{K}</math>)</p> <p>(Extérieur)</p> <p>50 mm briques ; 120 mm polystyrène extrudé ; 150 mm blocs de bétons ; 13 mm enduit intérieur</p> <p>(Intérieur)</p>
Toiture	<p><math>U = 0.15 \text{ W/m}^2.\text{K}</math> (capacité calorifique interne = 240 <math>\text{kJ/m}^2.\text{K}</math>)</p> <p>(Extérieur)</p> <p>20 mm asphalt ; 200 mm polystyrène extrudé ; 200 mm béton</p> <p>(Intérieur)</p>
Plancher bas	<p><math>U = 0.15 \text{ W/m}^2.\text{K}</math> (capacité calorifique interne = 125 <math>\text{kJ/m}^2.\text{K}</math>)</p> <p>(Extérieur)</p> <p>250 mm polystyrène extrudé ; 200 mm béton ; 50 mm chape ; 6 mm carrelage intérieur</p> <p>(Intérieur)</p>

**Tableau 3. 4.** Caractéristiques des parois opaques du HWI

Mur extérieur	<p><math>U = 1.86 \text{ W/m}^2.\text{K}</math> (capacité calorifique interne = 145 <math>\text{kJ/m}^2.\text{K}</math>)</p> <p>(Extérieur)</p> <p>50 mm briques ; 150 mm blocs de bétons ; 13 mm enduit intérieur</p> <p>(Intérieur)</p>
---------------	---

Toiture	U =4 W/m <sup>2</sup> .K (capacité calorifique interne = 240 kJ/m <sup>2</sup> .K)
	(Extérieur) 20 mm asphalt ; 200 mm béton (Intérieur)
Plancher bas	U =1.8 W/m <sup>2</sup> .K (capacité calorifique interne = 125 kJ/m <sup>2</sup> .K)
	(Extérieur) 200 mm béton ; 50 mm chape ; 6 mm carrelage intérieur (Intérieur)

**Tableau 3. 5.** Caractéristiques des parois opaques du HWnoI

Mur extérieur	U =0.25 W/m <sup>2</sup> .K (capacité calorifique interne = 12 kJ/m <sup>2</sup> .K)
	(Extérieur) 13 mm enduit extérieur; 130 mm polystyrène extrudé ; 6 mm tôle acier (Intérieur)
Toiture	U =0.15 W/m <sup>2</sup> .K (capacité calorifique interne = 12 kJ/m <sup>2</sup> .K)
	(Extérieur) 6 mm tôle acier; 220 mm polystyrène extrudé ; 6 mm tôle acier (Intérieur)
Plancher bas	U = 2.45 W/m <sup>2</sup> .K (capacité calorifique interne = 7.4 kJ/m <sup>2</sup> .K)
	20 mm plancher bois

**Tableau 3. 6.** Caractéristiques des parois opaques du LWI

Mur extérieur	U = 5.8 W/m <sup>2</sup> .K (capacité calorifique interne = 11 kJ/m <sup>2</sup> .K)
	(Extérieur) 6 mm tôle acier
Toiture	(Intérieur) U = 7.1 W/m <sup>2</sup> .K (capacité calorifique interne = 11 kJ/m <sup>2</sup> .K)
	6 mm tôle en acier
Plancher bas	U = 2.45 W/m <sup>2</sup> .K (capacité calorifique interne = 7.4 kJ/m <sup>2</sup> .K)
	20 mm plancher bois

**Tableau 3. 7.** Caractéristiques des parois opaques du LWnoI

Les valeurs d'absorption solaire des murs et du toit sont respectivement fixées à 0,7 et 0,85 et leurs émissivités GLO est égale à 0.90.

Les propriétés du vitrage ainsi que le ratio de surfaces vitrées par rapport à la surface totale du mur des bâtiments archétypaux sont présentées dans le Tableau 3.8. Les vitrages des modèles non isolés sont des simples vitrages alors que pour les versions isolées, ce sont des vitrages doubles avec une couche à faible émissivité sur le feuillard extérieur.

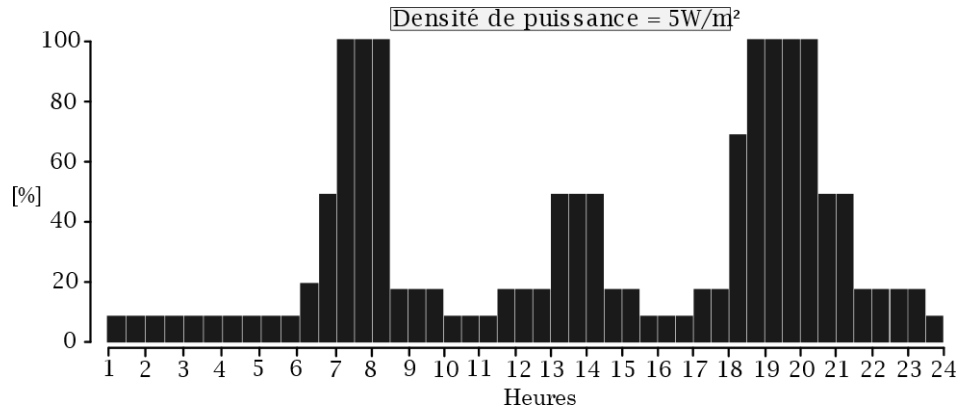
	Description	U [W/m <sup>2</sup> .K]	$\rho_{GLO}$	$\varepsilon_{GLO}$
LWI & HWI	- Double (6/13 Arg) - Basse émissivité	1.5	0.17	0.84
HWnoI & LWnoI	- Simple	5.8	0.07	0.84

Tableau 3. 8. Propriétés des parois vitrées.

Dans tous les cas, le renouvellement d'air est assuré par un débit d'infiltration égale à 0.5 vol.h<sup>-1</sup>. La ventilation naturelle est mise en route par ouverture des fenêtres dès que les conditions sont fa-

vorables, c'est-à-dire lorsque la température extérieure est inférieure à  $T_{cr}$ . Le système de climatisation est éteint lors de l'ouverture des fenêtres. Le confort thermique est assuré dans chacun des quatre cas d'étude par un générateur de puissance idéal qui gère le rafraîchissement (température de consigne de rafraîchissement  $T_{cr} = 26^{\circ}\text{C}$ ).

Un scénario quotidien de puissance totale dissipée à la fois par les occupants et les appareils, est intégré à la simulation et donné par le graphique illustré dans la figure 3.10.



**Fig.3. 10.** Scénario quotidien de la puissance totale dissipée

### 3.5.3. Analyse des indicateurs bioclimatiques – Indicateurs de ressources environnementales

#### 3.5.3.1. Potentiels de rafraîchissement

La figure 3.11 affiche la moyenne mensuelle des potentiels de rafraîchissement environnementaux disponibles sur le site pour les ressources ciel ( $\dot{Q}_{sky}^{ENV}$ ) la convection externe ( $\dot{Q}_{cv}^{ENV}$ ) et la ventilation naturelle ( $\dot{Q}_{vent}^{ENV}$ ).

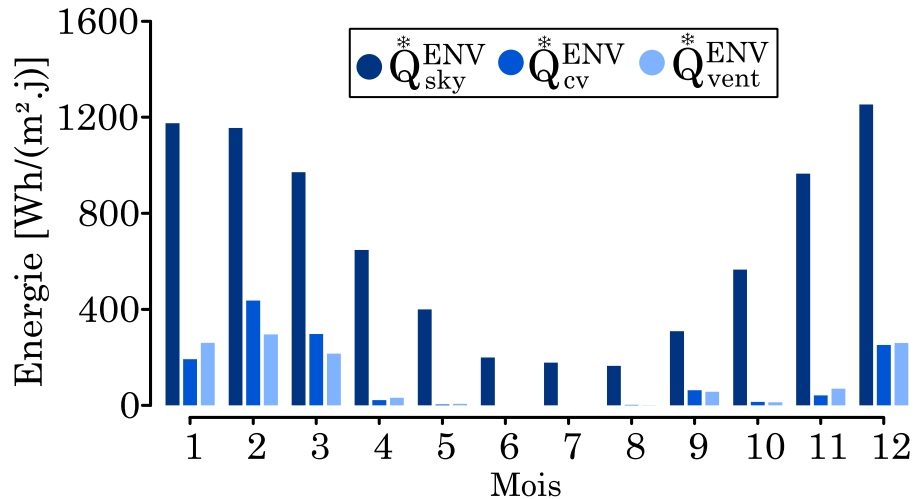


Fig.3. 11. Distribution mensuelle des potentiels de rafraîchissement environnementaux

Généralement, toutes les ressources sont disponibles pendant la saison fraîche. Néanmoins, le ciel se distingue des autres ressources. C'est de loin la ressource qui pourrait fournir le plus d'énergie de rafraîchissement avec un maximum allant jusqu'à 1200 Wh/m<sup>2</sup> en moyenne par jour en décembre. Cette ressource dure également plus longtemps que les autres. Elle atteint un minimum de 160 Wh/m<sup>2</sup> pour les mois d'août. C'est un résultat qui n'est pas nécessairement surprenant mais qui n'avait jamais été exprimé si clairement jusqu'alors. Pendant la saison chaude, les ressources air (convection externe et ventilation naturelle) deviennent des contraintes bioclimatiques. La convection externe et les potentiels de ventilation naturelle ont des amplitudes similaires pendant la saison fraîche. Leur augmentation en février n'implique pas forcément plus de gradient de température mais plutôt une augmentation de vitesse de vent durant cette période.

### 3.5.3.2. Antipotentils environnementaux

Les antipotentils du site sont illustrés sur la figure 3.12. On constate sans ambiguïté que l'antipotentiel solaire représente la principale contrainte que vont subir les bâtiments qui seront conçus dans ce type de climat. Il est constamment élevé tout au long de l'année (minimum de 7 kWh / m<sup>2</sup> par jour). De plus, la somme des potentiels de rafraîchissement environnementaux précédemment discutés est nettement inférieure à  $\overline{Q}_{sun}^{ENV}$ . Le site se caractérise par plus d'apport de chaleur que de source de fraîcheur disponible toute l'année.

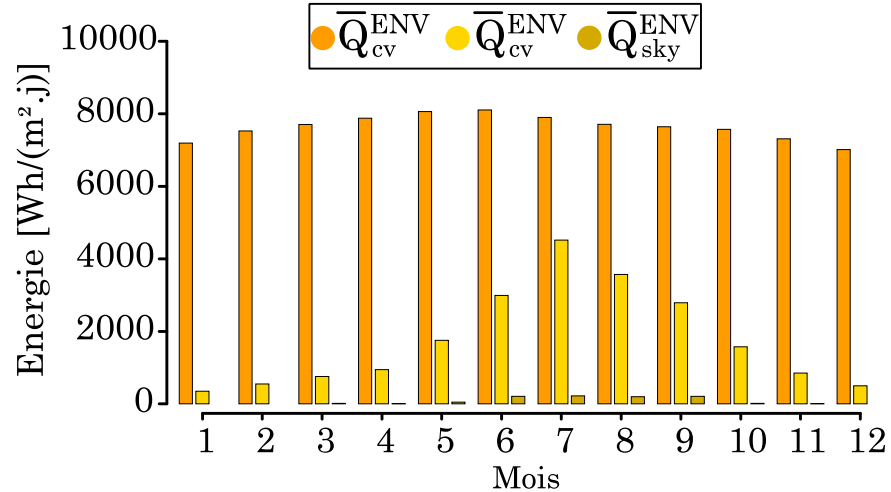


Fig.3. 12. Distribution mensuelle des antipotentiels environnementaux.

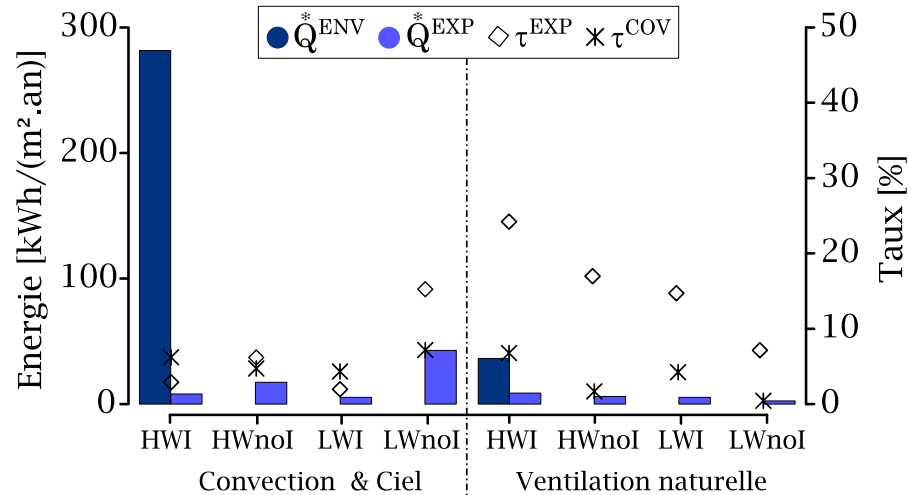
La distribution permet également de constater la présence durant toute l'année de l'antipotentiel de convection externe (il passe de 350 Wh/m<sup>2</sup> par jour en janvier à un maximum de 4500 Wh/m<sup>2</sup> par jour en juillet). On peut remarquer que pendant la saison fraîche cet antipotentiel est plus important que le potentiel de rafraîchissement associé à la même ressource (cf. figure 3.11). Quant à la voûte céleste, elle se comporte entièrement comme une ressource durant la saison fraîche. Le peu d'antipotentiels (environ 200 Wh/m<sup>2</sup> par jour) durant le mois le plus chaud ont le même ordre de grandeur que le potentiel de rafraîchissement associé à la ressource.

### 3.5.4. Analyse des indicateurs bioclimatiques – Indicateurs de performance des bâtiments

#### 3.5.4.1. Analyse globale des résultats

##### 3.5.4.1.1. Exploitation des ressources

L'analyse des indicateurs intégrée sur toute l'année peut tout d'abord nous permettre de comparer la performance bioclimatique des quatre cas d'étude. La figure 3.13 montre les potentiels de rafraîchissement environnementaux  $Q^{*ENV}$  et les potentiels exploités  $Q^{*EXP}$  par les différentes versions du bâtiment d'étude. Les indicateurs relatifs spécifiques à chaque ressource ( $\tau^{EXP}$ ,  $\tau^{COV}$ ) sont aussi affichés pour les quatre configurations. Notons qu'ici les potentiels environnementaux du ciel et de la convection externe ( $Q_{sky}^{*ENV}$  et  $Q_{cv}^{*ENV}$ ) ont été additionnés pour être comparés au potentiel de rafraîchissement exploité résiduel  $Q_{rés}^{*EXP}$ .



**Fig.3. 13.** Valeurs intégrées sur l'année des indicateurs pour les ressources convection externe, ciel et ventilation naturelle : comparaison des différentes configurations d'enveloppe.

Dans tous les cas, la quantité d'énergie de rafraîchissement disponible sur le site  $Q^{*ENV}$  dépasse largement la quantité de fraîcheur exploitée  $Q^{*EXP}$ , ce qui explique en partie les faibles valeurs du taux d'exploitation et du taux de couverture.

Les quatre cas d'étude affichent des comportements différents.

Pour les ressources bioclimatiques de convection externe et du ciel, le potentiel de rafraîchissement exploité  $Q_{res}^{*EXP}$  et le taux d'exploitation  $\tau_{res}^{EXP}$  sont plus élevés pour les bâtiments non isolés, avec un maximum de 15% d'exploitation pour la configuration à faible inertie et non isolé (LWnoI). Les bâtiments non isolés transfèrent plus facilement le froid prélevé à l'extérieur à travers l'enveloppe. Cependant, les enveloppes non isolées transfèrent également plus de chaleur vers l'environnement intérieur. L'antipotentiel exploité  $\bar{Q}_{res}^{*EXP}$  est plus élevé, c'est pourquoi le taux de couverture  $\tau_{res}^{COV}$  n'est pas systématiquement le plus élevé pour les bâtiments non isolés. Pour les bâtiments à forte isolation, le taux d'exploitation  $\tau_{res}^{EXP}$  ne dépasse jamais 4%; les enveloppes de bâtiment isolées ne peuvent pas transférer plus de 4% de l'énergie de rafraîchissement disponible sur leurs surfaces externes.

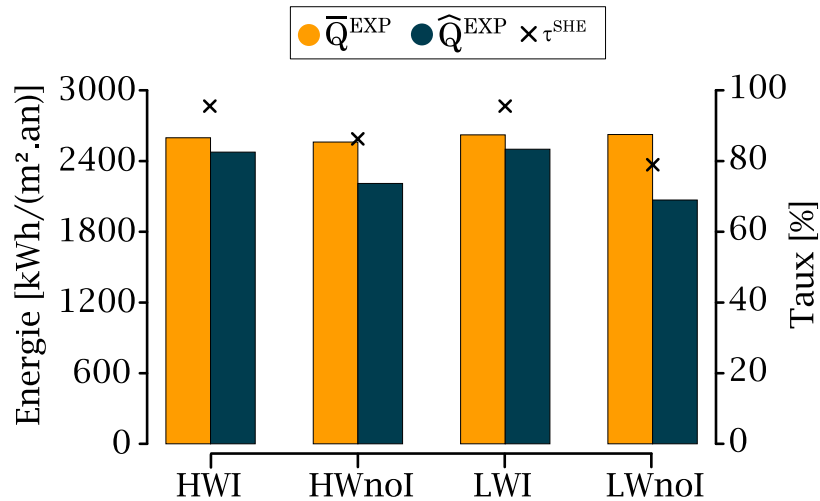
L'inertie thermique amortit les oscillations du flux de chaleur résiduel à la surface intérieure de l'enveloppe ( $\Phi_{net_{in}}$ ). Le flux de chaleur atteint des valeurs négatives moins extrêmes. C'est pourquoi les potentiels résiduels exploités  $Q_{res}^{*EXP}$  sont beaucoup plus faibles pour les bâtiments à plus forte inertie.



Pour la ressource bioclimatique de ventilation naturelle, le bâtiment à forte inertie et à haute isolation possède le taux d'exploitation  $\tau_{vent}^{EXP}$  le plus élevé (25% d'exploitation). Le potentiel exploité de la ventilation  $Q_{vent}^{EXP}$  est proportionnel à la différence de température intérieure-extérieure ( $T_{a_{ext}} - T_{a_{int}}$ ), avec  $T_{a_{int}} > T_{a_{ext}}$ . Ainsi, ce potentiel exploité est plus faible si la température intérieure  $T_{a_{int}}$  diminue rapidement lorsque l'air frais entre dans la pièce. Un bâtiment à forte inertie ralentit la diminution de  $T_{a_{int}}$  en absorbant une partie de la fraîcheur dans la structure du bâtiment. Pour les bâtiments sans isolation, la diminution de  $T_{a_{int}}$  est plus rapide. Cette diminution pourrait être due à des pertes de chaleur supplémentaires à travers l'enveloppe, qui résultent de l'exploitation du ciel et des ressources de convection externes. Cette explication suppose qu'il existe une synchronisation entre la disponibilité de la ressource de ventilation et les autres ressources.

### 3.5.4.1.2. Protection des contraintes

La figure 3.14 montre une comparaison entre l'apport de chaleur annuel sur l'enveloppe extérieure et les potentiels de compensation pour les 4 configurations de bâtiment. L'antipotentiel exploité extérieur  $\bar{Q}^{EXP}$  correspond ici à la somme de tous les antipotentiels ( $\bar{Q}_{sun}^{EXP}$ ,  $\bar{Q}_{cv}^{EXP}$  and  $\bar{Q}_{sky}^{EXP}$ ). De la même manière, la quantité  $\hat{Q}^{EXP}$  affichée représente la somme de tous les potentiels de compensation précédemment définie ( $\hat{Q}_{sun}^{EXP}$ ,  $\hat{Q}_{cv}^{EXP}$  and  $\hat{Q}_{sky}^{EXP}$ ). La figure 3.14 affiche aussi les taux de de protection  $\tau^{SHE}$ .



**Fig.3. 14.** Valeurs intégrées sur l'année des antipotentiels exploités et des potentiels de compensation : comparaison des différentes configurations d'enveloppe.

Le taux de protection  $\tau^{SHE}$  est supérieur à 80% pour tous les cas. Plus ce taux est proche de 100% moins le bâtiment est perméable à la chaleur externe. Ainsi, au moins 80% (LWnoI) de l'apport de chaleur sur la surface extérieur  $\bar{Q}^{EXP}$  n'atteint pas l'environnement intérieur. Les 20 % restant représentent les antipotentiel exploités résiduels ( $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ ), c'est-à-dire la partie de la chaleur que le bâtiment devra évacuer en exploitant les ressources de rafraîchissement (convection, ciel et ventilation) et en utilisant le système de climatisation.

Les quatre configurations d'enveloppe ont des valeurs similaires pour les antipotentiel exploités à l'extérieur  $\bar{Q}^{EXP}$ . C'est la valeur de leur potentiel de compensation  $\hat{Q}^{EXP}$  qui explique la différence de leur taux de protection. Ce potentiel est beaucoup plus élevé pour les bâtiments avec isolation thermique d'où plus de protection (95% des antipotentiel protégés pour HWI et LWI). En effet, lorsqu'un bâtiment est fortement isolé, sa température de surface externe  $T_{p_{ext}}$  est très élevée, ce qui se traduit par plus d'échanges convectif et radiatif vers l'extérieur. Pour ces configurations seulement 5 % des antipotentiel pénètrent l'enveloppe et atteint l'intérieur du bâtiment.

#### 3.5.4.1.3. Analyse multicomposante pour chaque cas d'étude

La figure 3.15 montre les graphiques récapitulatifs des échanges thermiques avec le milieu extérieur pour les quatre cas d'étude.

L'analyse des bilans extérieurs montre d'abord, que tous les antipotentiel environnementaux  $\bar{Q}^{ENV}$  n'atteignent pas l'enveloppe des bâtiments. Le taux d'ombrage ( $\tau^{SHA}$ ) représente cette différence d'énergie. Pour rappel, cet indicateur relatif quantifie les protections solaires apportées par la forme du bâtiment et la morphologie urbaine de son environnement. La différence entre les antipotentiel environnementaux et les antipotentiel exploités  $\bar{Q}^{EXP}$  est due à plusieurs phénomènes. Certaines surfaces de l'enveloppe projettent de l'ombre sur d'autres. Il en résulte une baisse de  $\bar{Q}_{sun}^{EXP}$ . Ensuite, la température de la surface extérieure des bâtiments est rarement inférieure à la température de l'air extérieur, en particulier lorsque l'enveloppe a une forte inertie thermique. Cela se traduit par un  $\bar{Q}_{cv}^{EXP}$  systématiquement très faible par rapport à  $\bar{Q}_{cv}^{ENV}$ , et un  $\bar{Q}_{sky}^{EXP}$  qui est presque toujours égal à zéro. Dans ce cas d'étude,  $\tau^{SHA}$  n'a pas été présenté en détail car il est quasiment identique pour toutes les versions (le taux d'ombrage annuelle est d'environ 94% pour tous les cas).

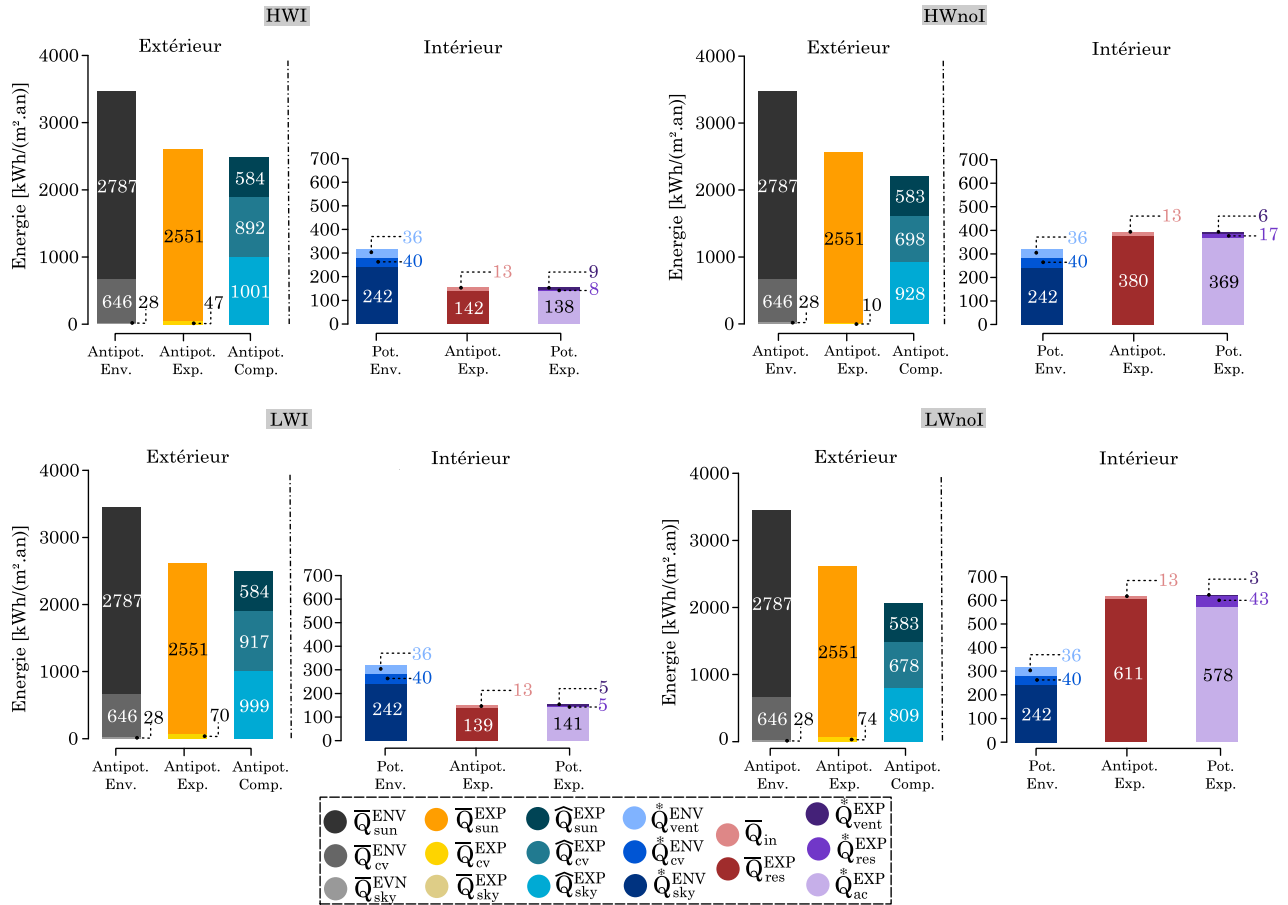


Fig.3. 15. Bilan thermique : Comparaison entre les ERIs et les BPIs annuels pour les quatre compositions d'enveloppes.

Qu'advient-il de ces antipotentiel exploités dont la plus grande partie provient directement du rayonnement solaire ? Une grande partie est directement réfléchi par l'enveloppe ( $\hat{Q}_{sun}^{EXP}$ ). Ensuite, le reste est évacué vers l'environnement extérieur par radiation ( $\hat{Q}_{sky}^{EXP}$ ) et par convection ( $\hat{Q}_{cv}^{EXP}$ ).  $\bar{Q}_{sky}^{EXP}$  est d'ailleurs le plus grand parmi ces trois potentiels de compensations.

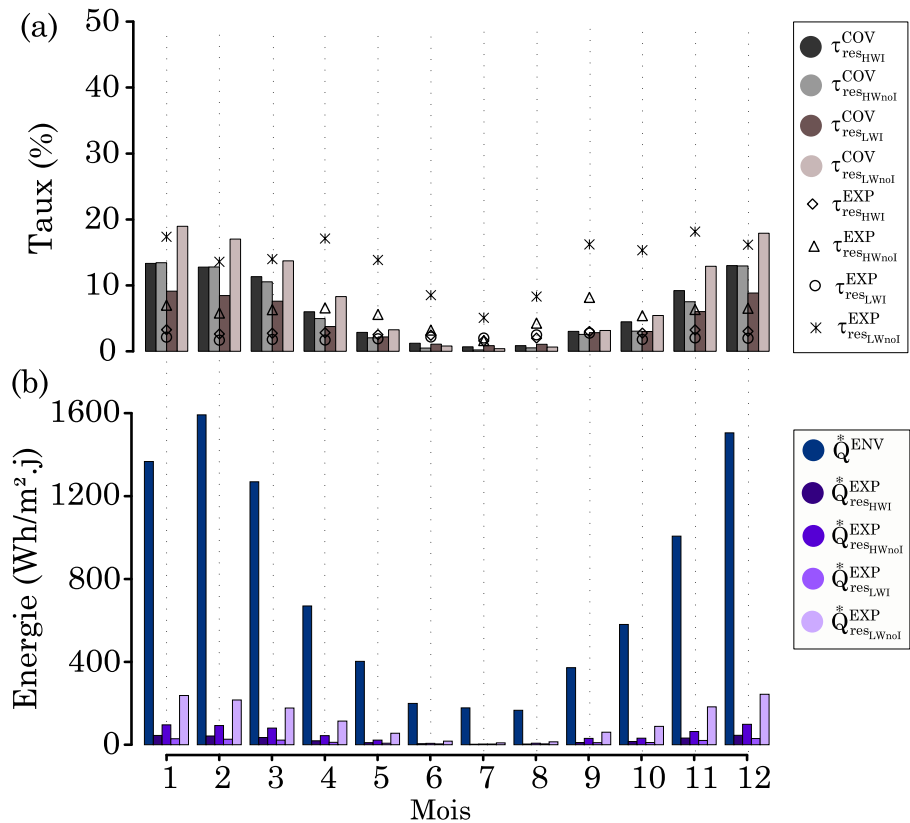
Pour les potentiels intérieurs, la somme des potentiels de rafraîchissement environnementaux ( $\bar{Q}_{vent}^{ENV} + \bar{Q}_{cv}^{ENV} + \bar{Q}_{sky}^{ENV}$ ) est supérieure à la somme des antipotentiel exploités à travers l'enveloppe et des apports internes ( $\bar{Q}_{res}^{EXP} + \bar{Q}_{in}$ ), pour les versions de bâtiments isolés (HWI et LWI). En principe, l'exploitation correcte des ressources bioclimatiques devraient être en mesure de couvrir une grande partie des besoins de rafraîchissement.

Cette analyse globale permet de constater aussi que les bâtiments à faible isolation exploitent davantage les ressources de convection

externe et de la voûte céleste ( $Q_{res}^{EXP}$  est plus élevée), mais ils exposent davantage l'environnement intérieur aux antipotentiels exploités ( $\bar{Q}_{res}^{EXP}$  est plus élevée), ce qui se traduit par un besoin de climatisation plus élevée ( $Q^{AC}$ ). Cette tendance est nettement plus prononcée pour le cas de bâtiment extrêmement léger (haute conductivité, faible masse volumique et capacité thermique) qui n'oppose aucune résistance à la transmission des antipotentiels exploités extérieurs. Il va sans dire qu'un tel type d'enveloppe de bâtiment ne convient ni au climat chaud ni même d'ailleurs aux autres climats.

3.5.4.2. Analyse dynamique

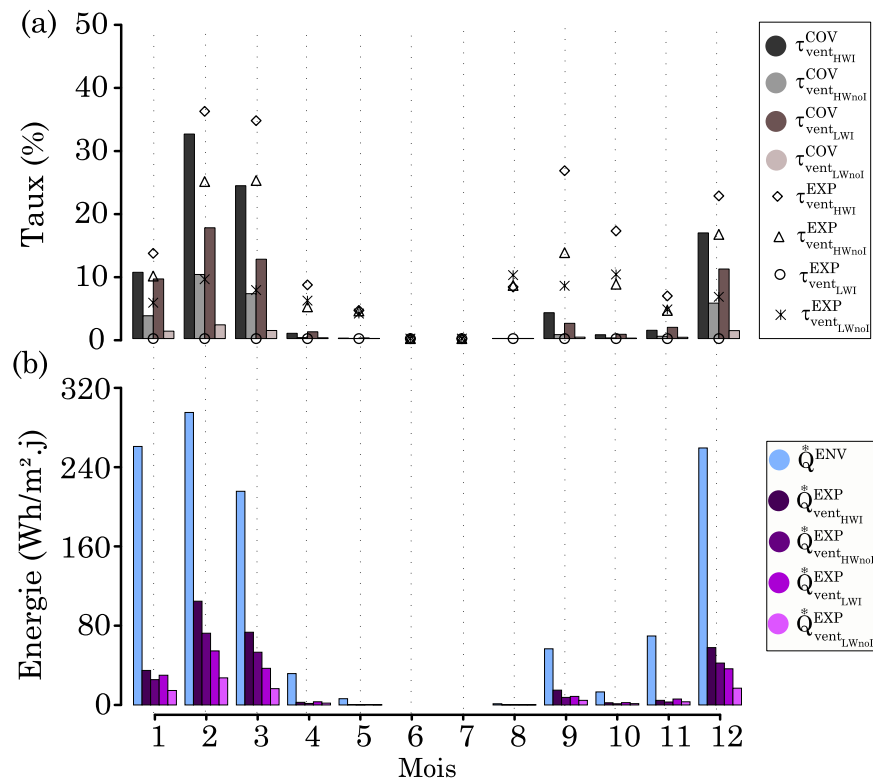
Les figures 3.16 et 3.17 montrent les moyennes mensuelles des indicateurs pour la ressource de convection externe + ciel et pour la ressource de ventilation. La figure 3.18 montre les moyennes mensuelles de l'antipotentiel exploité résiduel à travers l'enveloppe,  $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ . Sur chaque graphique, les quatre cas d'études sont représentés.



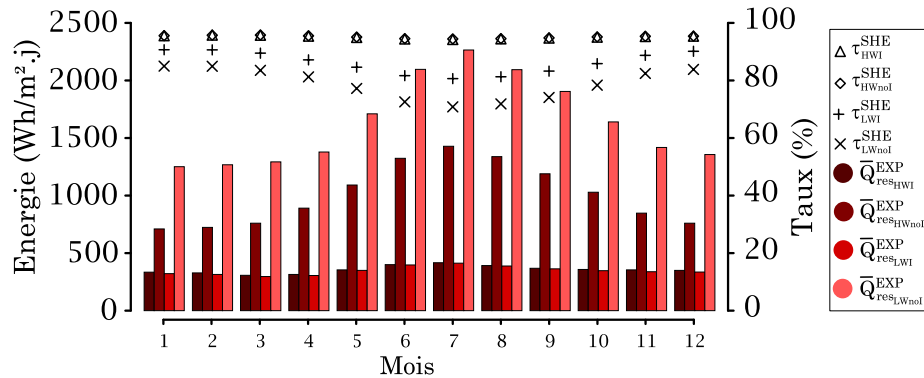
**Fig.3. 16.** Moyennes mensuelles des indicateurs pour la ressource de convection externe et la ressource du ciel pour tous les bâtiments.

L'analyse dynamique des résultats apporte un point de vue temporel sur les différents indicateurs, ce qui permet de confirmer et compléter la vision globale des parties précédentes. L'allure des courbes mensuelles, montre clairement les deux périodes classiques du comportement d'un bâtiment en climat chaud. En saison fraîche, les antipotentiels exploités sont relativement faibles par rapport à la disponibilité des ressources. En saison chaude, les antipotentiels exploités sont élevés alors que les ressources sont nulles ou faibles.

La répartition des indicateurs relatifs est différente pour les configurations: les bâtiments à forte inertie en générale et HWI en particulier exploitent principalement les ressources de ventilation ( $\tau_{vent}^{EXP}$  maximal de 35%) alors que LWnoI exploite principalement les ressources de convection externe et du ciel ( $\tau_{res}^{EXP}$  entre 5% et 20%) comme illustré sur les figures 3.16 et 3.17. Ce dernier exploite moins la ressource de ventilation comparé aux autres configurations de bâtiments. Pendant la saison de disponibilité des ressources, la somme des taux  $\tau_{res}^{COV} + \tau_{vent}^{COV}$  atteint 40% pour la configuration HWI et ne dépasse pas les 25% pour la configuration LWnoI.



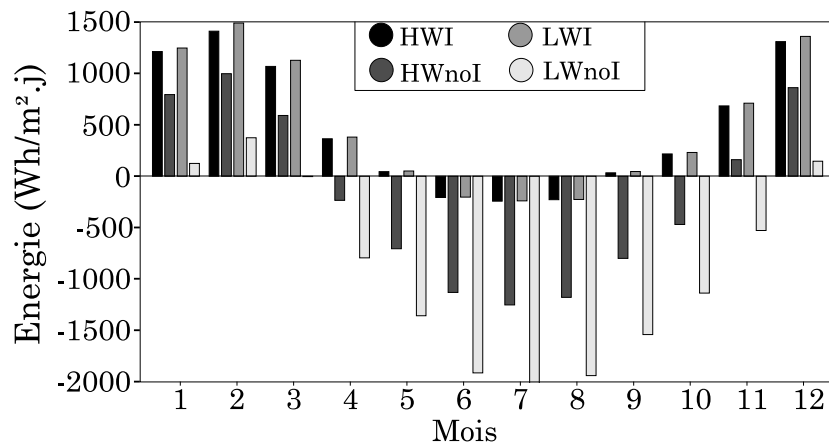
**Fig.3. 17.** Moyennes mensuelles des indicateurs de ventilation pour tous les bâtiments.



**Fig.3. 18.** Moyennes mensuelles des antipotentils exploités résiduels pour les quatre configurations de bâtiments.

Enfin, la figure 3.18 confirme que le passage d'un bâtiment isolé à un bâtiment non isolé génère une augmentation très importante d'antipotentiel exploité résiduel ainsi que la perméabilité de l'enveloppe (par diminution des taux de protection). Elle révèle également que les amplitudes des variations de  $\bar{Q}_{res}^{EXP}$  sont également plus importantes pour les cas non isolés.

Pour mieux apprécier l'analyse dynamique, la figure 3.19 montre la différence entre le potentiel de rafraîchissement non exploité ( $\sum_i \bar{Q}_i^{ENV} - \sum_i \bar{Q}_i^{EXP}$ ) et les antipotentils exploités intérieurs ( $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ ). Cette différence représente la réserve de ressources ou la marge bioclimatique spécifique à une configuration donnée. Si elle est positive alors les ressources sont en excédent et peuvent toujours être exploitées pour réduire les antipotentils exploités et donc des besoins. Si elle est négative, alors les ressources sont déficitaires.



**Fig.3. 19.** Différence entre les potentiels de rafraîchissement environnementaux restant et les antipotentiel exploités résiduels pour chaque mois et pour chaque bâtiment.

On constate que, dans toutes les versions, les ressources sont en excès en décembre, janvier et février. Cet excédent est beaucoup plus prononcé et dure plus longtemps (janvier à avril et d'octobre à décembre) pour les bâtiments isolés (HWI et LWI) que pour les bâtiments non isolés (HWnoI et LWnoI). Les bâtiments isolés disposent donc de plus de marge bioclimatique exploitable. Pour cette raison, une piste d'amélioration pourrait être une isolation élevée pour augmenter les potentiels de compensation ( $\hat{Q}^{EXP}$ ) et ensuite exploiter les ressources indirectement ou même directement en utilisant les techniques d'isolation dynamique présentées dans le chapitre 2. Entre mai et septembre, on observe des périodes de déficit. Encore une fois, les déficits sont minimales pour les bâtiments isolés. Il apparaît ainsi de façon claire que durant ces mois, les solutions pour améliorer la performance des bâtiments pourraient nécessiter, par exemple, une isolation plus importante et une climatisation plus efficace.

### 3.5.5. Discussion

L'interprétation physique des valeurs des indicateurs a démontré la cohérence des indicateurs développés avec les considérations physiques.

L'observation des indicateurs de ressources environnementales a révélé la quasi-absence de ressources de rafraîchissement pendant la saison chaude. Ces informations sont clairement précieuses pour les concepteurs du bâtiment car elles excluent la possibilité de baser la stratégie de rafraîchissement uniquement sur l'exploitation des ressources bioclimatiques, sauf s'il existe un système de stockage inter-saisonnier qui serait capable de capter une quantité suffisante de fraîcheur pendant la saison fraîche.

Ensuite, l'analyse des indicateurs de performance du bâtiment conduit à plusieurs conclusions. Tout d'abord, le bâtiment sans isolation et à faible inertie thermique exploite plus de potentiel de rafraîchissement par convection externe et par radiation avec la voûte céleste, mais cela se fait clairement au détriment d'une grande quantité de chaleur traversant l'enveloppe (antipotentiel exploité résiduel). Cette solution n'est pas raisonnable car elle conduit à un besoin de climatisation plus élevé. De plus, on a montré que la marge bioclimatique des ressources, était favorisée par l'isolation.

Les autres configurations de bâtiments exploitent principalement la ressource de rafraîchissement de ventilation. Une façon intelligente de contrôler le flux d'air à travers le bâtiment offrirait une excellente opportunité de diminuer les besoins de climatisation. Cependant, cela ne serait utile que pendant la saison fraîche. Pour les mêmes bâtiments, les potentiels de convection externe et d'exploitation du ciel sont généralement faibles. Ces faibles valeurs révèlent la limite des enveloppes passives pour l'exploitation de ces ressources. Il semble donc qu'il n'est pas aussi raisonnable de ne compter que sur l'isolation. La voie la plus raisonnable est très probablement de combiner isolation et exploitation des ressources afin de d'améliorer la performance bioclimatique d'un projet. Le concepteur de bâtiment pourrait envisager des systèmes actifs pour collecter la fraîcheur de la voûte céleste uniquement lorsqu'elle est disponible.

Enfin, il convient de mentionner les différents ordres de grandeur entre les potentiels énergétiques externes et internes et la prédominance de la contrainte solaire sur l'enveloppe externe. Les techniques de protections solaires exposées dans le chapitre 2 sont clairement une bonne option pour diminuer les antipotentielles exploités intérieur et donc le besoin de rafraîchissement du bâtiment.

---

### 3.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de définir deux ensembles d'indicateurs bioclimatiques adaptés aux bâtiments climatisés dans les climats chauds et humides. Un premier jeu d'indicateurs permet de caractériser le site en quantifiant les potentiels et antipotentielles environnementaux exploitables. La deuxième famille d'indicateurs évalue les performances d'une solution de conception via la quantification des ressources exploitées (ou les sources de chaleur protégées). L'analyse du potentiel bioclimatique proposée facilite clairement l'approche de conception, car elle donne aux concepteurs une évaluation numérique claire qui vérifie d'une part si le projet proposé est bien protégé des contraintes externes mais aussi s'il exploite correctement les ressources de rafraîchissement environnementales.

Les ensembles d'indicateurs ont été confrontés à des cas tests afin de montrer la nature des décisions pouvant être tirées. Cette confrontation a montré que les informations pouvant être tirées de l'analyse des indicateurs sont précieuses. Ils peuvent orienter le choix des architectes vers des solutions pertinentes en termes d'architecture bioclimatique. Le calcul des indicateurs actuels n'a pas



vocation à remplacer les outils déjà utilisés dans le cadre des procédures bioclimatiques, comme les diagrammes bioclimatiques. Ils entendent simplement enrichir les procédures en donnant un aperçu des ressources exploitables et de la capacité du bâtiment à exploiter ces ressources.

La liste des indicateurs définis dans le présent document n'est pas exhaustive. Étant donné que la motivation derrière l'élaboration de ces indicateurs était d'évaluer la possibilité d'exploiter les ressources bioclimatiques dans un climat chaud et humide, le sol n'était pas considéré comme une ressource potentielle en raison de sa température élevée. Pour différents emplacements, il serait utile de considérer cette ressource.

De plus, le cas de test a révélé la limitation des enveloppes passives dans leur capacité à exploiter les ressources externes telles que la voûte céleste. Pour de telles ressources environnementales, des systèmes actifs tels que les systèmes de rafraîchissement radiatifs présentés dans le chapitre 2 seraient utiles.

Ce nouvel ensemble d'indicateurs peut être facilement adopté par les concepteurs et les architectes à la recherche de solutions bioclimatiques optimales aux premiers stades de la conception des bâtiments.

## 4. Évaluation de Solutions Bioclimatiques

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>
<b>4.2</b>	<b>Description du cas d'étude</b>
4.2.1.	Architecture du bâtiment
4.2.1.	Caractéristiques thermique du bâtiment
<b>4.3</b>	<b>Analyse bioclimatique de la configuration initiale</b>
<b>4.4</b>	<b>Analyse de quelques solution bioclimatiques</b>
4.4.1.	Protection solaire extérieur aux vitrages
4.4.2.	Protection solaire intérieure aux vitrages
4.4.3.	Isolation thermique des parois
4.4.4.	Performance des fenêtres
4.4.5.	Masque solaire
4.4.6.	Orientation
4.4.7.	Compacité
4.4.8.	Cool roof : toitures à haute réflexion solaire
4.4.9.	Toiture double peau ventilée
4.4.10.	Isolation dynamique
4.4.11.	Ventilation naturelle
4.4.12.	Augmentation de la masse thermique
4.4.13.	Augmentation de WWR
<b>4.5.</b>	<b>Synthèse</b>
<b>4.4</b>	<b>Conclusion</b>

---

### 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, les critères d'analyse de performance bioclimatique précédemment développés sont appliqués sur un cas de bâtiment existant à Djibouti. La littérature scientifique présentée dans la section 2.3 nous montrait des nombreux exemples de solution bioclimatique. Ces techniques sont des choix de conception possibles compte tenu du contexte. Le concepteur doit décider quelle stratégie mettre en place et avec quelles actions architecturales. Dans ce chapitre plusieurs solutions ont donc été intégrées au bâtiment étudié. Les simulations de ces nouvelles configurations ont permis de calculer à nouveau les indicateurs de potentiel et de performance qui ont été confrontés aux indicateurs calculés pour les bâtiments d'origine afin de connaître l'influence de chaque technique prise individuellement.

## 4.2. Description du cas d'étude

### 4.2.1. Architecture du bâtiment

Pour évaluer l'influence de différentes stratégies, un modèle numérique basée sur un bâtiment résidentiel typique située à Djibouti est étudié. Il s'agit de deux blocs de bâtiments d'une superficie de 158 m<sup>2</sup> reliés par une cage d'escalier au centre de sorte que l'ensemble présente une forme en H (figure 4.1). Ce type de bâtiment est construit par centaines dans le cadre du projet national visant à accroître l'offre en logement. Il s'agit de la construction d'un nouveau quartier sur le site de PK13 (la périphérie S-O de la ville de Djibouti).

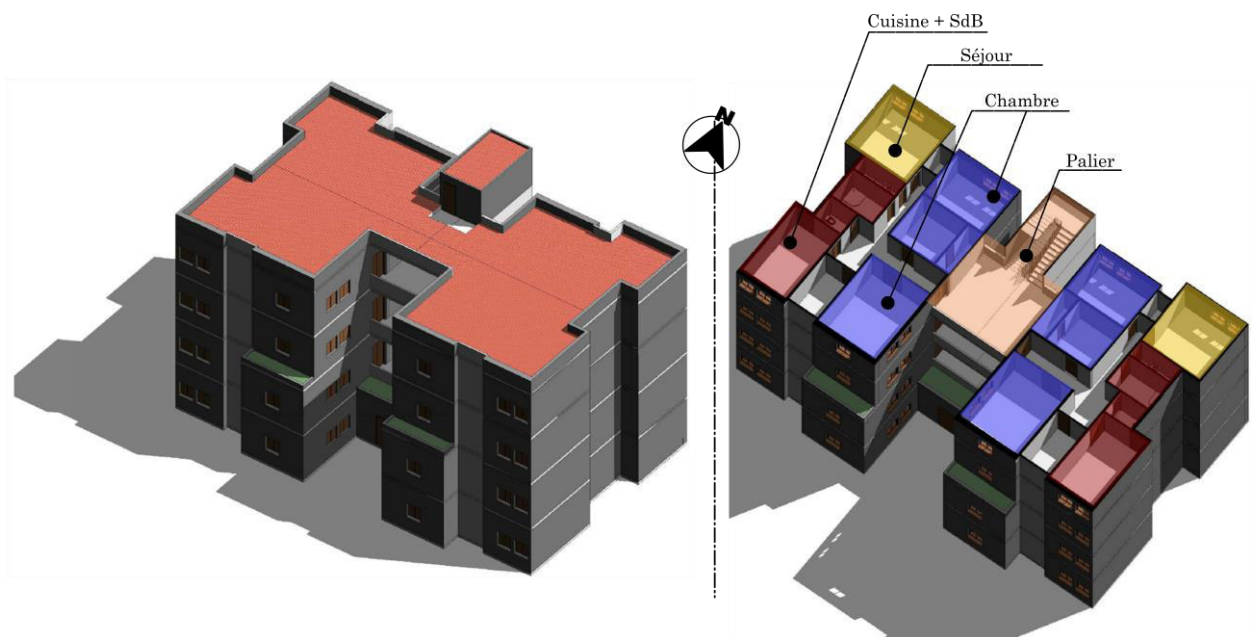


Fig. 4. 1 Image virtuelle du modèle architectural

Chaque immeuble de ce type comprend un rez-de-chaussée et trois étages. Chaque étage est composé de deux appartements répartis dans les deux ailes avec séjour, chambres, salle de bain, cuisine, salle à manger et local technique. La surface du plancher habitable total à l'intérieur de l'enveloppe s'élève à 925 m<sup>2</sup> avec une hauteur sous plafond de 3.2 m. Le volume climatisé est égal à 2960 m<sup>3</sup>. L'immeuble est assez faiblement vitré avec une majorité de vitrages orientés au nord et au sud. L'entrée principale du bâtiment est orientée au sud.

#### 4.2.2. Caractéristique thermique du bâtiment

Avec les caractéristiques générales précédemment présentées, nous avons imaginé comme modèle énergétique, un immeuble dont chaque étage présente deux blocs avec une seule zone par bloc modélisé avec Design Builder/Energy+ (Figure 4.2).

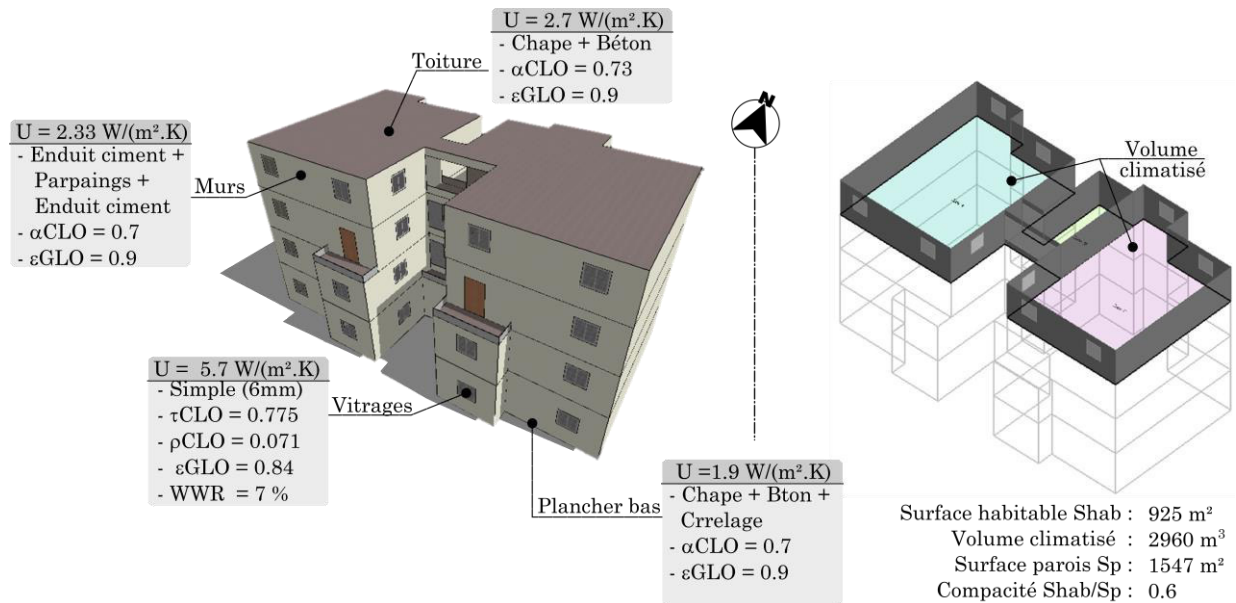


Fig. 4. 2. Rendu géométrique du modèle thermique

##### 4.2.2.1. Compacité

Il existe plusieurs manières de calculer la compacité d'un bâtiment. Pour prendre en compte la réalité physique de la surface habitable qui est un facteur important d'un projet de construction, la compacité est définie par la surface d'échange par m<sup>2</sup> de surface habitable, exprimée par le rapport non dimensionnel  $S_p/S_{hab}$ . Le bâtiment étudié présente des redans centraux sur la façade Sud et Nord. Ces retraits au centre de la construction impliquent un coefficient de compacité de 1.7. Plus ce facteur est faible et meilleur est la compacité du bâtiment.

##### 4.2.2.2. Composition des parois de l'enveloppe

Les résultats des typologies de construction présentés au chapitre 1 (section 1.3) montrent que les bâtiments à Djibouti sont pour la plupart érigés avec une structure en béton armé et un remplissage

en parpaings ou semblable. Ce modèle sert tant pour des constructions résidentielles collectives qu'individuelles. Pour cet immeuble les parois extérieures (Figure 4.2) sont représentées par :

- les murs verticaux externes constitués (de l'extérieur vers l'intérieur) de 20 mm d'enduit ciment, de 200 mm de Parpaings de ciment alvéolés et d'une couche d'enduit intérieur supplémentaire de 20 mm.
- le plancher bas du RdC est un dallage sur terre-plein représenté par une couche de béton de 200 mm, de 50 mm d'une chape de mortier et du carrelage.
- les murs intérieurs sont construits avec des agglomérés de ciment alvéolés de 200 mm et sont recouverts de part et d'autre d'enduit de ciment d'une épaisseur estimée à 20 mm.
- L'inertie du bâtiment est renforcée par le plancher intermédiaire constitué d'une dalle en béton de 200 mm d'une couche de chape ciment et de carrelage.
- et enfin la toiture est composée d'un plancher porté en béton armé de 200 mm et de 50 mm d'une chape en mortier avec une finition lisse.

Il convient de noter que le bâtiment n'est pas isolé. L'isolation thermique dans l'habitat à Djibouti reste dans l'imaginaire collectif un luxe seulement à proposer pour les villas haut de gamme. Les peu de marchands de matériaux le proposent entre avec un prix compris entre 20 à 50 €/m<sup>2</sup>. Les valeurs d'absorption solaire des murs et du toit sont respectivement fixées à 0,7 et 0,73 et leur émissivités en GLO est égale à 0.90 (Figure 4.2).

Pour la typologie d'immeuble considérée, la pratique djiboutienne utilise largement les profilés d'aluminium comme fermetures des surfaces vitrées, et elles sont composées de verre simple de transparence normale. Le bâtiment étudié a un pourcentage de 7% d'ouverture dont les coefficients radiatifs sont donnés dans la figure 4.2.

#### 4.2.2.3. *Ventilation et système de rafraîchissement*

D'une façon générale, il est habituel, à Djibouti, que ce genre d'immeubles n'aient pas de systèmes de climatisation d'air centralisés, en laissant à la charge des propriétaires l'installation de petits appareils de conditionnement d'air, généralement fixés sur les murs des façades. Pour les simulations, le confort thermique du bâtiment étudié est assuré par un générateur de puissance idéal qui gère le rafraîchissement (température de consigne de rafraîchissement  $T_{cr} = 26^{\circ}\text{C}$ ).

Dans la littérature, on peut noter un manque de travaux sur l'infiltration d'air au travers de l'enveloppe des bâtiments en climat chaud en général. Le système de menuiserie coulissante et le manque d'étanchéité des joints élastomères des fenêtres et portes extérieures implique de facto une mauvaise étanchéité à l'air. Ce constat explique notre choix de supposer une très mauvaise étanchéité à l'air de 16.5 vol/h à 50 Pa de différence entre l'extérieur et l'intérieur, selon la norme EN 13829 pour l'enveloppe de la construction.

L'utilisation de la ventilation naturelle n'est pas courante dans le pays. Plusieurs facteurs tels que l'intimité, la poussière ou surtout les moustiques et une grande quantité d'insectes entrant limitent la ventilation naturelle même si la ressource est disponible pour le refroidissement.

Concernant la ventilation naturelle, les échanges d'air avec l'extérieur sont minimisés dans le bâtiment par la fermeture des ouvrants tout au long de la simulation. Les fenêtres n'apportent pas d'air neuf à la maison.

#### 4.2.2.4. *Scénario des charges internes*

Le bâtiment étudié dans notre cas étant une construction collective, un ménage de quatre personnes ayant une activité extérieure tous les jours de la semaine est supposé pour chaque bloc tout le long de l'année, sans tenir compte des périodes des vacances, mais avec des absences horaires, utilisation de la cuisine et des appareils bureautique incluse. Un scénario quotidien de puissance total dissipée à la fois par les occupants et les appareils est intégré à la simulation et donné par le graphique de la figure 3.11. Dans ce planning type, trois moments hauts d'utilisation de la maison ont été créés. Le matin, midi et soir correspondant aux moments de repas et leur préparation avec une progression de l'utilisation énergétique en forme de courbe de Gauss avec des pics à 8h, 14h et 20h.

---

### 4.3. Analyse bioclimatique de la configuration initiale

Les résultats présentés dans ce paragraphe ont pour ambition de se positionner sur la pertinence énergétique de l'utilisation des solutions constructives sur un bâtiment. Nous avons besoin pour cela de connaître la performance bioclimatique initiale du modèle de bâtiment défini dans le paragraphe précédent.

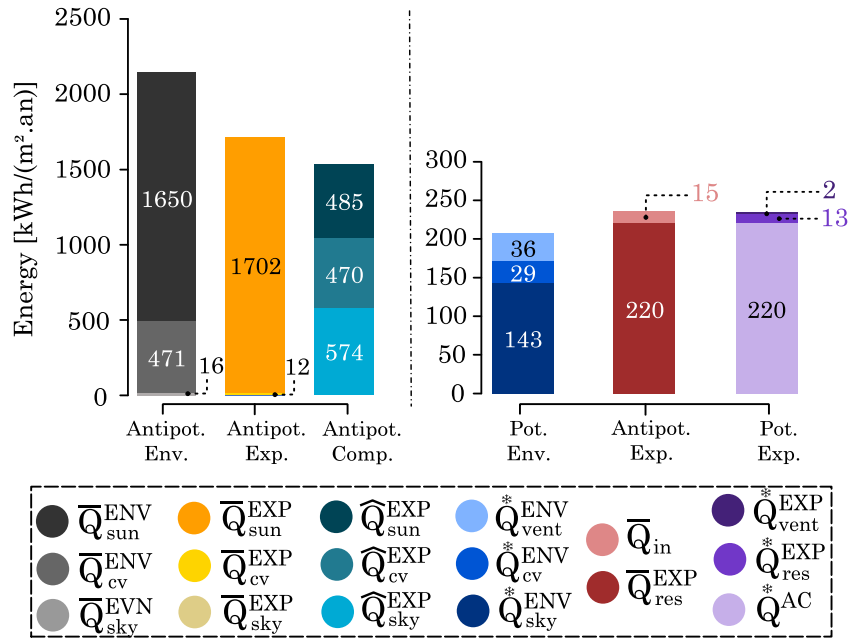





Fig. 4. 3. Bilan thermique : Comparaison entre les ERIs et les BPIs annuels pour la variante de base.

La Figure 4.3 présente le bilan thermique extérieur (à gauche) et intérieur (à droite) permettant de visualiser ses performances annuelles. Pour rappel, sur ce graphique condensé les indicateurs journaliers sont ici additionnés sur une année entière, puis, ils sont rapportés à une unité de surface habitable du bâtiment. De plus, le Tableau 4.1 indique les valeurs des indicateurs relatifs de la variante. Pour plus de clarté, les valeurs sont arrondies à la dizaine de kWh/m<sup>2</sup> habitable pour les indicateurs absolus, et au dixième près pour les valeurs relatives (taux d'exploitation, de couverture, de protection et d'ombrage).

Les résultats des bilan extérieurs montre d'abord que globalement moins d'antipotentiels ( $\sum_i \bar{Q}_i^{EXP}$ ) arrivent sur le bâtiment par rapport au VHPB. En effet, l'enveloppe du bâtiment ayant une forte inertie thermique, la température de sa surface extérieure reste inférieure à la température de l'air extérieur et du ciel. Cela se traduit par un  $\bar{Q}_{cv}^{EXP}$  systématiquement très faible par rapport à  $\bar{Q}_{cv}^{ENV}$  (de 471 contre 12 kWh/m<sup>2</sup>), et un  $\bar{Q}_{sky}^{EXP}$  égal à zéro.

Tableau 4. 1. Valeurs des indicateurs relatifs de la variante initiale.

Ressources	$\tau^{EXP}$	$\tau^{COV}$	$\tau^{SHE}$	$\tau^{SHA}$
 Ciel & convection externe	7.3%	6.4 %	-	-
 Vent	4.6%	1%	-	-
 Soleil	-	-	89.2%	19.8%

Les résultats des bilan extérieurs montre d'abord que globalement moins d'antipotentiels ( $\sum_i \bar{Q}_i^{EXP}$ ) arrivent sur le bâtiment par rapport au VHPB. En effet, l'enveloppe du bâtiment ayant une forte inertie thermique, la température de sa surface extérieure reste inférieure à la température de l'air extérieur et du ciel. Cela se traduit par un  $\bar{Q}_{cv}^{EXP}$  systématiquement très faible par rapport à  $\bar{Q}_{cv}^{ENV}$  (de 471 contre 12 kWh/m<sup>2</sup>), et un  $\bar{Q}_{sky}^{EXP}$  égal à zéro. A l'inverse, la morphologie du bâtiment tel qu'il est actuellement conçu avec les retraits au centre des façades Sud et Nord, provoque une augmentation de la surface des façades exposée au soleil par rapport à sa forme très compacte (VHPB). Il en résulte une augmentation de l'antipotentiel exploité  $\bar{Q}_{sun}^{EXP}$  (de 1650 à 1702 kWh/m<sup>2</sup>.an). Néanmoins, cette augmentation est limitée par ces redans centraux qui projettent de l'ombre sur d'autres surfaces. Globalement, le taux d'ombrage du bâtiment est d'environ 20% comme indiqué sur le Tableau 4.1. Cela signifie que 80% des antipotentiels disponibles sur le site, dont la plus grande partie provient directement du rayonnement solaire, vont être absorbés par l'enveloppe externe du bâtiment (1714 kWh/m<sup>2</sup>.an). Ensuite, 1529 kWh/m<sup>2</sup>.an de ces antipotentiels sont réfléchis par l'enveloppe ( $\hat{Q}_{sun}^{EXP}$ ) et évacués vers l'environnement extérieur par radiation ( $\hat{Q}_{sky}^{EXP}$ ) et par convection ( $\hat{Q}_{cv}^{EXP}$ ). Ainsi, le taux de protection  $\tau^{SHE}$  de la variante de base est de 89.2% soit un taux de perméabilité à la chaleur externe d'environ 11%. Par conséquent, la configuration initiale de l'enveloppe expose l'environnement intérieur à une grande quantité d'antipotentiel exploité résiduel ( $\bar{Q}_{res}^{EXP} = 220$  kWh/m<sup>2</sup>.an). Ce dernier reste supérieur à la somme des potentiels de rafraîchissement environnementaux ( $Q_{vent}^{ENV} + Q_{cv}^{ENV} + Q_{sky}^{ENV}$ ) disponible annuellement. Ce qui se traduit par un besoin de climatisation très élevée ( $Q^{AC} = 220$  kWh/m<sup>2</sup>.an). Si nous les comparons avec le contexte en France,



c'est intéressant de constater que ce besoin est équivalent aux dépenses énergétiques des ménages modestes dans des logements sociaux de basse qualité thermique en France (construction avant les années 80) dans des climats modérés froids. Les résultats de l'analyse annuelle permettent de constater aussi la difficulté du bâtiment à transférer le froid prélevé à l'extérieur à travers l'enveloppe. L'enveloppe de la variante initiale exploite faiblement les ressources de rafraîchissement bioclimatiques (convection externe, voûte céleste et ventilation) pour évacuer la chaleur transmise vers l'intérieur. En effet, avec  $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$ , le taux d'exploitation ( $\tau^{EXP}$ ) des trois ressources combinées ne dépasse pas les 8 % du potentiel disponible. Cette exploitation ne couvre qu'environ 6 % des antipotentiel exploités résiduels ( $\tau^{COV}$ ). La configuration initiale du bâtiment étudié n'a aucune prétention en matière d'exploitation des potentiels de rafraîchissement environnementaux.

Le graphique condensé des bilans thermiques est aussi utilisé dans la Figure 4.4 pour évaluer d'une part le comportement bioclimatique de la configuration initiale pour une semaine type de chaque période (a - saison fraîche et b - saison chaude), d'autre part comprendre le comportement thermique de différentes zones du bâtiment (c - RDC et d - R+3). Ici, la période d'intégration est restreinte au niveau de la semaine. Les Figure 4.4 - a et 4.4 - b illustrent clairement la variabilité saisonnière, qui indique une saison fraîche avec moins d'antipotentiel environnementaux ( $35 \text{ kWh/m}^2$  contre  $64 \text{ kWh/m}^2$  en saison chaude), plus de protection d'antipotentiel exploité ( $\tau^{SHE} = 94\%$ ) et environ trois fois plus de potentiels de rafraîchissement environnementaux que d'antipotentiel exploité résiduel ( $8 \text{ kWh/m}^2$  pour  $\sum_i \dot{Q}_i^{ENV}$  contre  $3 \text{ kWh/m}^2$  pour  $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ ). En revanche, en été extrêmement chaud, avec plus d'antipotentiel environnementaux, le bâtiment est moins protégé des antipotentiel exploités ( $\tau^{SHE} = 81\%$ ). Il en résulte plus de chaleur transitant au travers de l'enveloppe ( $8 \text{ kWh/m}^2$  pour  $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ ) et des ressources de rafraîchissement quasi-inexistantes.

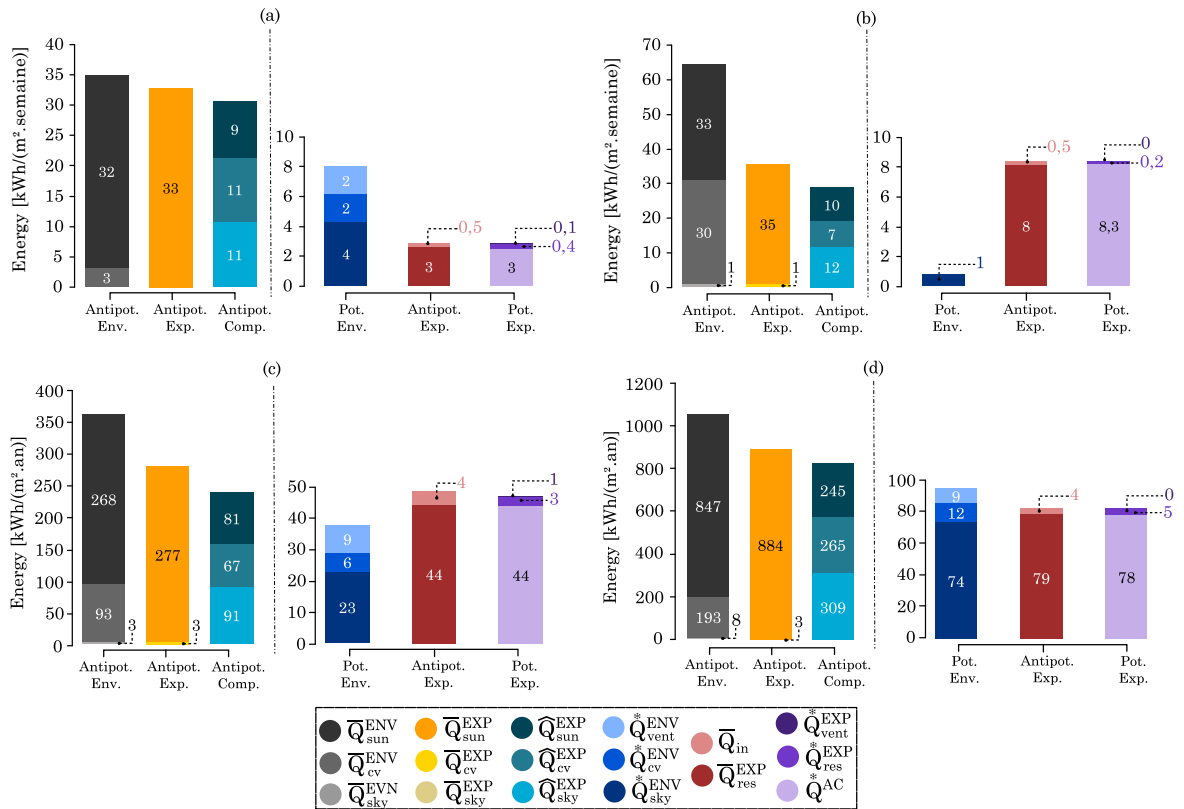


Fig. 4. 4. Bilan thermique : Comparaison entre les ERIs et les BPIs (a) - semaine type saison chaude ; (b) - semaine type saison fraîche ; (c) RDC ; (d) - R+3.

Enfin sur les graphiques 4.4 - c et 4.4 - d, le calcul des indicateurs a été exprimé à l'échelle d'une zone pour une année. Le comportement du dernier étage est différents des autres. En effet, parmi les composants de l'enveloppe du bâtiment, le toit est l'un des éléments le plus exposé aux antipotentielles environnementales (1049 kWh/m<sup>2</sup>.an contre 363 kWh/m<sup>2</sup>.an au RDC), qui influe sur les gains de chaleur (79 kWh/m<sup>2</sup>.an contre 44 kWh/m<sup>2</sup>.an au RDC). C'est la cause principale des besoins moindres en climatisation au RDC. Par ailleurs, le dernier étage, et donc le toit, a aussi accès à plus de potentiels de rafraîchissement (104 kWh/m<sup>2</sup>.an contre 47 kWh/m<sup>2</sup>.an pour le RDC). Bien que supérieurs aux antipotentielles exploités résiduels pour le dernier étage, ils sont faiblement exploités pour évacuer la chaleur transmise vers l'intérieur. Cependant, la nature des matériaux utilisés dans la variante initiale transforme ces potentiels en potentiels de compensation des antipotentielles exploités du soleil et de la convection externe sur la face externe de l'enveloppe.

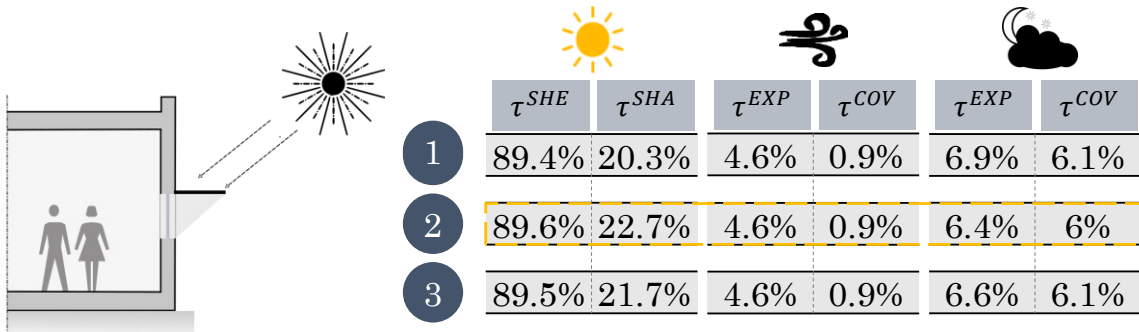
Dans la configuration actuelle les techniques de protection solaire ou de rafraîchissement bioclimatique exposés dans le chapitre 2

section 2.4 ne sont pas suffisamment explorées. Ce qui rend le bâtiment perméable à la chaleur apportée par le rayonnement solaire. Dans la partie suivante, il sera question d'évaluer les impacts de quelques solutions sur l'amélioration de la performances thermiques de la variante de base.

#### 4.4. Analyse de quelques solutions bioclimatiques

Nous allons produire une série de modèles de bâtiment sur la base de la configuration initiale en réalisant seulement les modifications associées à une solution à la fois. Les quelques techniques architecturales et non-architecturales que nous allons analyser sont modélisables par le logiciel de simulation DesignBuilder/Energy+. Tous les systèmes bioclimatiques proposées dans le chapitre 2 section 2.4 ne pourront pas être testées dans le cadre de cette étude. C'est un objectif que nous développerons dans des projets futurs. L'objectif ici est d'analyser le comportement des modèles pour donner suite à une modification en utilisant les indicateurs développés dans cette thèse. Il est important aussi de noter que ces mesures n'ont pas été optimisées. Le premier graphique qui sera analysé traite les potentiels et antipotentils externes et internes. Indépendamment des valeurs absolues ce qui nous intéresse sont les pourcentages de variation de la performance par rapport à la variante initiale du bâtiment. Le deuxième graphique reflète simplement cette variation. Les indicateurs relatifs avant et après modifications seront aussi analysés.

##### 4.4.1. Protection solaire extérieure aux vitrages



Nous avons vu dans le chapitre 2 section 2.4 que la protection solaire extérieure des parties vitrées est une des mesures les plus représentatives de la construction bioclimatique en climat chaud. Elle se retrouve dans pratiquement tous les recommandations et références de construction pour ce climat. L'objectif recherché est bien évidemment d'augmenter le taux d'ombrage du bâtiment en di-

minuant les antipotentiel exploités. Il existe des nombreuses propositions architecturales très habituels pour les paires soleil, cependant nous nous intéressons à l'efficacité de trois modèles de protections solaires : les brise-soleils à lames devant les fenêtres, les casquettes et les grands encadrements des fenêtres qui bloquent le soleil par ses trois pare-soleils périphériques.

### **Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Dans Design Builder les paramètres concernant l'ombrage des fenêtres ont été modifiés pour chaque variante. Sur la première variante une casquette de 50 cm de débord a été rajouté sur les fenêtres (Figure 4.5-1). Le deuxième modèle comprend des brise-soleils à forte densité avec 12 lames inclinées de 20° et écartées de 10 cm les unes des autres, placées à 10 cm de la fenêtre (Figure 4.5-2). Enfin, sur les ouvrants de la troisième variante, un cadre périphérique à 50 cm de profondeurs est modélisé (Figure 4.5-3). Ces modèles de bâtiments ont été comparés avec la configuration initiale sans protection extérieure sur les fenêtres.

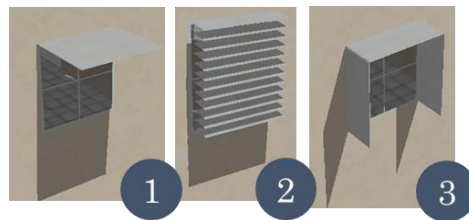


Fig. 4. 5. Différentes variantes de protections solaires modélisées dans le cadre de l'étude

### **Discussion :**

Le résultat est sans surprises. Les trois solutions permettent de diminuer l'antipotentiel solaire exploité par le bâtiment ( $Q_{\text{sun}}^{\text{ENV}}$ ). Si nous comparons les trois solutions, nous constatons que la variante 2 gère les apports plus efficacement avec moins de 64 kWh/m<sup>2</sup>.an d'apport solaire, soit une amélioration de 3% du taux d'ombrage ( $\tau^{\text{SHA}}$ ) par rapport à la solution de base. La casquette de 50 cm est la moins performante avec seulement une réduction de 12 kWh/m<sup>2</sup>.an des apports solaires. La solution intermédiaire, encadrement de 50 cm, présente un taux d'ombrage d'environ 21,7% soit 2% de plus que la configuration initiale.

Cet effet protecteur est limité par une baisse des potentiels de compensation proportionnelle à l'action de protection extérieures. En effet, à la vue des ombres portées sur les éléments de l'enveloppe

(Figure 4.5), une partie des murs et fenêtres échangent moins avec les ressources de rafraîchissement disponibles. Il en résulte une réduction des potentiels de compensation ( $\sum_i \hat{Q}_i^{EXP}$ ) allant de 49 kWh/m<sup>2</sup>.an pour les brise-soleils à 7 pour les casquettes. Rappelons ici que les dispositifs de protection sont en dehors de la surface de fermeture du bilan.

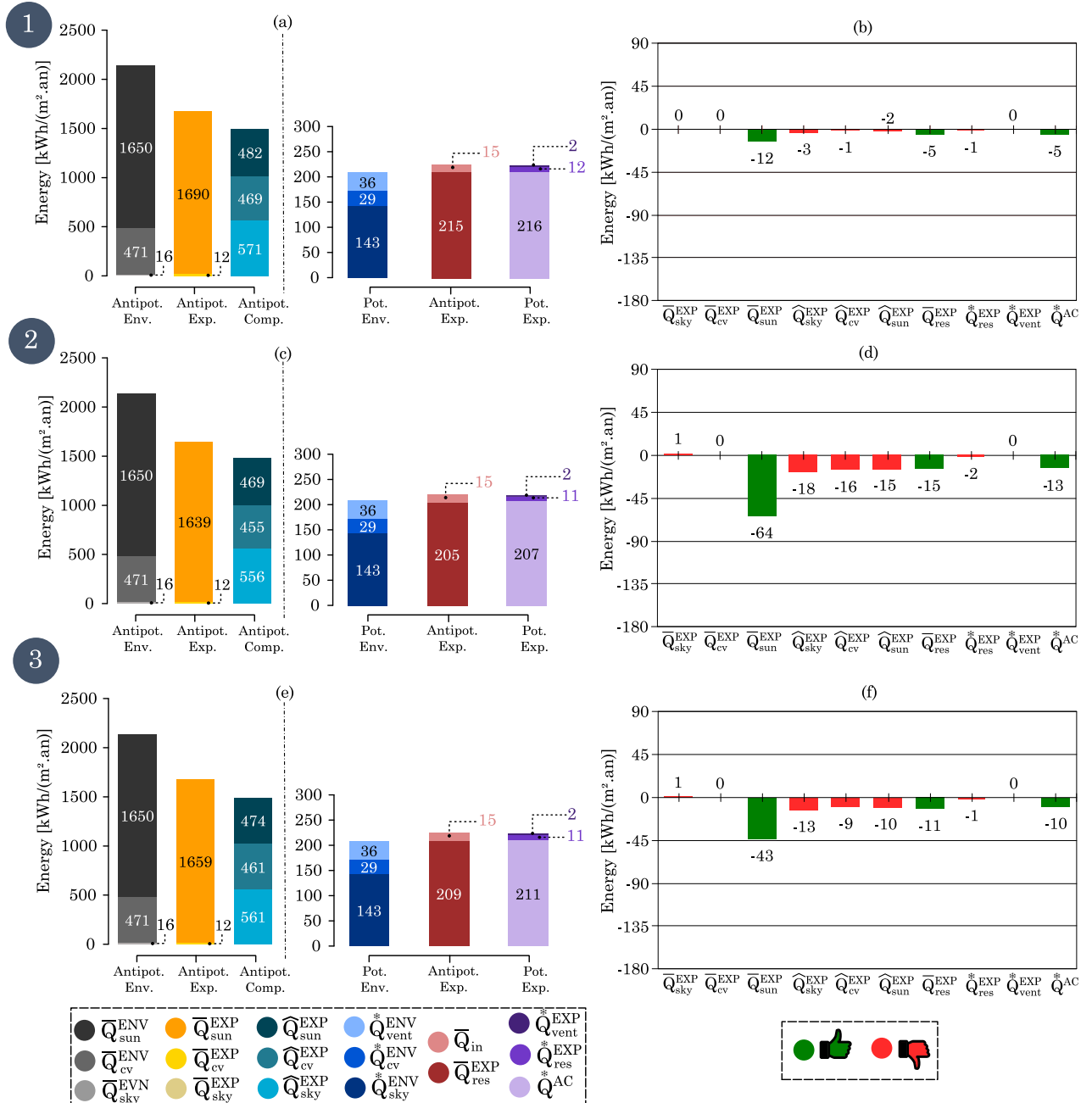
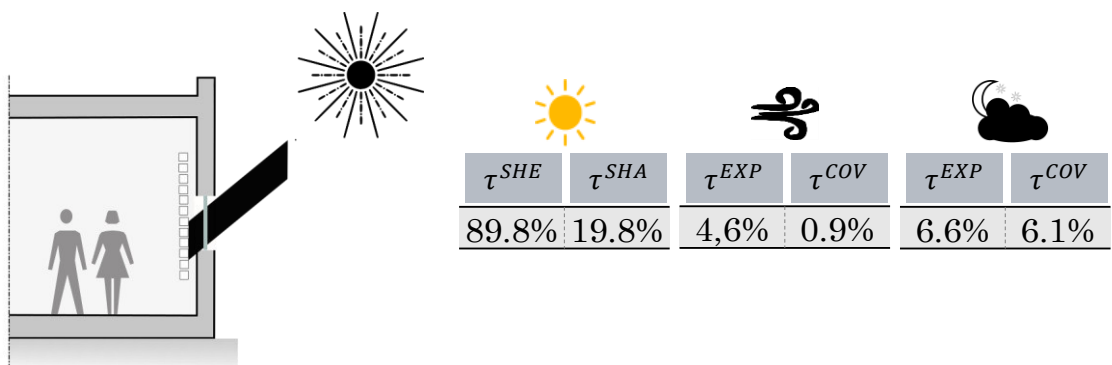


Fig. 4. 6 Analyse bioclimatique de la protection solaires : (a),(c),(e) – ERIs et BPIs annuels pour chaque solution ; (b),(d),(f) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

En ce qui concerne les potentiels intérieurs, l'effet d'ombrage des dispositifs réduit, en plus des antipotentiel exploités à l'extérieur, la transmission des apports solaires vers l'intérieur du bâtiment. Ainsi, les variations de performances montrent moins d'antipotentiel exploités résiduels et donc une économie des besoins de climatisation allant de 13 kWh/m<sup>2</sup>.an (variante 2) à 5 kWh/m<sup>2</sup>.an (variante 1) par rapport à la conso de base. De la même manière que l'extérieur, les solutions de protection solaire diminue très légèrement (jusqu'à 2 kWh.m<sup>2</sup>) le potentiel d'exploitation résiduel ( $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ ), déjà faiblement exploité.

Dans une discussion plus globale et dans le cas de l'analyse spécifique d'une ville comme Djibouti, il nous semble évident que ces actions architecturales constituent une amélioration de la performance bioclimatique du bâtiment initial non-protégé. Selon la technique adoptée, elles peuvent être faciles à mettre en œuvre surtout pour les cadres périphériques ainsi que les pare-soleils horizontaux qui sont relativement simple à faire et sont plus économiques. Les murs peuvent assurer cette fonction lorsque la menuiserie se situe alignée avec le nu intérieur du mur, l'encadrement se fait pratiquement tout seul. Indépendamment de notre analyse de performance, l'avantage de l'encadrement face au brise-soleil est bien entendu la vue dégagée que les brise-soleils peinent à fournir.

#### 4.4.2. Protection solaire intérieure aux vitrages



Souvent considérée comme inefficace, c'est la solution la plus répandue à Djibouti (dans ce qu'il a été possible de voir) lorsque le soleil n'est plus bloqué par l'extérieur. Les radiations solaires pénètrent à l'intérieur du bâtiment, les rideaux intérieurs captent le rayonnement et confinent une forte chaleur proche du vitrage qui commencent à radier à leur tour vers l'extérieur évacuant ainsi la chaleur. Nous voulons ici aussi juger la gestion des apports solaires et évaluer ses performances bioclimatiques au moyen de nos indicateurs.

### **Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Dans Design Builder, le paramètre qui concerne l'ombrage des fenêtres a été modifié. En particulier, un modèle de rideau fabriqué en tissu courant appelé « semi open weave medium » est utilisé à 5 cm des fenêtres.

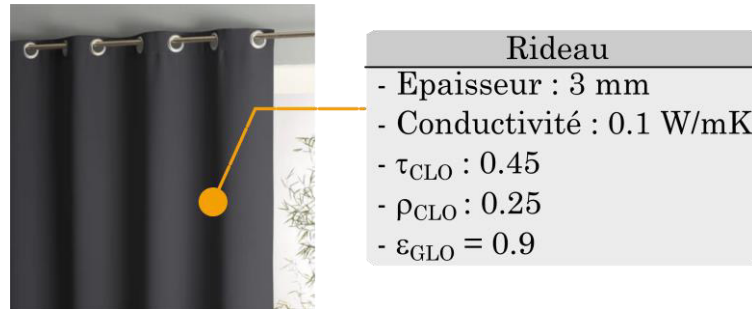


Fig. 4. 7. Caractéristiques du rideau simple.

### **Discussion :**

Il est intéressant de constater que ce dispositif agit essentiellement sur un indicateur extérieur ( $\hat{Q}_{sun}^{EXP}$ ) et deux indicateurs intérieurs ( $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ , et  $Q_i^{AC}$ ). En effet, les rideaux ne transmettent pas tous les rayonnements solaires au-delà de l'interstice verre-rideau. Une partie est réfléchiée vers l'extérieur, augmentant ainsi de 15 kWh/m<sup>2</sup>.an le potentiel de compensation du solaire par rapport à la variante sans protection (Figure 4.8-b). Cela baisse aussi de 12 kWh/m<sup>2</sup>.an la chaleur transférée vers les pièces de vie. Pour réduire davantage ces antipotentiel exploités, il faudrait agir sur deux points essentiels : empêcher l'air chaud contenu dans l'espace verre-rideau de s'échapper en partie haute chauffant ainsi l'intérieur, et réduire au maximum la transmission de la chaleur par conduction du rideau. Plus sera efficace ce confinement de l'air entre le rideau et le vitrage et plus sera basse la conductivité thermique plus sera important les variations de l'antipotentiel exploités résiduels. La contrepartie de cette mesure est la réduction drastique de la lumière naturelle compensée par un éclairage artificiel.

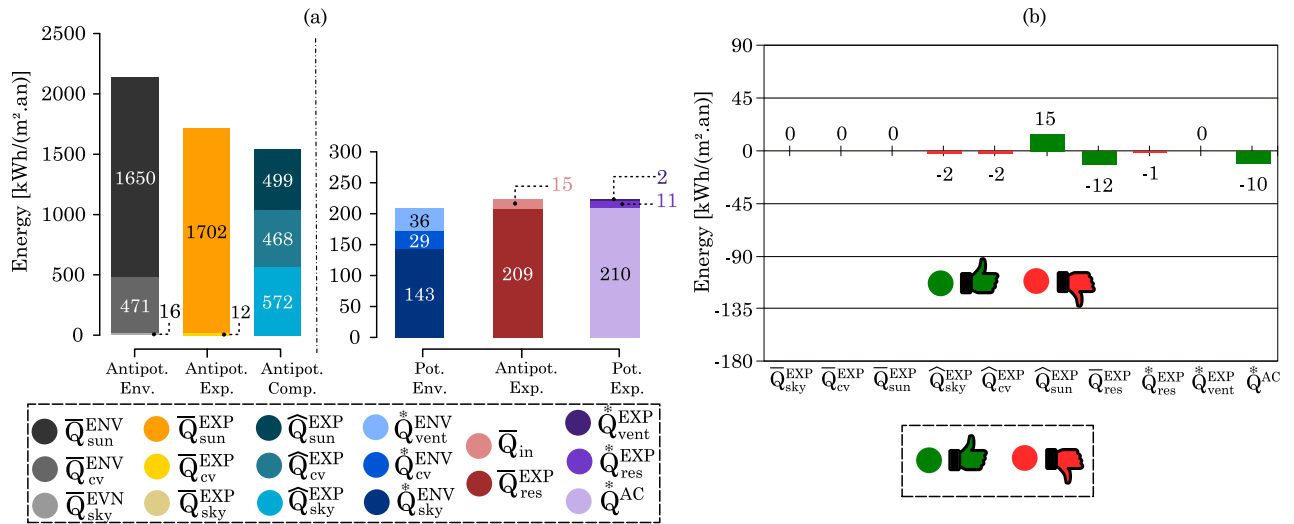
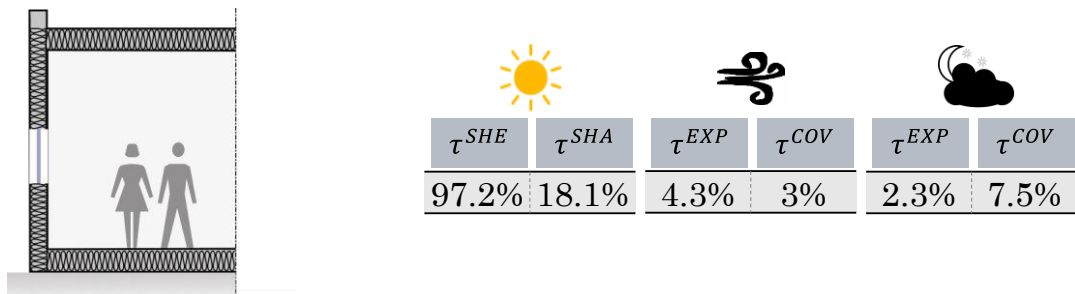


Fig. 4. 8. Analyse bioclimatique de la protection interne : (a) – ERIs et BPIs annuels; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

L'analyse bioclimatique de la solution testée montre enfin une amélioration de 10 kWh/m².an de l'indicateur de besoin de climatisation, qui reste très élevé (210 kWh/m².an). Soit une consommation énergétique équivalente au modèle de bâtiment avec des cadres périphériques sur les fenêtres. Nous rappelons ici que notre objectif n'est pas d'optimiser les solutions étudiées mais de juger leurs performances bioclimatiques avec nos indicateurs.

Comparé à la non-protection, la protection par l'intérieur est une amélioration qui peut être mise en place à tout moment dans une habitation. Elle est facile et économique à mettre en place, et c'est là que réside son intérêt. De nos jours, il existe sur le marché différents types de rideaux dont les rideaux anti-chaueur avec des propriété à haute réflexion solaire utilisable en cas de protection interne aux vitrages.

#### 4.4.3. Isolation thermique des parois





À Djibouti, pour autant qu'il ait été possible de le constater, la composition de base des murs ne dispose d'aucune propriété d'isolation thermique. De façon générale, cette dernière est inexistante dans la plupart des pays au climat très chaud et s'il en existe, il est rare de voir des épaisseurs importantes d'isolation des murs. Ce constat ne peut que nous inviter à nous questionner sur l'influence de la résistance thermique de l'isolation et le réflexe de peuples au climats chaud de ne pas isoler à tous prix, comme le font souvent les habitants des climats froids.

### Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :

Le modèle de base ne présentant pas d'isolation, un modèle à forte isolation dont les parois sont isolées avec 20 cm de polystyrène extrudé (XPS) est étudié. La composition des parois externes pour ce modèle est illustrée dans la Figure 4.10 suivant.

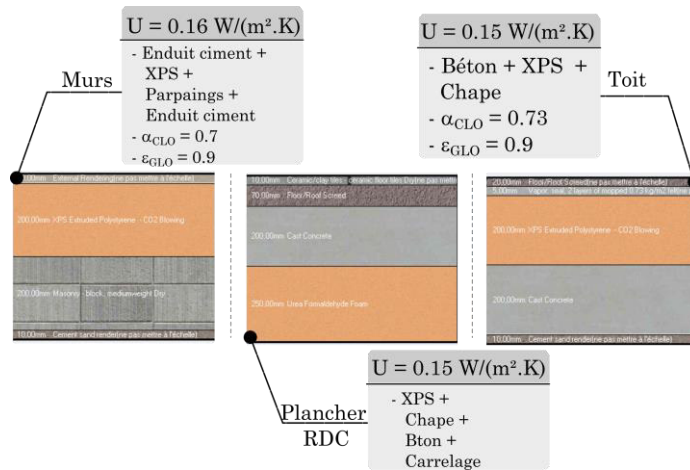


Fig. 4. 9. Coupes schématiques des compositions des parois extérieures du modèle.

### Discussion :

Discussion : La Figure 4.10 montre que l'ajout de l'isolation augmente l'antipotentiel exploité de la convection externe de 36 kWh/m<sup>2</sup>.an en comparaison avec la configuration initiale. En même temps, l'effet des antipotentiels exploités sur la surface externe de l'enveloppe isolée permet plus de convection avec l'air et plus de radiation vers la voute céleste ( $\sum_i \hat{Q}_i^{EXP}$  augmente de 173 kWh/m<sup>2</sup>.an). Ces deux effets se traduisent d'une part, par un taux d'ombrage systématiquement plus faible des antipotentiels incidents ( $\tau^{SHA} = 18,1 \%$ , soit 2% en moins par rapport au cas initial) et d'autre part, plus de taux de protection ( $\tau^{SHE} = 97,2 \%$ , soit 8 %

de plus que le cas de base). L'isolation a donc une incidence positive sur les indicateurs externes.

Le résultat le plus remarquable est l'impact de l'isolation sur les indicateurs internes de l'enveloppe du modèle. Son application diminue significativement la transmission de la chaleur vers l'intérieur de 144 kWh/m<sup>2</sup>.an par rapport à la configuration initiale. L'existence d'une isolation dans l'enveloppe produit donc à l'année une baisse de la consommation énergétique de moins de 135 kWh/m<sup>2</sup>, soit un peu moins que les 144 kWh/m<sup>2</sup>.an économisés à l'extérieur de l'enveloppe. Les 9 kWh/m<sup>2</sup>.an manquants compensent la réduction des potentiels exploités résiduels. Avec cette solution on parvient donc à atteindre des niveaux de performance presque trois fois mieux que la configuration de base.

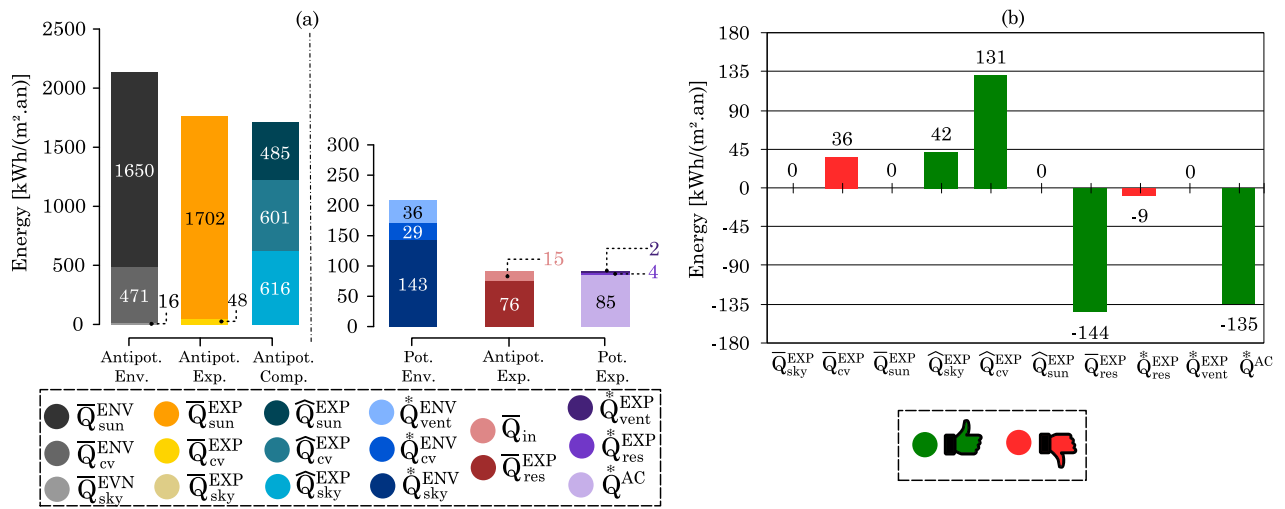


Fig. 4. 10. Analyse bioclimatique de l'isolation thermique : (a) – ERIs et BPIs annuels; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

La figure 4.10 montre aussi que la réduction des antipotentiel exploités résiduels du bâtiment initial permet également d'augmenter la marge bioclimatique par rapport aux potentiels de rafraichissement environnementaux. En effet, l'isolation permet d'augmenter la part des potentiels de rafraichissement disponibles pour couvrir les antipotentiel exploités résiduels. La différence entre les potentiels de rafraichissement non exploités et les antipotentiel exploités intérieurs du bâtiment isolé est plus importante que celle du bâtiment initial (+135 kWh/m<sup>2</sup>.an contre -12 kWh/m<sup>2</sup>.an pour la configuration initiale). Cependant, ces potentiels sont moins bien utilisés par le bâtiment isolé que par le bâtiment non-isolé. Paradoxalement et comme il a été prouvé dans le chapitre 3, il est clair que l'isolation, tout en augmentant la marge des potentiels de rafraichissement des ressources (surtout pour les

ressources ciel et convection externe), freine leur exploitation. Ainsi, la part non exploitée des potentiels de rafraîchissement environnementaux reste très supérieure aux besoins de climatisation. Les deux cas que nous avons étudiés dans cette partie sont néanmoins extrêmes.

L'analyse annuelle montre que ces potentiels de rafraîchissement sont encore mal exploités avec un taux d'exploitation des ressources ciel et convection externe de 2.3 %, soit 5 % de moins que la configuration initiale. Le bâtiment isolé ne profite pas des ressources disponibles pour rafraîchir l'intérieur. Toutefois, le taux de couverture des antipotentiel exploités résiduels pour ces deux ressources est mieux couvert en proportion avec une très légèrement augmentation (7.5% soit 1.1% de plus que le cas initial).

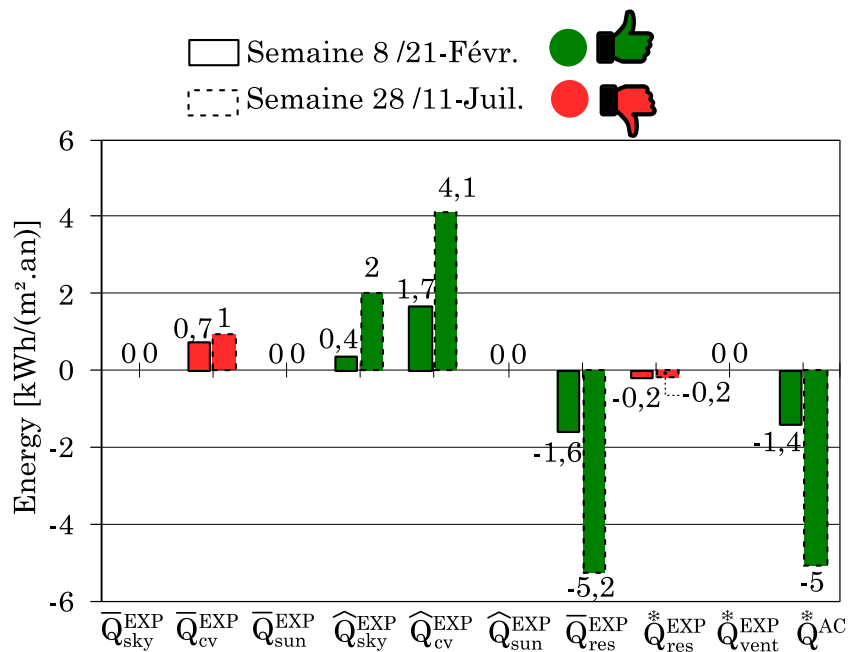


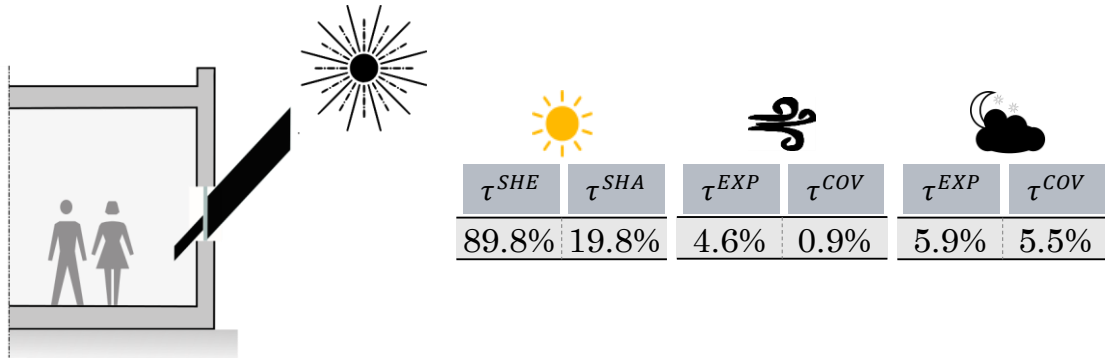
Fig. 4. 11. Comparaison de la variation des indicateurs pour la semaine type saison chaude et la semaine type saison fraîche.

Dans la figure 4.11, nous avons comparé la variation des BPIs et ERIs par rapport à la configuration de base pour deux semaines types (saison fraîche et saison chaude). On constate plus d'amplitude de variation en semaine chaude qu'en semaine fraîche. L'influence de l'isolation est plus accentuée en raison des antipotentiel exploités plus importants.

Cette analyse nous permet de visualiser la complémentarité entre l'approche bioclimatique et l'isolation. Et pourtant, nous avons

constaté, lors de quelques visites de chantiers et chez des marchands de matériaux, que le marché des matériaux d'isolation de l'enveloppe, à Djibouti est quasi inexistant.

#### 4.4.4. Performance des fenêtres



Les fenêtres apportent de l'énergie à l'intérieur d'un bâtiment par deux mécanismes : la conduction à travers la surface de la fenêtre (vitre et cadre) et la radiation du rayonnement solaire qui traverse la fenêtre. Le rôle de l'utilisation des fenêtres est double : d'une part la suppression des apports par conduction avec un coefficient de transmission thermique performant mais d'autre par la gestion des apports solaires par le facteur solaire du vitrage. La performance liée aux ouvertures dans un bâtiment bioclimatique est sujet très vaste en soi. Nous essayons juste de comprendre les comportements thermiques au travers nos indicateurs pour faciliter la prise de décision.

#### **Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Dans Design Builder, la variante initiale avec un simple vitrage est comparée avec un modèle de double vitrage peu émissif très performant (configuration 6/13/6) constitué de deux simples-vitrages séparés par de l'argon, un gaz faiblement conducteur. La vitre extérieure teintée et sa face interne revêtue d'une couche à faible émissivité ( $\epsilon = 0.1$ ) offre un système avec un coefficient de transmission thermique des vitres  $U_g = 1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , une transmission solaire  $\tau_{CLO} = 0.28$  et un facteur solaire  $G = 0.37$ .

#### **Discussion :**

Les fenêtres testées ont plus ou moins le même comportement que l'isolation. La diminution du coefficient de transmission de chaleur du vitrage en comparaison avec la variante simple vitrage implique

une légère augmentation des potentiels de compensation du ciel et de la convection externe (Figure 4.12).

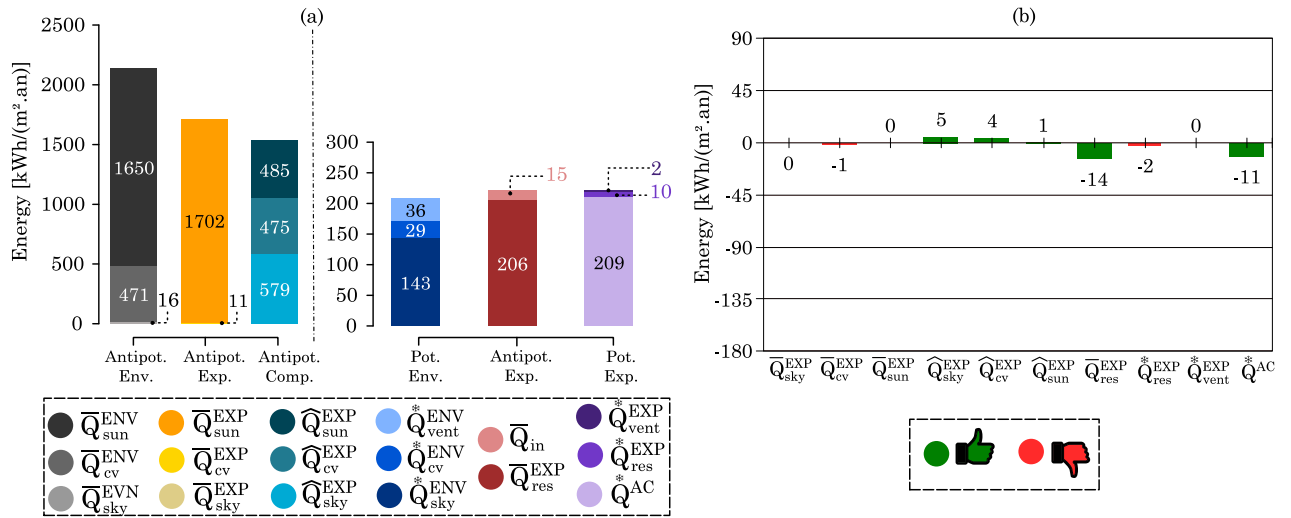


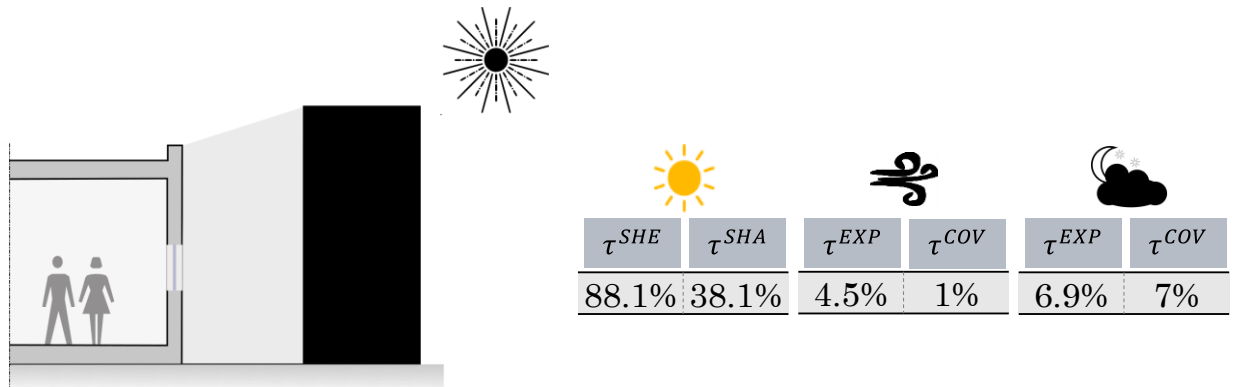
Fig. 4. 12 Analyse bioclimatique du double vitrage (a) – ERIs et BPIs annuels; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

Cette influence de la conduction plus la réduction du facteur G de 0,8 pour le modèle initial à 0,37 apporte une baisse annuelle des antipotentiel exploités résiduels de 14 kWh/m<sup>2</sup> ( $\bar{Q}_{res}^{EXP}$ ) par rapport à la configuration initiale. Cependant il faut être conscient qu’un G de 0,37 est déjà une performance en soi par rapport aux valeurs habituelles. Néanmoins cette performance est supérieure à celle de brise-soleils extérieurs (Figure 4. 6-b) mais son usage implique un choix architectural très marqué par un aspect extérieur des vitrages très obscurs.

Comme pour le cas d’isolation, le modèle utilisé a aussi une incidence négative sur l’exploitation de la ressource ciel et convection. Cette variation est tout de même très légère (moins de 2 kWh/m<sup>2</sup>.an de potentiels exploités résiduels, soit une baisse du taux d’exploitation de 1,4%). Il en résulte une réduction annuelle de 11 kWh/m<sup>2</sup> pour l’indicateur de besoin ( $\bar{Q}^{AC}$ ) par rapport à la variante de base.

L’augmentation de la performance des fenêtres améliore globalement la performance bioclimatique du bâtiment initiale et pourtant le choix du simple vitrage s’impose largement dans le pays. Ce dernier étant en plein essor constructif, les fournisseurs de menuiserie sont nombreux. Cependant, l’offre de menuiseries doubles ou bas facteur solaire semblent très limitée dans le marché local.

## 4.4.5. Masque solaire



Les masques solaires sont l'origine des ombres portées qui réduisent les apports solaires. Nous avons vu dans le chapitre 2 section 2.4.1 que ces effets d'ombrage des masques proches sur un bâtiment peuvent être positifs et offrir un effet de rafraîchissement en climat chaud. Il importe d'étudier leur influence sur la performance bioclimatique du bâtiment.

**Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Le bâtiment est construit dans un secteur résidentiel sont regroupés sous forme de compound. Chaque compound comprend plusieurs immeubles formant un rectangle et à l'intérieur de chaque compound est prévue une cour comme illustré sur la Figure 4.13. Dans design Builder, des blocs composants sont utilisés pour ajouter les effets de réflexion et d'ombrage d'éléments des bâtiments voisins.

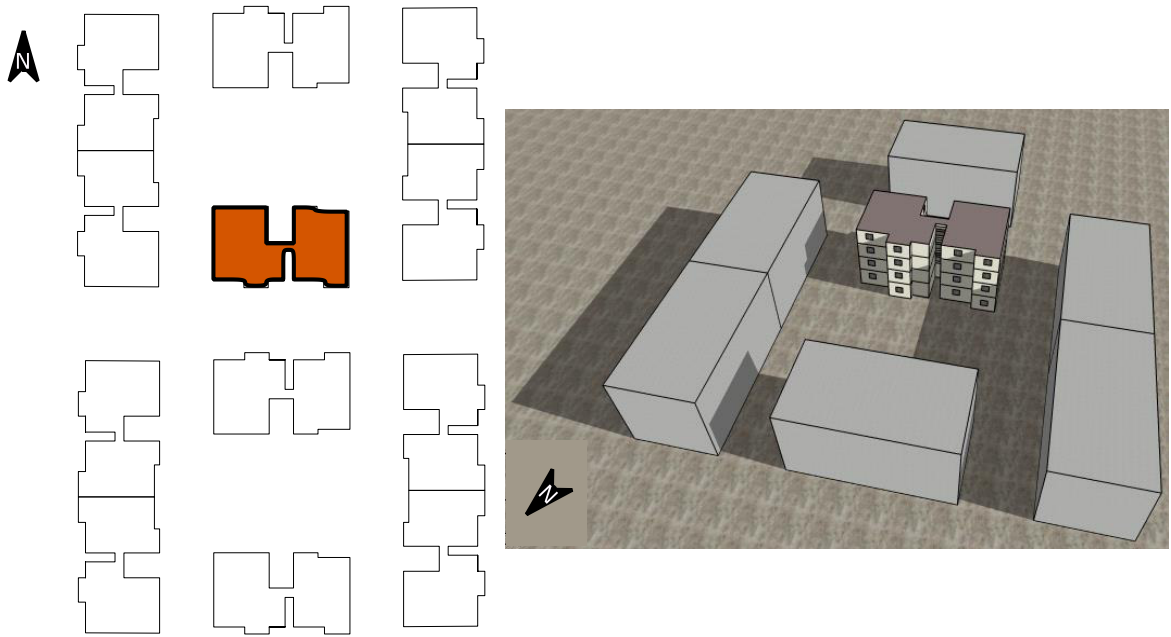


Fig. 4. 13. Masques proches.

**Discussion :**

Les résultats montrent que la présence des immeubles voisins implique une réduction drastique de l'antipotentiel solaire  $\bar{Q}_{sun}^{EXP}$ . L'antipotentiel exploité solaire passe de 1702 kWh/m<sup>2</sup>.an pour l'immeuble tout seul à 1309 kWh/m<sup>2</sup>.an avec les masques proches, doit une baisse annuelle qui représente 393 kWh/m<sup>2</sup>.

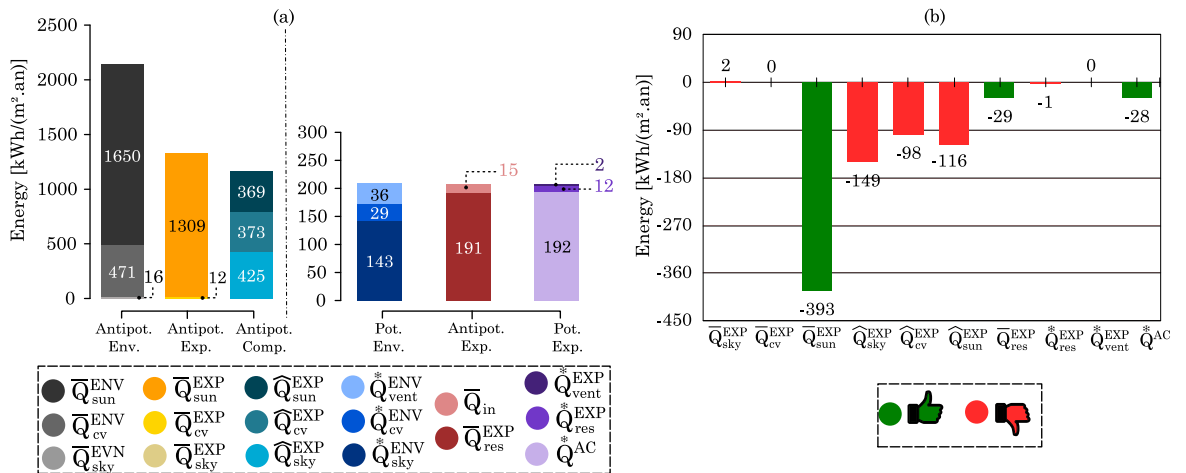


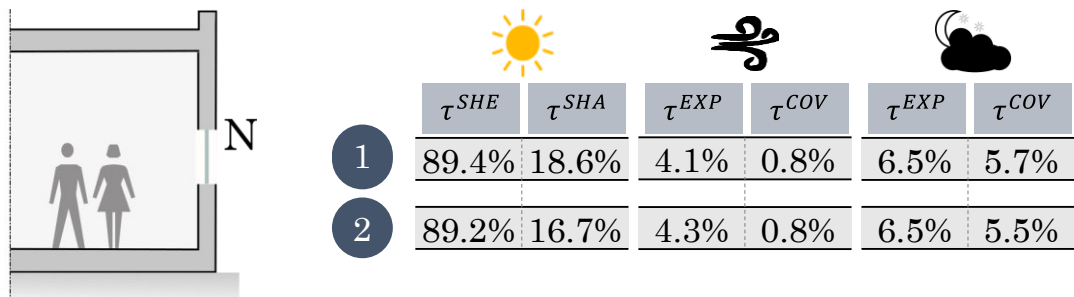
Fig. 4. 14. Analyse bioclimatique des masques solaires (a) – ERIs et BPIs annuels; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

Cela se traduit par un meilleur taux d'ombrage en comparaison de la configuration initiale ( $\tau^{SHA} = 38.1\%$  pour le bâtiment avec les masques, soit 18.3% de plus que la variante de base).

Une conséquence négative de cet effet d'ombrage est une baisse annuelle des potentiels de compensation ( $\sum_i \hat{Q}_i^{EXP}$ ) de 363 kWh/m<sup>2</sup> par rapport à la configuration de base. Ce constat commun à toutes les solutions de protection solaire, atténue considérablement les bénéfices de l'ombrage. L'effet est proportionnel à la réduction des apports solaires incidents que la solution permet.

Néanmoins, ces masques ont une incidence plutôt positive à l'intérieur du bâtiment et permettent de réduire de 28 kWh/m<sup>2</sup> l'indicateur de besoins de climatisation,  $Q^{AC}$ .

#### 4.4.6. Orientation



L'analyse de la partie climat a montré que toutes les façades du bâtiment reçoivent du rayonnement solaire direct avec des proportions différentes (30% de l'irradiation incident pour le N-S combiné et 37% pour E-O). En conception bioclimatique le choix de l'orientation N-S des façades vitrées du bâtiment semble faire l'unanimité pour réduire les apports solaires en climat chaud. Nous souhaitons vérifier si une orientation parfaitement N-S est la plus efficace grâce à nos indicateurs.

#### Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :

Pour voir l'incidence de l'orientation du bâtiment, nous ne pouvons pas utiliser la configuration initiale car elle possède des ouvertures sur toutes les façades. Il est plutôt préférable d'étudier un modèle avec une grande sensibilité sur la façade Nord. Ainsi, cette variante sera modélisée avec Design Builder, à partir du modèle de base modifié avec 100% de fenêtres en façade Nord, ce qui présente une orientation N-S idéale. Puis, ce modèle subit une rotation dans



le sens horaire (façade Nord vers l'Est) de 22,5° (NNE) et puis 45° (NE). Ces valeurs sont totalement arbitraires mais elles servent à évaluer l'intérêt de l'orientation du bâtiment. Les performances bioclimatiques des trois orientations (100% N ; 100%NNE et maison 100%NE) sont calculées et comparées.

**Discussion :**

Les résultats confirment que l'orientation N-S est la plus efficace. Un écart de 22.5 ° vers l'est, implique une augmentation annuelle de 23 kWh/m<sup>2</sup> des antipotentiels solaires exploités et un écart de 45° vert l'est une augmentation de 66 kWh/m<sup>2</sup>.an (Figure 4.16). Les façades vitrées N permettent de maîtriser facilement les apports solaires en climat chaud.

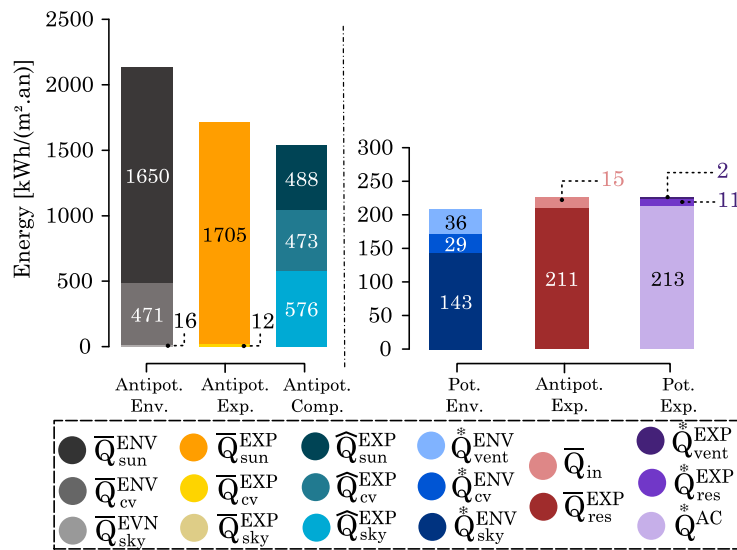


Fig. 4. 15. ERIs et BPIs annuels du modèle 100% N.

En revanche les façades Est et Ouest sont très défavorables par l'intensité du soleil incident mais aussi par la surface exposée plus grande ( $\tau^{SHA} = 16.7\%$ , soit 3% moins que le modèle 100% N). Aussi de la même manière que toutes les solutions de protection solaire, l'orientation E-O améliore les potentiels de compensation par rapport à l'orientation N-S. Cela limite finalement la forte hausse des apports solaire mais ne compense pas totalement les apports. Il en résulte des besoins de rafraîchissement plus élevés au fur et à mesure que les surfaces exposées croissent ( +13 kWh.m<sup>2</sup>.an pour orientation E et plus si S).

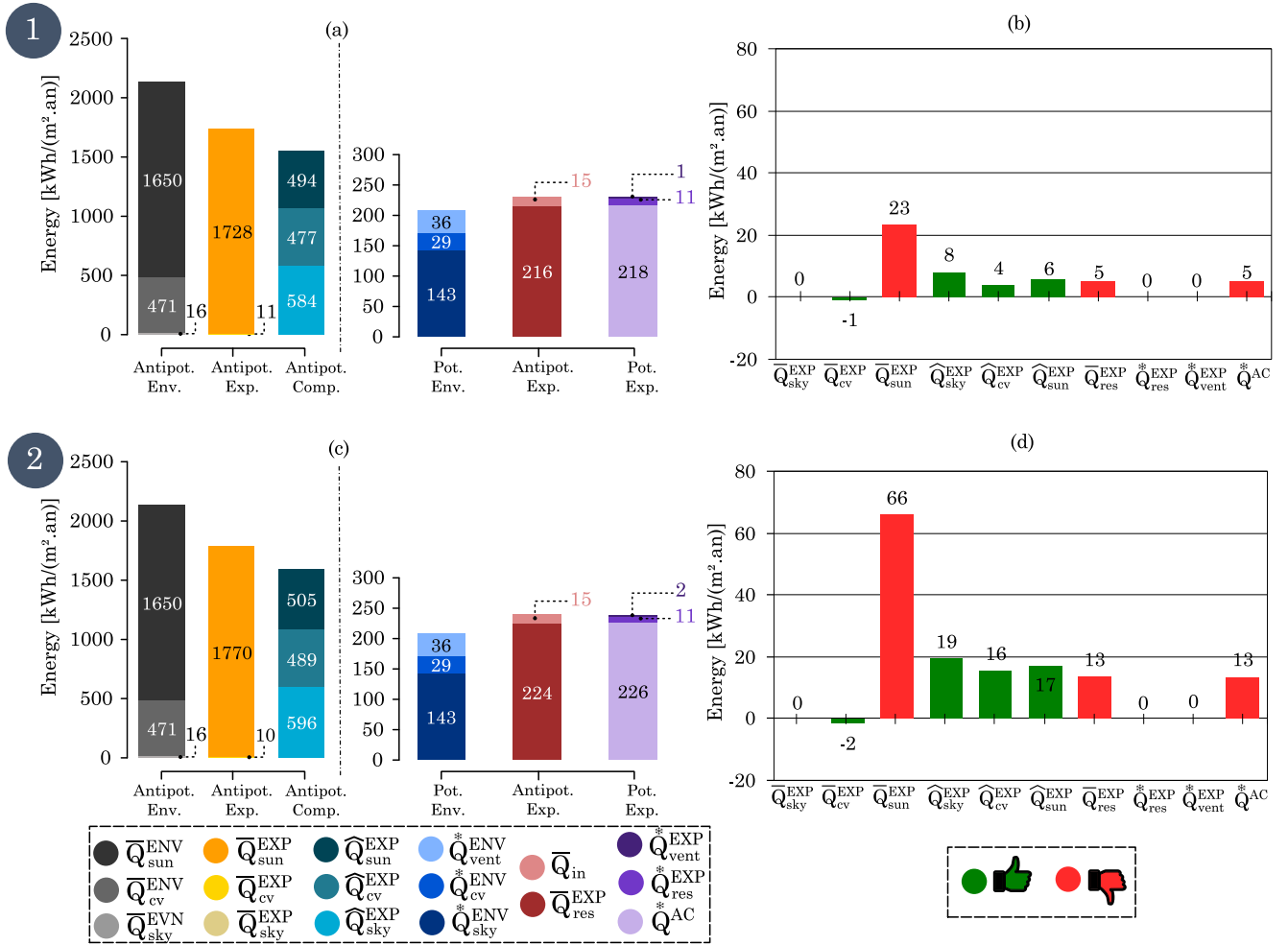
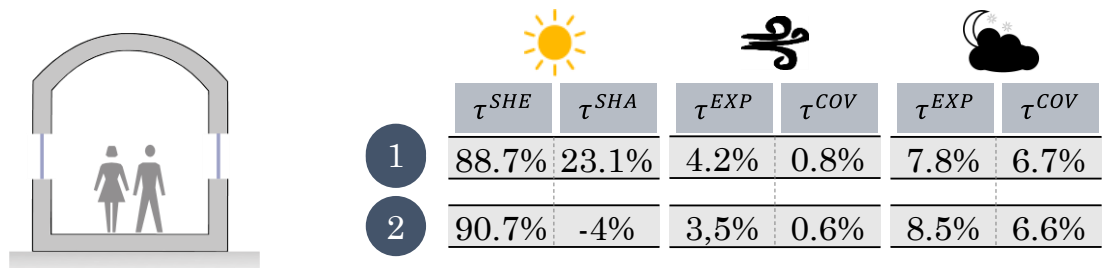


Fig. 4. 16. Analyse bioclimatique des orientations (a) et (c) – ERI et BPIs annuels; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

Ces écarts témoignent aussi de la fonction exercée par les surfaces vitrées : véritables capteurs de chaleur, elles sont responsables en grande partie des apports de chaleur vers l'intérieur ( $\overline{Q}_{res}^{EXP}$ ) si elles sont mal orientées.

#### 4.4.7. Compacité



La compacité est souvent mise en avant comme une qualité de la conception bioclimatique. La capacité d'héberger la même surface habitable avec moins de surface exposée à l'extérieur présente de facto des économies d'énergie proportionnelles à la réduction de surfaces extérieures. Il paraît, dès lors nécessaire d'apporter plus de précisions indispensables pour enrichir ce dogme.

### Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :

Dans Design Builder deux configurations sont modélisées pour jouer sur la compacité du bâtiment initial. La première configuration de forme rectangulaire possède moins 16 % de surfaces extérieures et une meilleure compacité. Dans la deuxième configuration, la variante de base R+3 a été décomposé en deux blocs de construction R+1 côte à côte en rangée (Figure 4.17) présentant plus de facteur de compacité avec 20 % de surfaces extérieures supplémentaires.

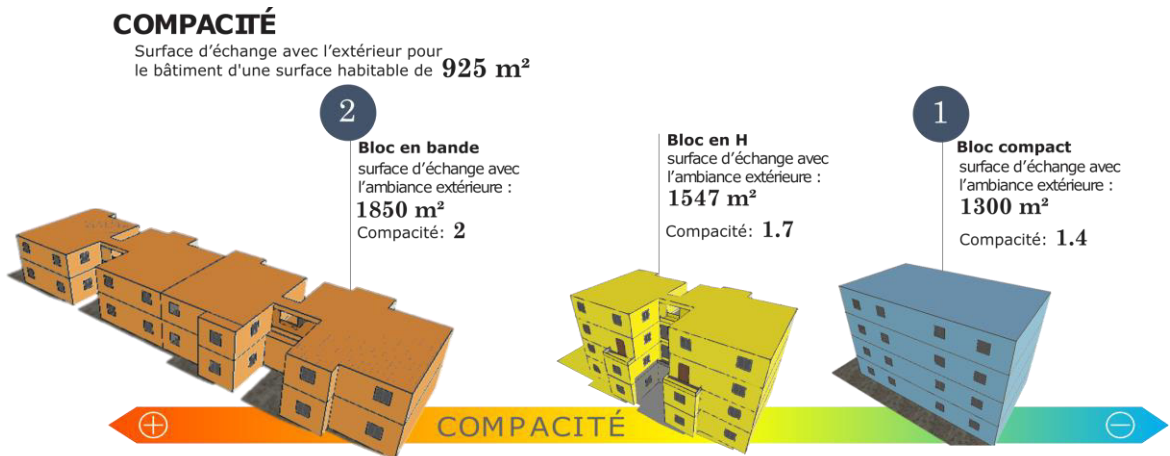


Fig. 4. 17. Compacité de deux modèles de calcul utilisés dans Design Builder.

### Discussion :

Les résultats des graphiques de la Figure 4. 18 sont très parlants, beaucoup plus pour les indicateurs de performance extérieurs qu'intérieurs. Nous constatons qu'à surface habitable identique, l'augmentation de la surface globale de toutes les parois extérieures provoque effectivement plus d'antipotentiels exploités solaires.  $\bar{Q}_{\text{sun}}^{\text{EXP}}$  passe de 1702 kWh/m<sup>2</sup>.an pour la variante initiale à 2211 kWh/m<sup>2</sup>.an, provoquant un  $\tau^{\text{SHA}}$  négatif de - 4%. Par corollaire, la configuration 1 (meilleure compacité) baisse significativement ces antipotentiels par rapport à la variante initiale.  $\bar{Q}_{\text{sun}}^{\text{EXP}}$  passe de

1702 kWh/m<sup>2</sup>.an à 1633 kWh/m<sup>2</sup>.an, soit une hausse du taux d'ombrage de 3.3 % par rapport à la configuration initiale. Cependant, plus le facteur de compacité du bâtiment est grand, plus son développement de façades extérieures est important par rapport à un bâtiment qui tend vers le VHPB, et plus ses potentiels de compensations des antipotentiel exploités sont d'autant plus importants. En effet, le modèle 1 avec un taux de protection  $\tau^{SHE}$  de 88.7 % permet une baisse annuelle des potentiels de compensation combinés ( $\sum_i \hat{Q}_i^{EXP}$ ) de 71 kWh/m<sup>2</sup> alors que le modèle 2 augmente ces potentiels de 486 kWh/m<sup>2</sup>, améliorant ainsi le  $\tau^{SHE}$  de 1.5 % par rapport à la configuration initiale.

Il existe donc deux exigences paradoxales en matière de performance bioclimatique de la compacité:

- réduire l'enveloppe du bâtiment afin de réduire les apports solaires incidents
- augmenter l'enveloppe du bâtiment afin de favoriser la compensation des antipotentiel exploités.

Ce paradoxe morphologique énergétique est lié au fait que ces deux fonctions sont assurées par une seule et même surface.

Par ailleurs, le comportement annuel du bâtiment à Djibouti invite à ne pas utiliser une conception à fort facteur de compacité, avec une hausse des antipotentiel exploités résiduels de 18 kWh/m<sup>2</sup> et donc de la consommation énergétique annuelle de 16 kWh/m<sup>2</sup> par rapport à la configuration initiale. Néanmoins, l'augmentation de la surface extérieure et notamment les toitures supplémentaires sur le modèle en rangée permet d'exploiter légèrement plus de potentiels de rafraîchissement ciel et convection ( $\tau_{res}^{EXP}$  est amélioré de 1.5 % par rapport à la base).

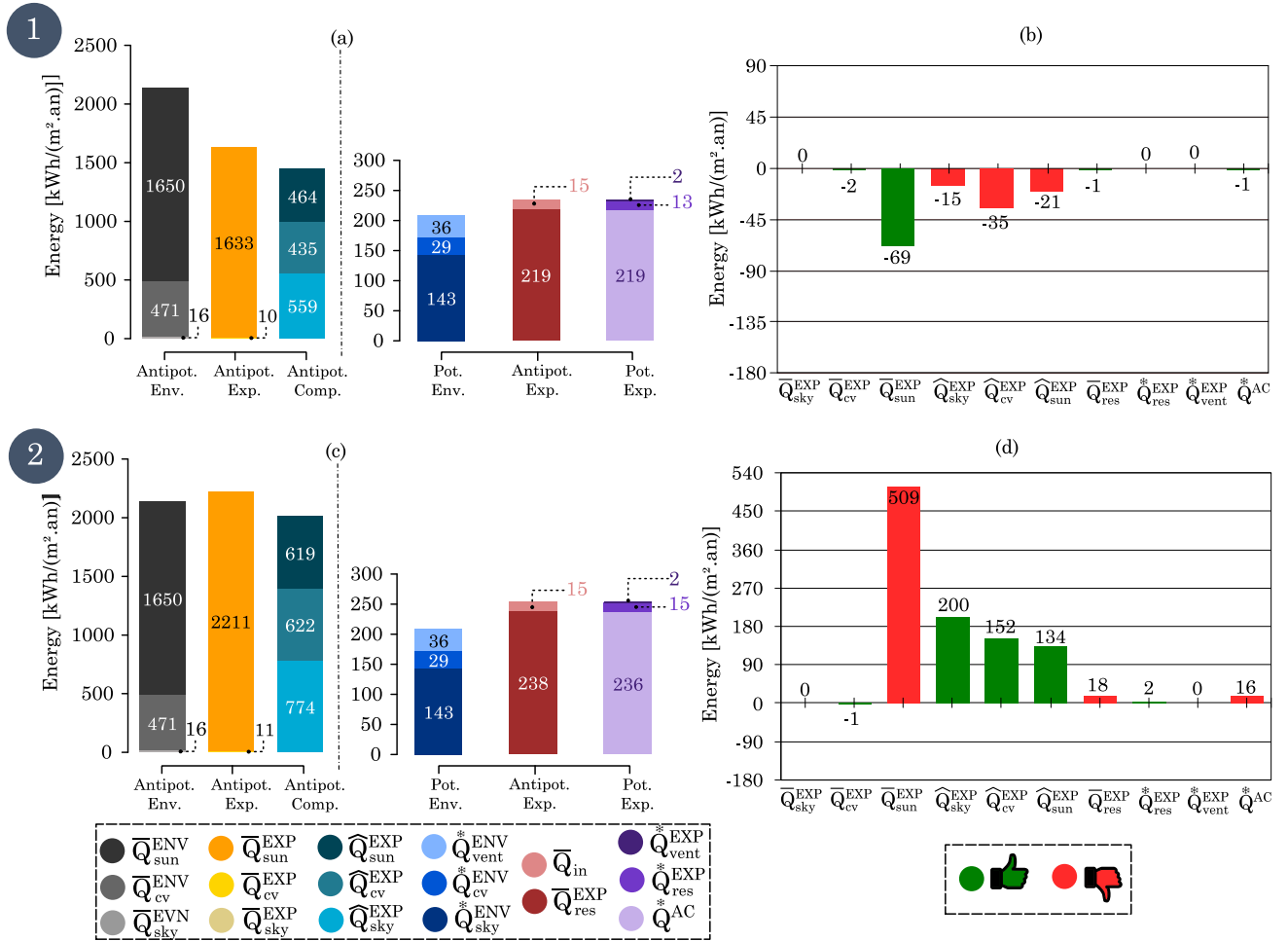
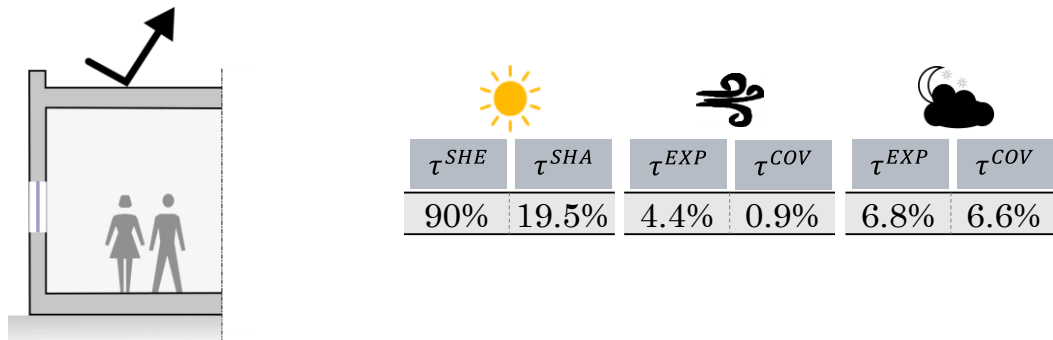


Fig. 4. 18. Analyse bioclimatique de la compacité (a) et (c) – ERIs et BPIs annuels; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

En revanche, le modèle à faible facteur de compacité ne montre pas d'incidence particulière sur les indicateurs intérieurs. Cela est dû en grande partie au paradoxe de la surface. L'analyse de la compacité ci-dessus indique qu'une meilleure compacité n'implique pas forcément des économies d'énergie importantes. Ce qui est vrai en climat froid ne l'est plus pour des constructions en climat très chaud. De telles constatations doivent obligatoirement remettre en cause les acquis parce que l'erreur de raisonnement vient, en grande partie, du fait que l'approche de la plupart des concepteurs n'est pas basée sur des connaissances techniques récentes et réelles, mais uniquement sur le sentiment que l'on a de la réalité obérée par la mauvaise qualité thermique de nos constructions habituelles.

## 4.4.8. Cool roof : toitures à haute réflexion solaire



La nature des revêtements des parois, par leur capacité à réfléchir la radiation solaire pourraient avoir une incidence sur la performance du bâtiment. Parmi les façades de l'enveloppe du bâtiment qui sont en contact avec l'environnement extérieur, nous avons vu dans le premier chapitre section 1.4 que la toiture était la partie la plus vulnérable en raison de son exposition au rayonnement solaire (33% des apports solaires annuels d'un bâtiment arrivent sur le toit). L'utilisation des toitures réfléchissantes est souvent vu comme une solution pour éviter ces apports solaires.

**Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Pour modéliser ce phénomène, un revêtement caractérisé par une haute réflectivité solaire ( $\rho_{CLO} = 0.7$ ) et une haute émissivité thermique ( $\varepsilon_{CLO} = 0.9$ ) est appliqué sur le toit du bâtiment initial. L'impact combiné des caractéristiques de réflexion et d'émissivité donne un indice de réflectance solaire élevé (IRS = 86%).

**Discussion :**

L'objectif était ici de diminuer les apports solaires, et les graphiques de la Figure 4.19 indiquent effectivement que l'utilisation de la toiture fraîche baisse de 262 kWh/m<sup>2</sup>.an l'antipotentiel exploité solaire  $\hat{Q}_{sun}^{EXP}$ , qui passe de 485 kWh/m<sup>2</sup>.an pour la configuration initiale à 756 kWh/m<sup>2</sup>.an pour le modèle étudié.

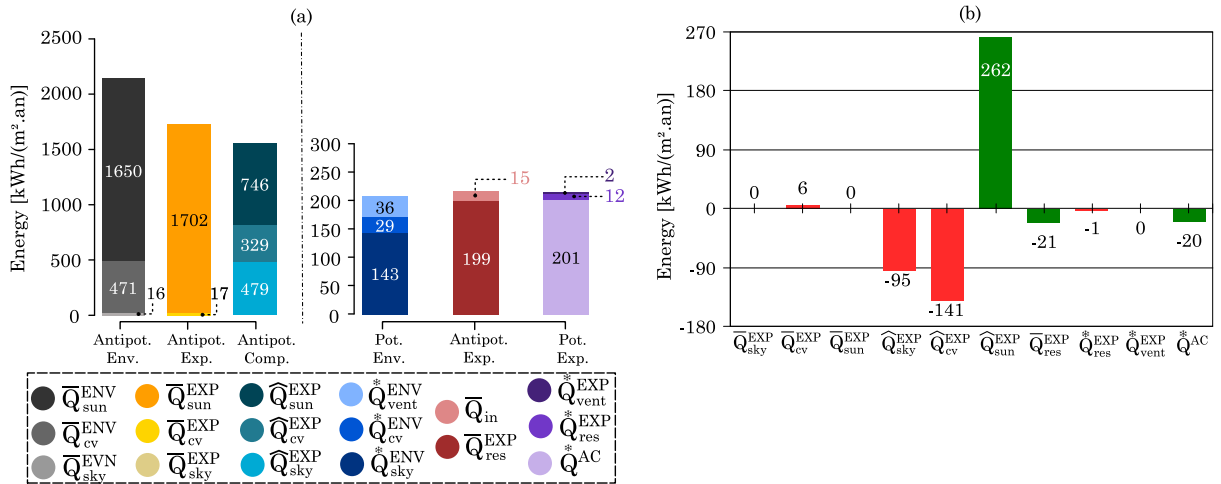


Fig. 4. 19. Analyse bioclimatique du cool roof (a) – ERI et BPI annuels ; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

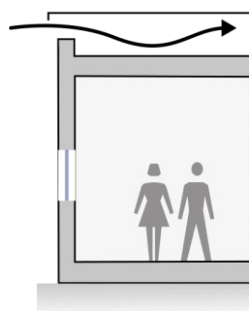
Cependant, un autre processus se mêle à ce phénomène et limite son impact positif sur l'enveloppe. En effet, l'indice IRS élevé, fait des cool roofs des couvertures caractérisées par une faible température de surface. La surface absorbe moins de solaire incident et reste donc plus fraîche. Cette réduction de température du toit du bâtiment entraîne une réduction annuelle des potentiels de compensation  $\hat{Q}_{sky}^{EXP}$  et  $\hat{Q}_{cv}^{EXP}$  de 236 kWh/m<sup>2</sup>.

Globalement, le bilan le bilan plutôt positif se traduit par un taux de protection de  $\tau^{SHE} = 90.4\%$  soit une amélioration de 1.2% en comparaison de la variante de base.

Il en résulte moins de flux de chaleur vers l'intérieur du bâtiment ( $\hat{Q}_{sun}^{EXP}$  baisse de 21 kWh/m<sup>2</sup>.an en comparaison au bâtiment initial) synonyme d'économies d'énergie liée à la climatisation (moins 20 kWh/m<sup>2</sup>.an par rapport à la configuration initiale).

Par conséquent, les revêtements à haute réflexion/émissivité pour la toiture, en particulier et sur les autres façades, en général, constituent globalement une amélioration de la performance du bâtiment en climats chauds. Toutefois, leur durée dans le temps n'est pas garantie (ils deviennent sales et sombres en raison de la poussière, ce qui réduit leurs propriétés réfléchissantes) et il est recommandé de les entretenir régulièrement pour conserver leur efficacité.

#### 4.4.9. Toiture double peau ventilée



☀		✂		☁	
$\tau^{SHE}$	$\tau^{SHA}$	$\tau^{EXP}$	$\tau^{COV}$	$\tau^{EXP}$	$\tau^{COV}$
85.9%	47.0%	4.4%	0.9%	7.1%	7.1%

En plus de la solution non-architecturale qui consiste à appliquer une barrière anti-rayonnements il existe une autre méthode architecturale pour gérer les apports solaires incidents sur le toit. Bloquer ce rayonnement solaire du toit peut se révéler globalement intéressant pour éviter le réchauffement de la surface extérieure qui après par conduction viendra réchauffer l'intérieur du bâtiment. La toiture rapportée avec une lame d'air ventilée à l'intérieur permet de produire cette action.

#### **Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Dans Design Builder, nous avons créé une typologie de toit en rajoutant un écran en tôle galvanisée à 50 cm de la toiture-terrasse du bâtiment initial.

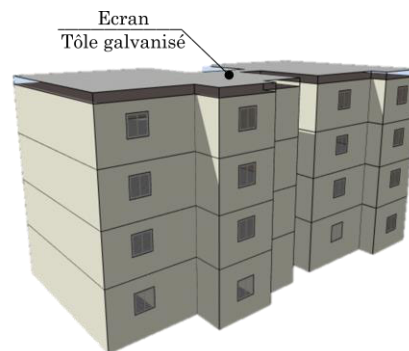


Fig. 4. 20. Sur-toiture ventilée, la tôle galvanisée est en dehors de l'enveloppe de bilan thermique.

#### **Discussion :**

Comme dans le cas des actions précédentes concernant la protection solaire, les résultats de la Figure 4.21 indiquent que la mise en place d'une toiture double peau ventilée permet une réduction annuelle considérable des apports solaires incidents de 587 kWh/m<sup>2</sup> par rapport à la configuration initiale. De toutes les solutions testées, la toiture double peau détient le meilleur taux d'ombrage avec un  $\tau^{SHA}$  de 47% soit 27% de plus que le cas de base.



Malgré cette amélioration, la solution est préjudiciable aux potentiels de compensation. Avec une baisse annuelle de 557 kWh/m<sup>2</sup>, la solution présente le plus faible taux de protection de toutes les solutions ( $\tau^{SHE} = 86\%$  soit moins de 3,3% que le cas initial).

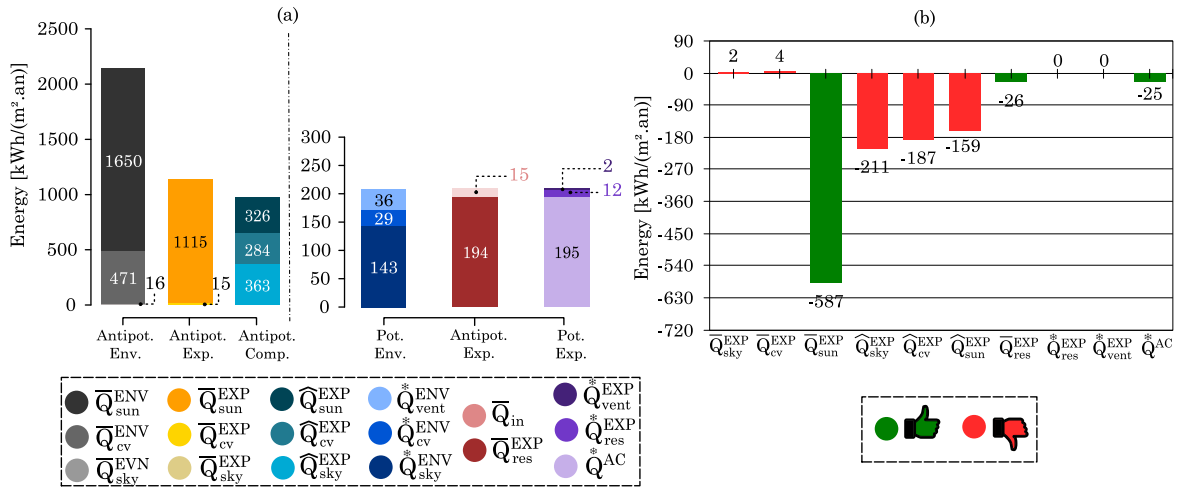
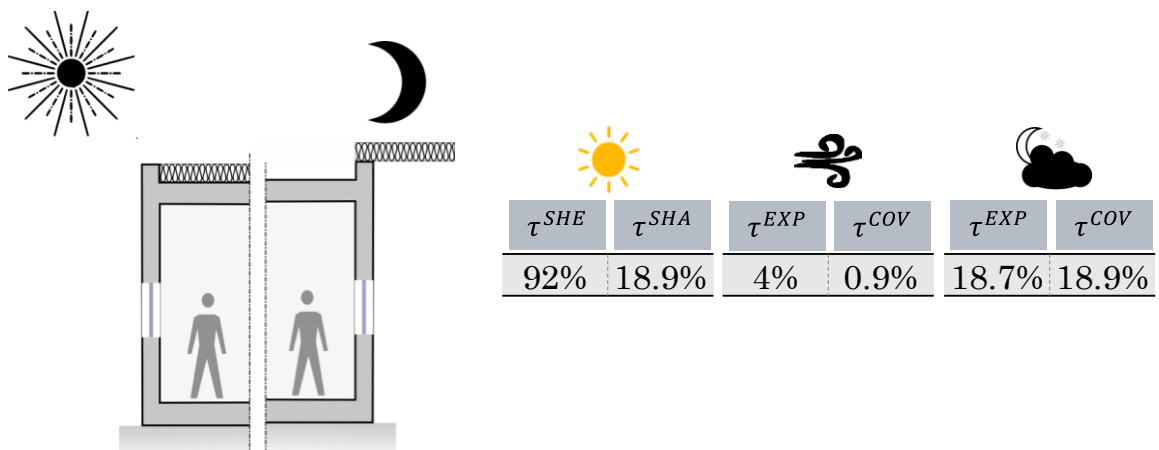


Fig. 4. 21. Analyse bioclimatique de la toiture ventilée (a) – ERIs et BPIs annuels ; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

Enfin, l'intérêt de ce dispositif se trouve dans le bilan intérieur en minimisant la transmission de la chaleur vers l'intérieur. Il en résulte une économie des besoins de climatisation de 25 kWh/m<sup>2</sup>.an en comparaison de la configuration initiale. Cependant cette amélioration de la performance bioclimatique est dérisoire par rapport à la baisse des antipotentils exploités extérieurs que la solution permet.

#### 4.4.10. Isolation dynamique



Dans le chapitre 3, nous avons découvert que les enveloppes qui exploitaient au mieux la ressource ciel transmettaient également plus d'antipotentiels vers l'intérieur du bâtiment. Nous voulons ici tester la solution de la toiture avec une isolation amovible afin de maximiser à la fois l'exploitation du rafraîchissement radiatif et la réduction des apports de chaleur.

**Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Pour cela, le toit en béton de la configuration est remplacé par un modèle de toit en plaque métallique qui sert de radiateur nocturne la nuit surmontée de 20 cm de polystyrène extrudé amovible qui protège le toit la journée.

**Discussion :**

Pendant la journée, l'isolant la toiture améliore les potentiels de compensation des antipotentils exploités.  $\hat{Q}_{sky}^{EXP}$  et  $\hat{Q}_{cv}^{EXP}$  augmente 67 kWh/m<sup>2</sup>.an soit un taux de protection  $\tau^{SHE}$  supérieur de 3% en comparaison de la configuration initiale. Cela minimise les apports de chaleur par rayonnement solaire et par convection avec l'air.

Tandis que pendant la nuit, la toiture reste exposée à la fois aux échanges radiatifs nocturnes vers le ciel et aux échanges convectifs avec l'air extérieur. Le modèle exploite mieux les potentiels de rafraîchissement du ciel et de la convection.

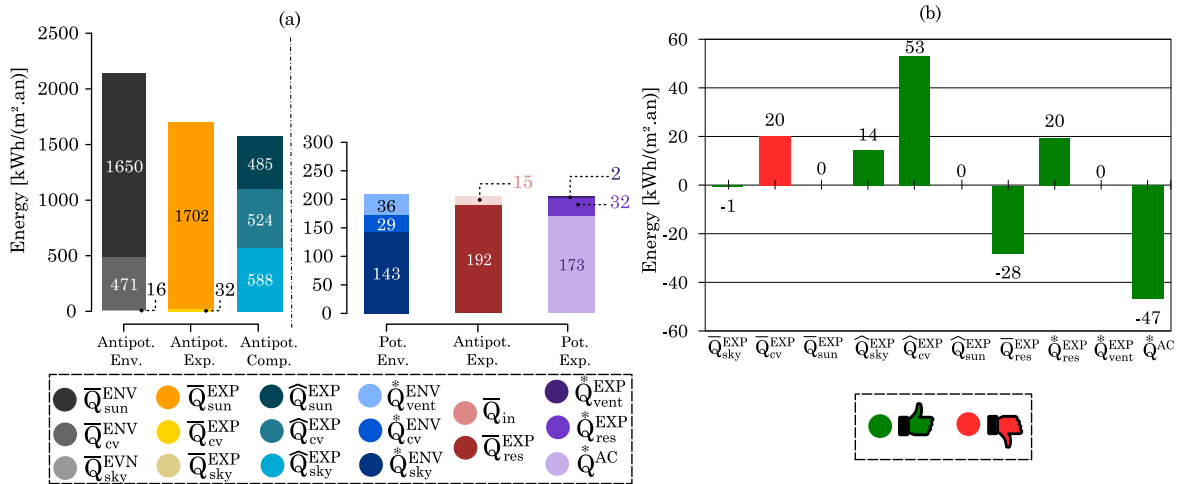


Fig. 4. 22. Analyse bioclimatique de l'isolation amovible (a) – ERIs et BPIs annuels ; (b) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

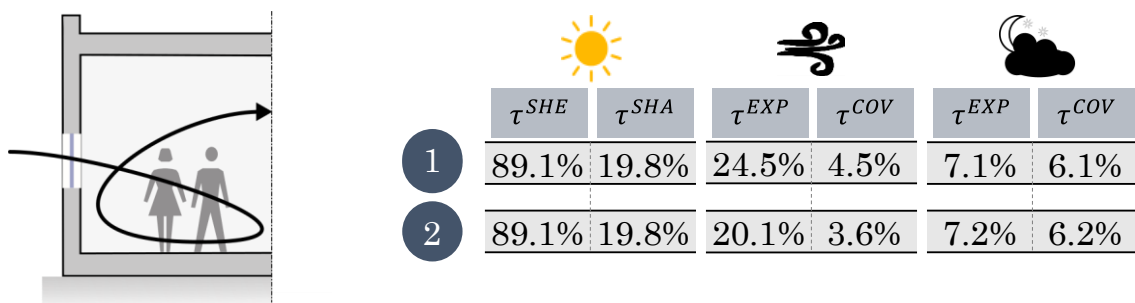
Il en résulte un taux d'exploitation pour ces ressources des 18.7 % soit 11.4 % de plus par rapport à la variante de base. Ainsi plus

d'exploitation de potentiels et moins d'antipotentiel exploités résiduels (-28kWh/m<sup>2</sup>.an) font que le taux de couverture du ciel et de la convection sont améliorés de 12.5%.

Le seul indicateur rouge pour cette solution est l'antipotentiel exploité de la convection externe. En effet, le rafraîchissement radiatif baisse la température du toit en dessous de la température l'air ambiante et fait de la ressource air un antipotentiel.

In fine, cette solution à une incidence positive sur la performance globale du bâtiment et permet d'économiser 47 kWh/m<sup>2</sup>.an.

#### 4.4.11. Ventilation naturelle



L'existence d'un potentiel de rafraîchissement de la ventilation en climat chaud montre qu'un bâtiment pourraient profiter de cette ressource dans les heures fraîches de la nuit ou du petit matin pour rafraîchir l'intérieur avant que les heures chaudes n'arrivent. De nos jours, la ventilation naturelle peut être contrôlée dans les constructions modernes. Ainsi, nous pouvons créer de la sur-ventilation nocturne, ou de la sur-ventilation toute la journée en fonction des températures extérieures. Par la suite, l'influence du recours à une ventilation naturelle sur la performance thermique de notre modèle est analysée.

#### **Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Deux modèles ont été simulés dans Design Builder, le modèle de base avec infiltration et ventilation contrôlée toute la journée en fonction de la température extérieure. Des fenêtres à coulissement horizontal avec un coefficient de perméabilité de 45 % de la surface de l'ouverture sont modélisés dans le scénario de ventilation. Un deuxième modèle avec ventilation nocturne contrôlée entre 20h et 6h est aussi testé. Ce mode contrôlé correspond à une approche hybride de conditionnement de l'intérieur qui intègre l'utilisation

de l'air conditionné, complété par la ventilation naturelle lorsque les conditions le permettent.

**Discussion :**

Les résultats de la Figure 4.23 montrent plus d'exploitation de la ressource ventilation par rapport à la variante de base (variation de 7 kWh/m<sup>2</sup>.an dont plus de deux tiers ont lieu la nuit).

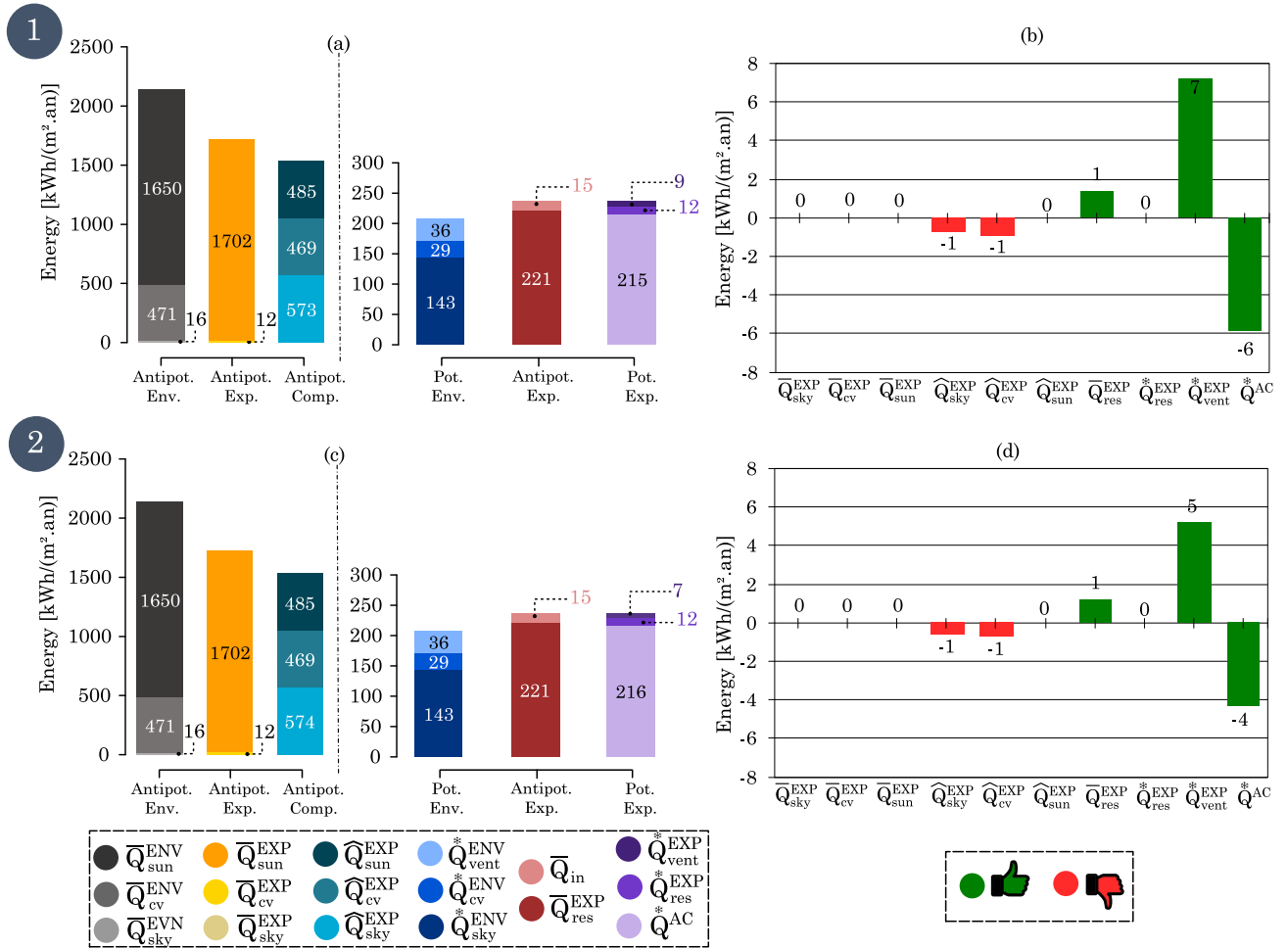
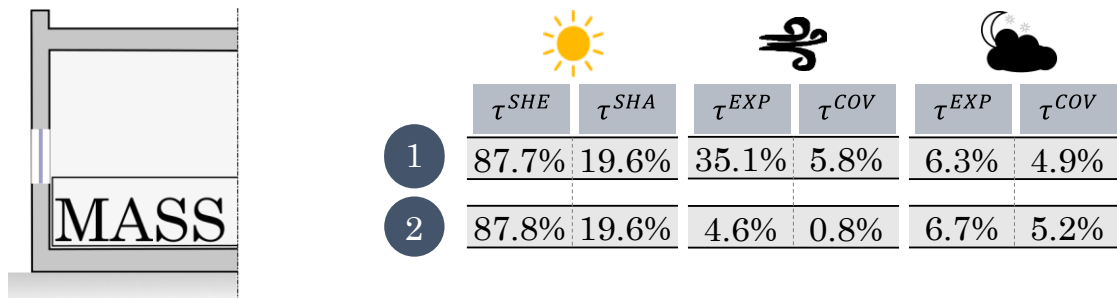


Fig. 4. 23. Analyse bioclimatique de la ventilation naturelle (a) et (c) – ERI et BPIs annuels ; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

Il en résulte une amélioration du taux d'exploitation de la ressource vent de 20 % pour la ventilation toute la journée et de 15% pour la ventilation nocturne en comparaison de la configuration initiale. Ces potentiels exploités supplémentaires couvrent un peu plus les antipotentiel exploités du modèle. L'existence d'une ventilation naturelle contrôlée couvre 4,5% des Q<sub>res</sub><sup>EXP</sup> pour le modèle 1 et 3,6% des Q<sub>res</sub><sup>EXP</sup> pour le modèle 2 soit respectivement 3,6% et 2,8%

de plus que le cas initial. Par conséquent le gain de performance n'est que très légèrement supérieur à la configuration de base. La forte perméabilité à l'air du bâtiment initial résultant de l'inefficacité manifeste de tout type de construction en termes d'étanchéité à l'air à Djibouti réduit les écarts avec les modèles à ventilation naturelle renforcée.

#### 4.4.12. Augmentation de la masse thermique



La question de l'influence de la masse thermique d'un bâtiment en climat chaud est récurrente. Cette question est d'autant plus intéressante que la plus grande part des bâtiments à Djibouti, en particulier, et dans ce climat, en général, sont considérés comme étant des constructions à forte inertie thermique. Nous allons analyser son effet avec nos indicateurs.

#### **Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Pour simuler une augmentation de la masse thermique dans un cas purement théorique, nous avons augmenté dans Design Builder la capacité de stockage du bâtiment de 50 et la surface de contact thermique de 200 m<sup>2</sup> par étage (modèle 1). Le but est de voir comment réagit le bâtiment lorsque nous allons vers les extrêmes. Nous avons également modélisé un cas de bâtiment avec une forte inertie et une ventilation naturelle contrôlée toute la journée (modèle 2).

#### **Discussion :**

Tous les voyants sont au rouge. Pour un climat comme celui de Djibouti, qui combine toute l'année un climat chaud, l'incidence de la masse thermique semble avoir une influence négative sur l'ensemble des indicateurs bioclimatiques extérieurs et intérieurs. La capacité de la masse thermique à atténuer et retarder les antipodentaux exploités externes compromet les potentiels de compensations de convection et du ciel. Il en résulte pour les deux cas moins

de taux de protection des antipotentiel par rapport à la configuration initiale. La masse thermique toute seule n'est guère une solution bioclimatique sous un tel climat. Au contraire, elle favorise l'exploitation des antipotentiel  $\bar{Q}_{res}^{EXP}$  et augmente la consommation énergétique des modèles. L'effet positif sur l'exploitation du vent du modèle 2 (amélioration du  $\tau_{vent}^{EXP}$  de 10 % par rapport au cas de la ventilation naturelle seule et 31% par rapport au cas initial) n'est pas suffisante pour couvrir les antipotentiel exploités.

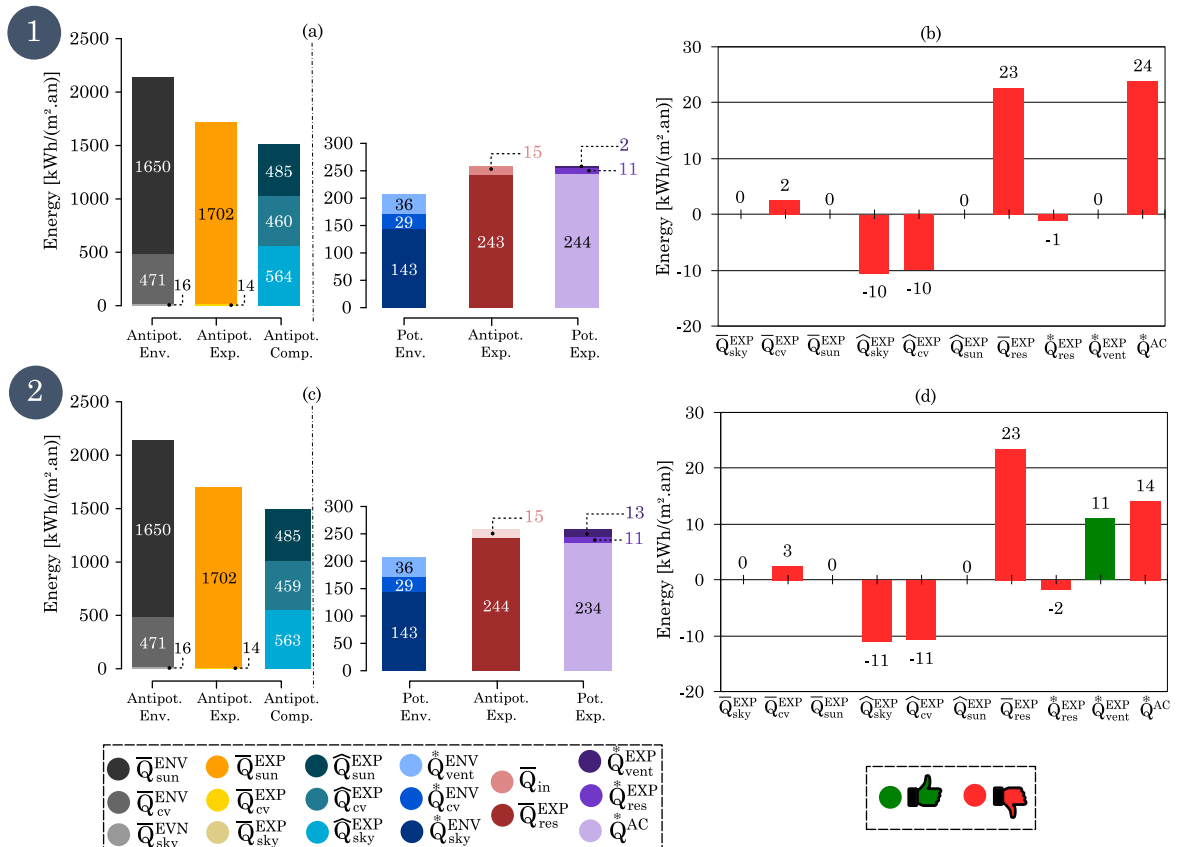
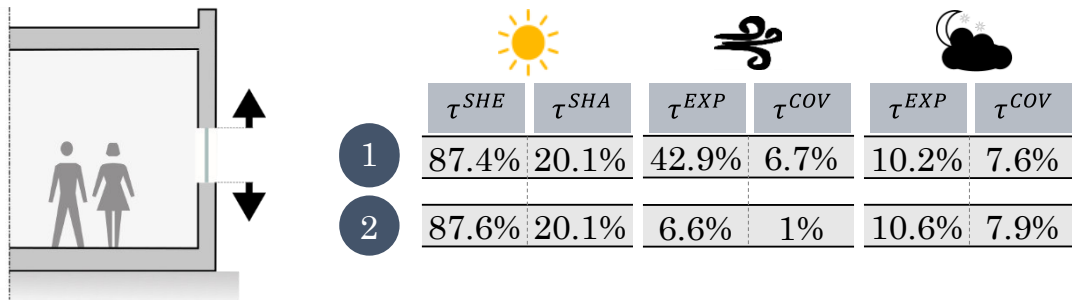


Fig. 4. 24. Analyse bioclimatique de l'isolation dynamique (a) et (c) – ERI et BPIs annuels ; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

Ainsi plus la masse thermique est importante, plus grand est l'indicateur des besoins. Et pourtant la culture constructive à Djibouti fait que l'inertie thermique est une caractéristique intrinsèque à toute construction locale de nos jours.

## 4.4.13. Augmentation de WWR



Dans le contexte où toutes les surfaces du bâtiment sont susceptibles d'être ensoleillées, les ouvertures vitrées créent la journée un apport radiatif direct dans un bâtiment. Le ratio surface vitrée/surface total des murs des façades a une grande influence sur ces apports et sur la consommation énergétique du bâtiment. Cette section songe à évaluer l'incidence d'une augmentation de ce ratio.

#### **Description de la solution et modèle de calcul DesignBuilder/EnergyPlus :**

Avec Design Builder, le ratio surface vitrée/surface total des murs du modèle initial a été mis à 10% au lieu de 7% (modèle 2). Une autre variante avec ventilation naturelle contrôlée (modèle 1) est modélisée pour juger l'utilité de l'augmentation du ratio au regard du potentiel de la ventilation.

#### **Discussion :**

La réduction des ouvertures apporte un effet négatif sur les besoins de climatisation, beaucoup plus quand le bâtiment ne bénéficie pas d'une ventilation naturelle. L'indicateur de besoins augmente de 25 kWh/m<sup>2</sup> et de 35 kWh/m<sup>2</sup> pour les modèles 1 et 2 respectivement.

Le modèle 1 exploite, certes plus de potentiels de rafraîchissement de la ventilation ( $\tau_{vent}^{EXP} = 43\%$  soit une amélioration de 38% par rapport à la configuration initiale) qui compense une petite partie des antipotentiel résiduels, mais le résultat final montre que la protection solaire prime sur la ventilation naturelle dans un climat chaud et humide. L'augmentation des surfaces vitrées favorise aussi légèrement l'exploitation des potentiels de rafraîchissement résiduels.

Cette technique est toutefois simple à mettre en œuvre et implique d'autres avantages que sur le plan énergétique. Elle permet plus de vue vers l'extérieur et plus de lumière naturelle à l'intérieur.

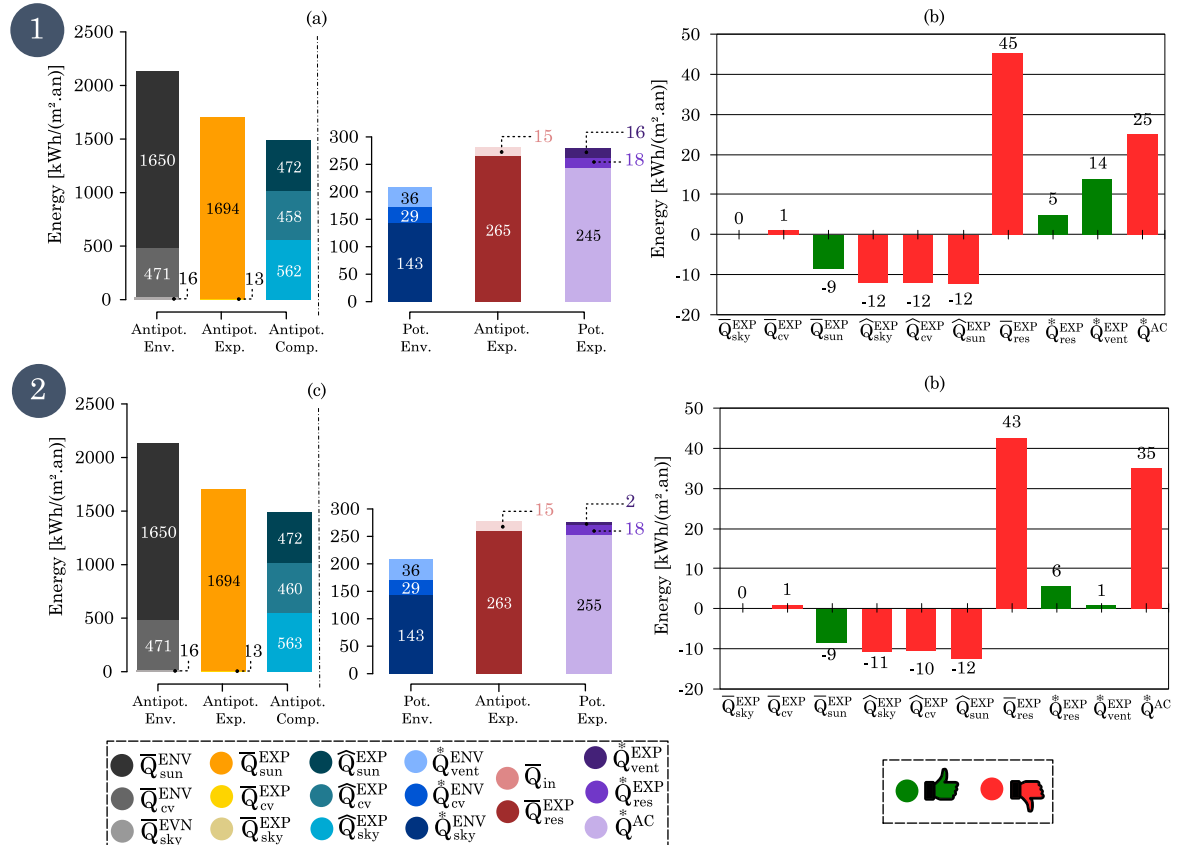


Fig. 4. 25. Analyse bioclimatique de l'augmentation du WWR (a) et (c) – ERIs et BPIs annuels ; (b) et (d) – Variation des indicateurs par rapport à la configuration de base.

## 4.5. Synthèse

Le tableau 4.3 ci-dessous montre le récapitulatif des résultats des analyses précédentes. Les comportements particulièrement positifs sont repérés en vert, et ceux particulièrement négatifs, en rouge. Comme prévu, on constate que les solutions testées permettent bien de diminuer l'indicateur des besoins de climatisation dans tous les cas à l'exception de l'orientation autre que le nord, l'augmentation de l'inertie thermique, l'augmentation du ratio WWR et la forte compacité. Ces techniques doivent être évitées si le critère de sélection est  $Q^{*AC}$ . La technique la plus efficace de ce point de vue est l'isolation thermique externe qui permet de réduire les besoins de plus de 60%. Tous les indicateurs sont au vert pour cette solution. Cependant, cette solution réduit d'avantage le potentiel de rafraîchissement exploités résiduels déjà sous exploités par le bâtiment initial.



En fait, pour la majeure partie des solutions testées, l'économie obtenue sur l'indicateur des besoins n'est pas principalement due à une meilleure exploitation des potentiels de rafraîchissement, mais à une réduction du  $\overline{Q}_{res}^{EXP}$ , résultant de la protection de l'enveloppe, après modification, contre les antipotentielles externes.

Par ailleurs, pour la première fois, nous avons mis en évidence deux exigences paradoxales en matière de performance bioclimatique:

- Protection de l'enveloppe du bâtiment afin de réduire les apports solaires incidents.
- Ou augmentation de l'enveloppe du bâtiment exposée à l'extérieur afin de favoriser la compensation des antipotentielles exploités.

$\overline{Q}_{res}^{EXP}$  est donc le résultat du bilan de ces deux actions qui s'opposent. Toutes les solutions minimisant les antipotentielles  $\sum_i \overline{Q}_i^{EXP}$  minimisent aussi les potentiels compensés  $\sum_i \hat{Q}_i^{EXP}$ . L'exemple parfait de ce paradoxe est la TDPV qui semble à priori une solution efficace par les antipotentielles qu'elle permet de protéger par rapport à la configuration initiale. Mais en réalité nous avons vu qu'elle ne permet que 10 % d'économie des besoins de climatisation. Son grand potentiel d'ombrage est contrebalancé par son faible potentiel de compensation.

L'évolution des indicateurs de performance relatifs montre que dans tous les cas, le taux d'exploitation des ressources de rafraîchissement sont faibles sauf pour les quelques solutions réputées en terme d'exploitation des ressources de rafraîchissement (ID, VN, VNN, MTV et WWRV), ce qui confirme l'utilité de ces actions quant au critère classique d'amélioration des  $\sum_i \hat{Q}_i^{EXP}$ .

En revanche l'efficacité de ces techniques en terme de couverture des antipotentielles résiduels n'est pas évidente : le tableau 4.3 montre que la progression du taux de couverture est assez faible. Dans tous les cas, elle se situe largement en deçà d'une progression idéale qui permettrait de s'approcher des taux de couverture de 100% car les  $\overline{Q}_{res}^{EXP}$  sont très grands.

Ces résultats permettent de montrer, une fois encore, l'intérêt d'une analyse sur des solutions architecturales et non architecturale d'enveloppe à l'aide des indicateurs développés. Si la plupart des techniques testées sont efficaces du point de vue du critère classique (à savoir qu'elles permettent de diminuer les besoins de climatisation), l'analyse des indicateurs de performance montre qu'il reste des progrès à faire en termes de protection et de compensation des antipotentielles externes, en terme d'amélioration de

la marge bioclimatique ou d'exploitation des potentiels de rafraîchissement. En effet, dans la plupart des cas, l'augmentation du taux d'exploitation n'est vraiment pas significative et ne permet pas de diminuer suffisamment l'indicateur de besoins de rafraîchissement pour approcher des taux de couverture de 100%.

Tableau 4. 2. Synthèse des solutions testées

PVE - C	Protection du Vitrage Externe – Casquette
PVE - BS	Protection du Vitrage Externe – Brise-Soleil
PVE - E	Protection du Vitrage Externe – Encadrement
PVI	Protection du Vitrage Interne
ITE	Isolation Thermique Externe
PF	Performance des Fenêtres
MS	Masque Solaire
O-N	Orientation – 100%N
O-NNE	Orientation – 100%NNE
O-NE	Orientation – 100%NE
C+	Compacité – coefficient de compacité grand
C-	Compacité – coefficient de compacité faible
CR	Cool Roof
TDPV	Toiture Double Peau Ventilée
ID	Isolation Dynamique
VN	Ventilation Naturelle
VNN	Ventilation Naturelle Nocturne
MT	augmentation de la Masse Thermique
MTV	augmentation de la Masse Thermique + Ventilation
WWWR	Augmentation de WWR
WWRV	Augmentation de WWR + Ventilation

BPI	$\sum_i \bar{Q}_i^{EXP}$		$\sum_i \hat{Q}_i^{EXP}$		$\bar{Q}_{res}^{EXP}$		$Q^{AC}$		$Q_{res}^{EXP}$		$Q_{vent}^{EXP}$		Marge Bio.		$\tau^{SHE}$		$\tau^{SHA}$		$\tau^{EXP}$		$\tau^{COV}$	
	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.
PVE - C	1703	-12	1522	-7	215	-5	216	-5	12	-1	2	0	-20	6	89,4%	0,2%	20,3%	0,6%	11,4%	-0,4%	6,3%	-0,2%
PVE - BS	1653	-62	1480	-49	205	-15	207	-13	11	-2	2	0	-9	17	89,6%	0,4%	22,7%	2,9%	10,9%	-1,0%	6,1%	-0,3%
PVE - E	1673	-42	1497	-32	209	-11	211	-10	11	-1	2	0	-14	12	89,5%	0,3%	21,7%	2,0%	11,1%	-0,7%	6,2%	-0,3%
PVI	1715	0	1539	10	209	-12	210	-10	11	-1	2	0	-13	13	89,8%	0,6%	19,8%	0,0%	11,2%	-0,7%	6,2%	-0,3%
ITE	1703	-11	1702	173	76	-144	85	-135	4	-9	2	0	127	153	99,9%	10,8%	20,3%	0,5%	6,7%	-5,2%	7,3%	0,8%
PF	1714	-1	1539	10	206	-14	209	-11	10	-2	2	0	-10	16	89,8%	0,7%	19,8%	0,0%	10,5%	-1,4%	5,7%	-0,8%
MS	1324	-391	1166	-363	191	-29	192	-28	12	-1	2	0	4	30	88,1%	-1,1%	38,1%	18,3%	11,4%	-0,5%	7,0%	0,6%
O-N	1717	-	1537	-	211	-	213	-	11	-	2	-	-15	-	89,5%	-	19,7%	-	10,8%	-	6,1%	-
O-NNE	1740	22	1555	18	216	5	218	5	11	0	1	0	-20	-5	89,4%	-0,1%	18,6%	-1,1%	10,6%	-0,3%	5,9%	-0,3%
O-NE	1781	64	1589	52	224	13	226	13	11	0	2	0	-29	-13	89,2%	-0,3%	16,7%	-3,0%	10,8%	0,0%	5,7%	-0,4%
C -	1643	-71	1458	-71	220	0	220	-1	13	1	2	0	-26	0	88,7%	-0,4%	23,1%	3,3%	11,9%	0,1%	6,8%	0,3%
C +	2222	508	2015	486	238	18	236	16	15	2	1	0	-45	-19	90,7%	1,5%	-4,0%	-23,7%	12,0%	0,1%	6,7%	0,2%
CR	1721	6	1555	26	199	-21	201	-20	12	-1	2	0	-4	22	90,4%	1,2%	19,5%	-0,3%	11,2%	-0,7%	6,7%	0,2%
TDPV	1133	-582	972	-556	194	-26	195	-25	12	0	2	0	0	26	85,9%	-3,3%	47,0%	27,2%	11,5%	-0,4%	7,1%	0,7%
ID	1734	20	1596	67	192	-28	173	-47	32	20	1	0	-17	9	92,0%	2,9%	18,9%	-0,9%	22,7%	10,8%	17,6%	11,1%
NV	1715	0	1527	-2	221	1	215	-6	12	0	9	7	-34	-8	89,1%	-0,1%	19,8%	0,0%	31,6%	19,7%	9,5%	3,0%
NNV	1715	0	1528	-1	221	1	216	-4	12	0	7	6	-33	-7	89,1%	-0,1%	19,8%	0,0%	27,3%	15,4%	8,9%	2,4%
MT	1718	3	1509	-20	243	23	244	24	11	-1	2	0	-47	-21	87,8%	-1,3%	19,6%	-0,1%	11,2%	-0,6%	5,4%	-1,1%
MTV	1718	3	1507	-22	244	23	234	14	11	-2	13	11	-59	-33	87,7%	-1,4%	19,6%	-0,1%	41,4%	29%	9,7%	3,2%
WWWR	1707	-8	1496	-33	263	43	255	35	18	6	2	1	-75	-49	87,6%	-1,6%	20,1%	0,4%	17,2%	5,3%	7,8%	1,4%
WWRV	1707	-7	1493	-36	265	45	245	25	18	5	16	14	-90	-64	87,4%	-1,7%	20,1%	0,3%	53,1%	41,2%	12,5%	6,0%

1

Tableau 4. 3 . Synthèse des résultats de l'analyse.

## 5. Conclusion générale et perspectives

---

*« Le danger qui menace les chercheurs aujourd'hui serait de conclure qu'il n'y a plus rien à découvrir. »*

Pierre Joliot-Curie

Cette thèse s'inscrit au cœur des préoccupations actuelles sur la nécessité de réduire les consommations énergétiques des bâtiments en climat chaud pour contribuer à la réalisation d'une architecture bioclimatique. La pratique de ce dernier, soucieuse d'environnement et d'énergie, semble de plus en plus primordiale dans le contexte énergétique des pays au climat chaud en général et à Djibouti en particulier. En effet, bien qu'il n'y ait pas eu de trace d'architecture traditionnelle qui aurait pu fournir des bases pour une architecture bioclimatique, un regard sur les typologies de construction à Djibouti a mis en exergue ses différentes mutations. D'une architecture en étroite relation avec le climat du fait de la faiblesse technologique et des facteurs culturels, la conception actuelle des bâtiments est basée sur des techniques et spécifications provenant d'autres contextes climatiques (pays développés). Cet état de fait offre un potentiel pour les démarches de conception bioclimatique.

D'un autre côté, l'analyse des atouts et des contraintes du climat met en évidence les temporalités des ressources énergétiques environnementales. Les phénomènes physiques mis en jeu et l'état des connaissances sur la caractérisation de chaque ressource ont été présentés pour le cas de Djibouti. La combinaison de températures moyennes élevées, une faible amplitude jour/nuit, une forte humidité relative et surtout un rayonnement solaire incident important pose des problèmes très difficiles aux concepteurs. En effet, l'objectif ultime d'une démarche bioclimatique est d'obtenir un bâtiment entièrement passif, qui assure les conditions de confort intérieur sans système mécanique ou thermique. Cependant, dans le contexte climatique de cette étude (chaud et humide), cet objectif est rarement atteignable. En conséquence, les bâtiments doivent être refroidis de façon mécanique pratiquement toute l'année. Par ailleurs, les incohérences dans la conception des bâtiments contemporains face à ce climat extrême fait de la consommation d'énergie liée à la climatisation le facteur majeur.

Néanmoins, l'existence d'une période de l'année propice à l'utilisation de propriété rafraîchissante naturelle des ressources environnementales (saison fraîche) pourrait servir de levier pour infléchir la tendance haussière de la consommation d'énergie liée à la climatisation.

Ce constat a notamment permis de poser les bases d'une nouvelle approche de conception bioclimatique, prenant en compte les apports gratuits de l'environnement pour couvrir le besoin énergétique des bâtiments. En effet, lorsque l'on s'intéresse aux ressources environnementales d'un site de construction, on constate que leur potentiel énergétique est traditionnellement évalué indépendamment des besoins énergétiques des bâtiments. De même, les économies d'énergie que les techniques bioclimatiques permettent ne sont jamais mises en perspective avec le gisement qu'elles sont censées exploiter. Cette voie de recherche n'a jamais été véritablement développée dans le contexte climatique chaud et humide.

L'objectif principal de cette thèse a donc consisté à proposer des nouveaux critères d'analyse qui permette de quantifier les potentiels énergétiques d'un site et les performances bioclimatiques de solutions constructives au regard de ces potentiels.

Après tout ce temps passé à profiler des indicateurs simples et parlants, ce double objectif a été atteint grâce à la définition de deux ensembles d'indicateurs bioclimatiques basée sur des données faciles d'accès. Un premier jeu d'indicateurs a permis de caractériser le climat du site du projet en quantifiant les potentiels et antipotentielles environnementaux exploitables. La deuxième famille d'indicateurs évalue les performances d'une solution de conception via la quantification des ressources exploitées (ou les sources de chaleur protégées).

Il a alors été question d'appliquer l'ensemble d'indicateurs à quatre éléments environnementaux (le soleil, le ciel et la convection externe et la ventilation) pour interroger leur pertinence et leur capacité de faciliter l'approche de conception bioclimatique.

Bien que nous ayant pris plaisir à découvrir différents indicateurs utilisés pour la conception bioclimatique, nos indicateurs sont originaux et sont adaptés aux bâtiments climatisés dans les climats

chauds et humides. Ils peuvent facilement s'adapter à tout type de climat chaud.

La première originalité est l'exhaustivité de l'ensemble des indicateurs. Nous avons défini des indicateurs pour les deux principales étapes d'un processus de conception bioclimatique :

- la quantification des ressources environnementales sur le site de construction
- et l'évaluation de la conception des bâtiments.

Les indicateurs couvrent l'ensemble des ressources bioclimatiques dans notre contexte climatique. À la connaissance de l'auteur, il n'existe pas d'ensemble aussi complet d'indicateurs bioclimatiques, à l'exception des indicateurs définis par Chesné et al (Chesné et al., 2012) , qui ne sont applicables que pour la saison froide en climat modéré.

La deuxième originalité est la définition du VHPB qui est utilisé pour quantifier les ressources environnementales. Notre objectif était de quantifier ces ressources sans avoir d'a priori sur la conception du futur bâtiment.

Avec notre approche, nous pensons avoir fournir une approche plus générique pour estimer la fraîcheur maximale qui pourrait être exploitée à partir des ressources environnementales.

La troisième originalité est la définition des indicateurs d'exploitation. Ces indicateurs fournissent, sur un seul graphique, un aperçu complet des échanges de chaleur entre le bâtiment et son environnement. Ce n'est qu'avec cette vue d'ensemble que nous pouvons évaluer la capacité du bâtiment à protéger en même temps l'environnement intérieur des antipotentiels extérieurs et à être perméable pour la fraîcheur extérieure.

La quatrième originalité est le contexte de notre étude : des bâtiments climatisés dans des climats chauds et humides. Le fait que les bâtiments soient climatisés a clairement facilité la définition des indicateurs, car notre problème est purement énergétique. Il n'est pas nécessaire de prendre en compte le confort.

Enfin, les indicateurs ont également permis d'évaluer des solutions d'enveloppe réputées bioclimatiques. Les résultats ont montré l'intérêt et la pertinence de nos critère d'analyse sur ces solutions d'enveloppe. Cependant, Il reste du progrès à faire en terme

d'amélioration de l'exploitation des ressources (surtout radiative et convective) par l'enveloppe des bâtiments.

En outre, étant donné que la motivation derrière l'élaboration de ces indicateurs était d'évaluer la possibilité d'exploiter les ressources bioclimatiques dans un climat chaud et humide, le sol n'était pas considéré comme une ressource potentielle en raison de sa température élevée. Pour différents emplacements, il serait utile d'étendre nos indicateurs pour considérer cette ressource mais aussi l'eau de mer.

Par ailleurs, notre démarche ouvre d'autres voies de recherche que nous souhaitons explorer par la suite. Le fait de faire varier les paramètres un par un dans le chapitre 4 ne permet pas de profiter des éventuelles interactions favorables, ou défavorables. Une Étude paramétrique combiner plusieurs solutions où les paramètres seraient les solutions étudiées mais avec une optimisation de chaque solution en s'appuyant sur les indicateurs (maximiser les potentiels et minimiser les antipotentils) serait est, à notre avis, intéressant à explorer.

Si nous arrivons à consolider certains résultats et étendre l'analyse des solutions bioclimatiques possibles pour le climat chaud, il semble intéressant à l'auteur de proposer un ouvrage écrit sous forme de guide pour l'aide à la conception en climat chaud. L'objectif serait de vulgariser et rendre lisibles l'approche bioclimatique en climat chaud.

Le travail de cette thèse pourrait aussi se poursuivre et à terme proposer un logiciel capable de trouver la liste des solutions compatibles avec le climat, les classer par groupes, lancer les simulation DB/E+ pour les solutions, calculés les indicateurs, les visualiser et optimiser une ou plusieurs solutions pour proposer un projet optimal.

# Bibliographie

- Ajibola, K., 1997. Ventilation of spaces in a warm, humid climate—Case study of some housing types. *Renewable Energy* 10, 61–70. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00128-X](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00128-X)
- Al-Ajmi, F., Loveday, D.L., Hanby, V.I., 2006. The cooling potential of earth–air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate. *Building and Environment* 41, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.027>
- Al-Azri, N.A., 2016. Development of a typical meteorological year based on dry bulb temperature and dew point for passive cooling applications. *Energy for Sustainable Development* 33, 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.05.001>
- Algarni, S., 2015. Modeling Radiation Heat Transfer for Building’s Cooling and Heating Loads: Considering the Role of Clear, Cloudy, and Dusty Conditions in Hot and Dry Climates. Theses and Dissertations.
- Allard, F., Santamouris, M., Alvarez, S., European Commission, Directorate-General for Energy, ALTENER Programme, 1998. Natural ventilation in buildings: a design handbook. James and James (Science Publishers) Ltd., London.
- Almusaed, A., 2011. Biophilic and Bioclimatic Architecture: Analytical Therapy for the Next Generation of Passive Sustainable Architecture. Springer-Verlag, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-534-7>
- Al-Obaidi, K.M., Ismail, M., Abdul Rahman, A.M., 2014. Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research* 3, 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.002>
- Al-Sanea, S.A., Zedan, M.F., 2012. Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions. *Applied Energy* 98, 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.038>
- Al-Tamimi, N.M., Fadzil, S.F.S., Harun, W.M.W., 2011. The Effects of Orientation, Ventilation, and Varied WWR on the Thermal Performance of Residential Rooms in the Tropics. *Journal of Sustainable Development* 4, p142. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n2p142>
- Alvarado, J.L., Terrell, W., Johnson, M.D., 2009. Passive cooling systems for cement-based roofs. *Building and Environment* 44, 1869–1875. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.012>



- Androutsopoulos, A.V., Stavrakakis, G.M., Damasiotis, M., 2017. Cool Roof Impacts on a School-building Thermal and Energy Performance in Athens, Greece. *Procedia Environmental Sciences, Sustainable synergies from Buildings to the Urban Scale* 38, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.103>
- Ångström, A., 1915. A study of the radiation of the atmosphere: based upon observations of the nocturnal radiation during expeditions to Algeria and to California. Smithsonian Institution, Washington.
- Artmann, N., Manz, H., Heiselberg, P., 2007. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Applied Energy* 84, 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.05.004>
- Ascione, F., Bellia, L., Mazzei, P., Minichiello, F., 2010. Solar gain and building envelope: the surface factor. *Building Research & Information* 38, 187–205. <https://doi.org/10.1080/09613210903529118>
- ASHRAE, 2017. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. URL <https://www.buildings.com/news/industry-news/articleid/21382/title/ashrae-issues-updated-standard-on-thermal-environments> (accessed 6.14.20).
- Attia, S., Lacombe, T., Rakotondramiarana, H.T., Garde, F., Roshan, G., 2019. Analysis tool for bioclimatic design strategies in hot humid climates. *Sustainable Cities and Society* 45, 8–24. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.025>
- Aubinet, M., 1994. Longwave sky radiation parametrizations. *Solar Energy* 53, 147–154. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90475-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90475-8)
- Axley, J., 2019. Application of natural ventilation for US commercial buildings—climate suitability, design strategies & methods, modeling studies. Gaithersburg, MD, NIST.
- Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A., 2010. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>
- Bahadori, M.N., 1978. Passive Cooling Systems in Iranian Architecture. *Sci Am* 238, 144–154. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0278-144>
- Balaras, C.A., 1996. The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and Buildings* 24, 1–10. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00956-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00956-6)
- Baldinelli, G., 2009. Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment* 44, 1107–1118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.005>
- Bansal, N.K., Mathur, R., Bhandari, M.S., 1994. A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. *Building and Environment* 29, 495–500. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)90008-6)
- Barrios, G., Huelsz, G., Rojas, J., Ochoa, J.M., Marincic, I., 2012. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings* 50, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.030>

- Belarbi, R., Spérandio, M., Allard, F., 1997. Évaluation des bâtiments munis de systèmes de rafraîchissement passif. Application au cas de l'évaporation adiabatique. *Revue Générale de Thermique* 36, 547–561. [https://doi.org/10.1016/S0035-3159\(97\)84037-8](https://doi.org/10.1016/S0035-3159(97)84037-8)
- Belleri, A., Avantaggiato, M., Psomas, T., Heiselberg, P., 2018. Evaluation tool of climate potential for ventilative cooling. *International Journal of Ventilation* 17, 196–208. <https://doi.org/10.1080/14733315.2017.1388627>
- Bellia, L., Marino, C., Minichiello, F., Pedace, A., 2014. An Overview on Solar Shading Systems for Buildings. *Energy Procedia*, 6th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-14 62, 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.392>
- Benhammou, M., Draoui, B., Zerrouki, M., Marif, Y., 2015. Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. *Energy Conversion and Management* 91, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.042>
- Berdahl, P., Fromberg, R., 1982. The thermal radiance of clear skies. *Solar Energy* 29, 299–314. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90245-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90245-6)
- Berdahl, P., Martin, M., 1984. Emissivity of clear skies. *Solar Energy* 32, 663–664. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90144-0)
- Berger, X., Buriot, D., Garnier, F., 1984. About the equivalent radiative temperature for clear skies. *Solar Energy* 32, 725–733. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90247-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90247-0)
- Berger, X., Schneider, M., Deval, J.C., Kieno, F., Awanou, C.N., Donet, I., 1985. Thermal comfort in hot dry countries: radiative cooling by “diode” roof, in: Bowen, A. (Ed.), *Passive and Low Energy Ecotechniques*. Pergamon, pp. 960–967. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-031644-4.50081-3>
- Biwole, P.H., Woloszyn, M., Pompeo, C., 2008. Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time. *Energy and Buildings* 40, 1487–1497. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.004>
- Bliss, R.W., 1961. Atmospheric radiation near the surface of the ground: A summary for engineers. *Solar Energy* 5, 103–120. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(61\)90053-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(61)90053-6)
- Blondeau, P., Spérandio, M., Allard, F., 1997. Night ventilation for building cooling in summer. *Solar Energy* 61, 327–335. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00076-5)
- Booten, C., Kruis, N., Christensen, C., 2012. Identifying and Resolving Issues in EnergyPlus and DOE-2 Window Heat Transfer Calculations [WWW Document]. UNT Digital Library. <https://doi.org/10.2172/1051164>
- Bouchahm, Y., Bourbia, F., Belhamri, A., 2011. Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate. *Renewable Energy* 36, 898–906. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.030>
- Bozonnet, E., Doya, M., Allard, F., 2011. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings* 43, 3006–3012. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.017>
- Braun, J., 1990. Reducing Energy Costs and Peak Electrical Demand Through Optimal Control of Building Thermal Storage. *ASHRAE Transactions* 96, 876–887.

- Bravo, G., González, E., 2013. Thermal comfort in naturally ventilated spaces and under indirect evaporative passive cooling conditions in hot–humid climate. *Energy and Buildings* 63, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.007>
- Brown, G.Z., DeKay, M., 2013. Sun, wind, and light: architectural design strategies.
- Burnett, J., Bojić, M., Yik, F., 2005. Wind-induced pressure at external surfaces of a high-rise residential building in Hong Kong. *Building and Environment* 40, 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.019>
- Butera, F., Adhikari, R., Aste, N., United Nations Human Settlements Programme, 2014. Sustainable building design for tropical climates: principles and applications for eastern Africa.
- Caciolo, M., 2010. Analyse expérimentale et simulation de la ventilation naturelle mono-façade pour le rafraîchissement des immeubles de bureaux (phdthesis). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Cañas, I., Martin, S., 2004. Recovery of Spanish vernacular construction as a model of bioclimatic architecture. *Building and Environment* 39, 1477–1495. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.007>
- CEA, 2014. Accès à l'énergie et sécurité énergétique en Afrique de l'Est.
- CEN, 2007. Standard EN 15251–2007: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics [WWW Document]. URL <https://www.usgbc.org/resources/comit%C3%A9-europ%C3%A9en-de-normalisation-cen-standard-en-15251%E2%80%932007indoor-environmental-input-para> (accessed 6.14.20).
- Chan, H.-Y., Riffat, S.B., Zhu, J., 2010. Review of passive solar heating and cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 781–789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.030>
- Chandra, P., 1980. Rating of wall and roof sections—Thermal considerations. *Building and Environment* 15, 245–251. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(80\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(80)90006-2)
- Chesné, L., Duforestel, T., Roux, J.-J., Rusaouën, G., 2012. Energy saving and environmental resources potentials: Toward new methods of building design. *Building and Environment* 58, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.013>
- Ciampi, M., Leccese, F., Tuoni, G., 2003. Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings. *Solar Energy* 75, 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.010>
- Clark, G., Allen, C., 1978. The estimation of atmospheric radiation for clear and cloudy skies. *Proceedings of 2nd National Passive Solar Conference (AS/ISES)* 675–678.
- Coch, H., 1998. Chapter 4—Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2, 67–87. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(98\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(98)00012-4)
- Cole, R.J., 1976. The longwave radiative environment around buildings. *Building and Environment* 11, 3–13. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(76\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(76)90014-7)

- Cuce, P.M., Riffat, S., 2016. A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 1240–1249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.066>
- Cunha, A.R. da, Schöffel, E.R., 2011. The Evapotranspiration in Climate Classification. *Evapotranspiration - From Measurements to Agricultural and Environmental Applications*. <https://doi.org/10.5772/18095>
- Desogus, G., Felice Cannas, L.G., Sanna, A., 2016. Bioclimatic lessons from Mediterranean vernacular architecture: The Sardinian case study. *Energy and Buildings* 129, 574–588. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.051>
- Dunham, D., 1983. *Building for the maritime desert: climate, construction, and energy in Djibouti*. Volunteers in Technical Assistance, Arlington, Va. (1815 N. Lynn St., Suite 200, Arlington 22209).
- Edmonds, I.R., 1993. Performance of laser cut light deflecting panels in daylighting applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 29, 1–26. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(93\)90088-K](https://doi.org/10.1016/0927-0248(93)90088-K)
- Elmualim, A.A., Awbi, H.B., 2002. Wind Tunnel and CFD Investigation of the Performance of “Windcatcher” Ventilation Systems. *International Journal of Ventilation* 1, 53–64. <https://doi.org/10.1080/14733315.2002.11683622>
- El-shorbagy, A.M., 2010. *Design with Nature: Windcatcher as a Paradigm of Natural Ventilation Device in Buildings*.
- Emmerich, S.J., Dols, W.S., Axley, J.W., 2001. *Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools*.
- Enteria, N.A., Awbi, H., Santamouris, M. (Eds.), 2020. *Building in Hot and Humid Regions: Historical Perspective and Technological Advances*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7519-4>
- Faggianelli, G.A., Brun, A., Wurtz, E., Muselli, M., 2014. Natural cross ventilation in buildings on Mediterranean coastal zones. *Energy and Buildings* 77, 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.042>
- Fanger, P.O., 1970. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press.
- Fathy, H., Shearer, W., Ahmed Sultan, A., 1986. *Natural energy and vernacular architecture: principles and examples with reference to hot arid climates*. United Nations University, Chicago.
- Fernandes, J., Mateus, R., Bragança, L., Silva, J.J.C. da, 2015. Portuguese vernacular architecture: the contribution of vernacular materials and design approaches for sustainable construction. *Architectural Science Review* 58, 324–336. <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.974019>
- Florides, G., Kalogirou, S., 2007. Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable Energy* 32, 2461–2478. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.014>
- Flourentzou, F., Van der Maas, J., Roulet, C.-A., 1998. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. *Energy and Buildings* 27, 283–292. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00043-1)
- Foruzanmehr, A., 2012. The wind-catcher: users’ perception of a vernacular passive cooling system. *Architectural Science Review* 55, 250–258. <https://doi.org/10.1080/00038628.2012.722070>

- GABC, 2018. 2018 Global Status Report: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.
- Gan, G., Riffat, S.B., 1998. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery. *Applied Thermal Engineering* 18, 1171–1187. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(97\)00117-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(97)00117-8)
- Gao, J., Li, A., Xu, X., Gang, W., Yan, T., 2018. Ground heat exchangers: Applications, technology integration and potentials for zero energy buildings. *Renewable Energy* 128, 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.089>
- Garg, H.P., 1982. Treatise on solar energy. 1: Fundamentals of solar energy. - 1982, A Wiley-Interscience publication. Wiley, Chichester.
- Geros, V., Santamouris, M., Karatasou, S., Tsangrassoulis, A., Papanikolaou, N., 2005. On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. *Energy and Buildings* 37, 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.024>
- Gherri, B., 2015. Assessment of daylight performance in buildings. Methods and design strategies.
- Ghiaus, C., Allard, F., 2006. Potential for free-cooling by ventilation. *Solar Energy, Urban Ventilation* 80, 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.05.019>
- Givoni, B., 2011. Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy, Progress in Solar Energy* 1 85, 1692–1726. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.003>
- Givoni, B., 1994. *Passive Low Energy Cooling of Buildings*. John Wiley & Sons.
- Givoni, B., 1992. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings* 18, 11–23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- Givoni, B., 1991. Impact of planted areas on urban environmental quality: A review. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere* 25, 289–299. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90001-U](https://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90001-U)
- Givoni, B., 1969. *Man, climate, and architecture*,.
- Gonzalez, E., 1997. Etude de matériaux et de techniques du bâtiment pour la conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide (thesis). Paris, ENMP.
- Granqvist, C.G., Green, S., Niklasson, G.A., Mlyuka, N.R., von Kræmer, S., Georén, P., 2010. Advances in chromogenic materials and devices. *Thin Solid Films, Transparent Oxides for Electronics and Optics (TOEO-6)* 518, 3046–3053. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.08.058>
- Halwatura, R.U., 2018. Performance of insulated roofs with elevated outdoor conditions due to global warming.
- Hamza, N., 2008. Double versus single skin facades in hot arid areas. *Energy and Buildings* 40, 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.025>
- Hastings, S.R., 1989. Computer design tools for climate-responsive architecture. *Solar & Wind Technology* 6, 357–363. [https://doi.org/10.1016/0741-983X\(89\)90054-4](https://doi.org/10.1016/0741-983X(89)90054-4)
- Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Gilbert, H., Xamán, J., Chávez, Y., Shah, B., 2014. Thermal Performance of a Concrete Cool Roof under Different Climatic Conditions of Mexico. *Energy Procedia* 57, 1753–1762. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.164>

- Hiyama, K., Glicksman, L., 2015. Preliminary design method for naturally ventilated buildings using target air change rate and natural ventilation potential maps in the United States. *Energy* 89, 655–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.026>
- Hughes, B.R., Calautit, J.K., Ghani, S.A., 2012. The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied Energy* 92, 606–627. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>
- Hughes, B.R., Cheuk-Ming, M., 2011. A study of wind and buoyancy driven flows through commercial wind towers. *Energy and Buildings* 43, 1784–1791. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.022>
- Hughes, B.R., Ghani, S.A.A.A., 2008. Investigation of a windvent passive ventilation device against current fresh air supply recommendations. *Energy and Buildings* 40, 1651–1659. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.024>
- Ibañez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, M., Sacristán-Fernández, J.A., Martín-Gómez, C., 2017. Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.059>
- Inanici, M.N., Demirbilek, F.N., 2000. Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey. *Building and Environment* 35, 41–52. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00002-5)
- INSD, 2019. *Annuaire Statistique*.
- Ionescu, C., Baracu, T., Vlad, G.-E., Necula, H., Badea, A., 2015. The historical evolution of the energy efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.062>
- IRENA, 2015. Djibouti renewables readiness assessment.
- ISO, 2005. ISO 7730: ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. ISO. URL <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/91/39155.html> (accessed 6.14.20).
- Jomehzadeh, F., Nejat, P., Calautit, J.K., Yusof, M.B.M., Zaki, S.A., Hughes, B.R., Yazid, M.N.A.W.M., 2017. A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, 736–756. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>
- Kaboré, M., Bozonnet, E., Salagnac, P., Abadie, M., 2018. Indexes for passive building design in urban context – indoor and outdoor cooling potentials. *Energy and Buildings* 173, 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.043>
- Kabre, C., 2010. A new thermal performance index for dwelling roofs in the warm humid tropics. *Building and Environment* 45, 727–738. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.017>
- Kalantar, V., 2009. Numerical simulation of cooling performance of wind tower (Baud-Geer) in hot and arid region. *Renewable Energy* 34, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.007>

- Kalogirou, S.A., Florides, G., Tassou, S., 2002. Energy analysis of buildings employing thermal mass in Cyprus. *Renewable Energy* 27, 353–368. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00007-1)
- Kanters, J., Horvat, M., Dubois, M.-C., 2014. Tools and methods used by architects for solar design. *Energy and Buildings* 68, 721–731. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.031>
- Karakatsanis, C., Bahadori, M.N., Vickery, B.J., 1986. Evaluation of pressure coefficients and estimation of air flow rates in buildings employing wind towers. *Solar Energy* 37, 363–374. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90132-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90132-5)
- Karlsson, J., Wadsö, L., Öberg, M., 2013. A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures. *Energy and Buildings* 60, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.017>
- Kasten, F., Czeplak, G., 1980. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy* 24, 177–189. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(80\)90391-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(80)90391-6)
- Katafygiotou, M., Serghides, D.K., 2015. Bioclimatic chart analysis in three climate zones in Cyprus.
- Kato, S., Murakami, S., Mochida, A., Akabayashi, S., Tominaga, Y., 1992. Velocity-pressure field of cross ventilation with open windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 44, 2575–2586. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90049-G](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90049-G)
- Khani, S.M.R., Bahadori, M.N., Dehghani-Sani, A.R., 2017. Experimental investigation of a modular wind tower in hot and dry regions. *Energy for Sustainable Development* 39, 21–28.
- Kharrufa, S.N., Adil, Y., 2008. Roof pond cooling of buildings in hot arid climates. *Building and Environment* 43, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.034>
- Khatry, A.K., Sodha, M.S., Malik, M.A.S., 1978. Periodic variation of ground temperature with depth. *Solar Energy* 20, 425–427. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90161-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90161-5)
- Khedari, J., Rachapradit, N., Hirunlabh, J., 2003. Field study of performance of solar chimney with air-conditioned building. *Energy* 28, 1099–1114. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00092-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00092-6)
- Khedari, J., Waewsak, J., Thepa, S., Hirunlabh, J., 2000. Field investigation of night radiation cooling under tropical climate. *Renewable Energy* 20, 183–193. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00104-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00104-4)
- Koenigsberger, O.H., 1974. *Manual of tropical housing and building*. Longman, London.
- Kolokotroni, M., Aronis, A., 1999. Cooling-energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation. *Applied Energy* 63, 241–253. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00031-8)
- Kontoleon, K.J., Bikas, D.K., 2007. The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations. *Energy and Buildings* 39, 1011–1018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.11.006>

- Köppen, W., 2011. The thermal zones of the Earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world. *Meteorologische Zeitschrift* 351–360. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/105>
- Košir, M., 2019. *Climate Adaptability of Buildings: Bioclimatic Design in the Light of Climate Change*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18456-8>
- Kumar, R., Garg, S. n., Kaushik, S. c., 2005. Performance evaluation of multi-passive solar applications of a non air-conditioned building. *International Journal of Environmental Technology and Management* 5, 60–75. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2005.006507>
- Kusuda, T., Achenbach, P.R., 1965. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. National Bureau of Standards Gaithersburg MD.
- Lechner, N., 2015. Heating, cooling, lighting: sustainable design methods for architects.
- Lee, D.H.K., Givoni, B., 1971. Man, Climate, and Architecture. *Geographical Review* 61, 318. <https://doi.org/10.2307/214009>
- Lee, K.H., Strand, R.K., 2009. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. *Energy and Buildings* 41, 615–621. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.12.006>
- Looman, R., 2017. Climate-responsive design: A framework for an energy concept design-decision support tool for architects using principles of climate-responsive design. *A+ BE | Architecture and the Built Environment* 1–282.
- Lorenz, W., 2001. A glazing unit for solar control, daylighting and energy conservation. *Solar Energy* 70, 109–130. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00132-8)
- Maciel, A.A., Ford, B., Lamberts, R., 2007. Main influences on the design philosophy and knowledge basis to bioclimatic integration into architectural design—The example of best practices. *Building and Environment* 42, 3762–3773. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.041>
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F.G., Sabio-Ortega, A., García-Cruz, A., 2015. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, 736–755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- McAdams, W.H., 1985. Heat transmission. McGraw-Hill, Auckland.
- Megri, A.C., Achard, G., Haghghat, F., 1998. Using plastic waste as thermal insulation for the slab-on-grade floor and basement of a building. *Building and Environment* 33, 97–104. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00029-2)
- Moldovan, M.D., Visa, I., Duta, A., 2017. Enhanced Sustainable Cooling for Low Energy Office Buildings in Continental Temperate Climate. *J. Energy Eng.* 143, 04017054. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000485](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000485)
- Montazeri, H., Montazeri, F., Azizian, R., Mostafavi, S., 2010. Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling. *Renewable Energy* 35, 1424–1435. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.12.003>



- Muselli, M., 2010. Passive cooling for air-conditioning energy savings with new radiative low-cost coatings. *Energy and Buildings* 42, 945–954. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.006>
- Nebbar, H., Hamdi, O., Moumimi, N., Brima, A., 2014. Etude de comportement thermique d'un échangeur enterré air/sol Expérimentation de Biskra (Algérie).
- Nicol, F., Stevenson, F., 2013. Adaptive comfort in an unpredictable world. *Building Research & Information* 41, 255–258. <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.783528>
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34, 563–572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- Nicol, J.F., Roaf, S., 2017. Rethinking thermal comfort. *Building Research & Information* 45, 711–716. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1301698>
- Nouanégué, H.F., Alandji, L.R., Bilgen, E., 2008. Numerical study of solar-wind tower systems for ventilation of dwellings. *Renewable Energy* 33, 434–443. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.001>
- Ochoa, C.E., Capeluto, I.G., 2006. Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. *Building and Environment* 41, 1128–1135. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.001>
- Oleson, K.W., Bonan, G.B., Feddema, J., 2010. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophysical Research Letters* 37. <https://doi.org/10.1029/2009GL042194>
- Olgyay, V., 2015. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism-new and expanded edition. Princeton university press.
- Olgyay, V., Olgyay, A., 1963. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism ... Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Oliver, P., 1997. Encyclopedia of vernacular architecture of the world.
- Omar, A.I., Virgone, J., Vergnault, E., David, D., Idriss, A.I., 2017. Energy Saving Potential with a Double-Skin Roof Ventilated by Natural Convection in Djibouti. *Energy Procedia, Beyond NZEB Buildings (AiCARR 50th International Congress, Matera (I), 10-11 May 2017)* 140, 361–373. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.149>
- Pajek, L., Košir, M., 2017. Can building energy performance be predicted by a bioclimatic potential analysis? Case study of the Alpine-Adriatic region. *Energy and Buildings* 139, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.035>
- Papadakis, G., Tsamis, P., Kyritsis, S., 2001. An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. *Energy and Buildings* 33, 831–836. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00066-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00066-4)
- Papaefthimiou, S., Leftheriotis, G., Yianoulis, P., Hyde, T.J., Eames, P.C., Fang, Y., Pennarun, P.-Y., Jannasch, P., 2006. Development of electrochromic evacuated advanced glazing. *Energy and Buildings* 38, 1455–1467. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.029>

- Parker, D.S., Barkaszi, S.F., 1997. Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida. *Energy and Buildings* 25, 105–115. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01000-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01000-6)
- Parker, D.S., Sherwin, J.R., Hermelink, A.H., 2008. NightCool: A Nocturnal Radiation Cooling Concept (No. FSEC-CR-1771-08). EERE Publication and Product Library; Florida Solar Energy Center, Cocoa, FL (United States).
- Pearlmutter, D., Erell, E., Etzion, Y., Meir, I.A., Di, H., 1996. Refining the use of evaporation in an experimental down-draft cool tower. *Energy and Buildings* 23, 191–197. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)00944-2](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)00944-2)
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pisello, A.L., Pignatta, G., Castaldo, V.L., Cotana, F., 2014. Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roofing and Cool Pavement. *Sustainability* 6, 1–17.
- Prado, R.T.A., Ferreira, F.L., 2005. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings* 37, 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.009>
- Raeissi, S., Taheri, M., 2000. Skytherm: an approach to year-round thermal energy sufficient houses. *Renewable Energy* 19, 527–543. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00079-8)
- Raman, A.P., Anoma, M.A., Zhu, L., Rephaeli, E., Fan, S., 2014. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature* 515, 540–544. <https://doi.org/10.1038/nature13883>
- Rephaeli, E., Raman, A., Fan, S., 2013. Ultrabroadband Photonic Structures To Achieve High-Performance Daytime Radiative Cooling. *Nano Lett.* 13, 1457–1461. <https://doi.org/10.1021/nl4004283>
- Reppel, J., Edmonds, I.R., 1998. Angle-selective glazing for radiant heat control in buildings: theory. *Solar Energy* 62, 245–253. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00006-1)
- Roaf, S., 2019. 739: The Traditional Technology Trap (2): More lessons from the Windcatchers of Yazd.
- Robinson, A., Selkowitz, S., 2013. Tips for daylighting with windows (No. LBNL-6902E). Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (United States). <https://doi.org/10.2172/1167562>
- Roche, P.M.L., 2017. Carbon-Neutral Architectural Design. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119649>
- Rohli, R.V., Vega, A.J., 2018. Climatology, Fourth edition. ed. Jones & Bartlett Learning, Burlington, Massachusetts.
- Romeo, C., Zinzi, M., 2013. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy and Buildings* 67, 647–657. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.023>
- Roucoul, J.-M., Douzane, O., Langlet, T., 1999. Incorporation of thermal inertia in the aim of installing a natural nighttime ventilation system in buildings. *Energy and Buildings* 29, 129–133. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00057-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00057-7)

- Ruud, M.D. (Johnson C., Mitchell, J.W., Klein, S.A. (Solar E.L., 1990. Use of building thermal mass to offset cooling loads. *ASHRAE Transactions (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)*; (United States) 96:2.
- Saadatian, O., Haw, L.C., Sopian, K., Sulaiman, M.Y., 2012. Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1477–1495. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.037>
- Sahabuddin, M.F.M., Longo, C.G., 2015. Traditional Values and their Adaptation in Social Housing Design: Towards a New Typology and Establishment of ‘Air House’ Standard in Malaysia. *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR* 9, 31–44. <https://doi.org/10.26687/archnet-ijar.v9i2.493>
- Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 2013. *Passive cooling of buildings. Earthscan from Routledge, Abingdon, Oxon.*
- Santamouris, M., Kolokotsa, D., 2013. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings* 57, 74–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>
- Shanthi Priya, R., Sundarraja, M.C., Radhakrishnan, S., 2012. Experimental study on the thermal performance of a traditional house with one-sided wind catcher during summer and winter. *Energy Efficiency* 5, 483–496. <https://doi.org/10.1007/s12053-012-9155-9>
- Sharifi, A., Yamagata, Y., 2015. Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review. *Applied Energy* 160, 336–357. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.061>
- Slee, B., Parkinson, T., Hyde, R., 2013. Can you have too much thermal mass, in: *Cutting Edge in Architectural Science: Proceedings of the 47th International Conference of the Architectural Science Association*. pp. 325–333.
- Smith, G.B., Dligatch, S., Sullivan, R., Hutchins, M.G., 1998. Thin film angular selective glazing. *Solar Energy* 62, 229–244. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00009-7)
- Spanaki, A., Kolokotsa, D., Tsoutsos, T., Zacharopoulos, I., 2014. Assessing the passive cooling effect of the ventilated pond protected with a reflecting layer. *Applied Energy* 123, 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.040>
- Spanaki, A., Tsoutsos, T., Kolokotsa, D., 2011. On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 3523–3533. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.007>
- Stavrakakis, G.M., Koukou, M.K., Vrachopoulos, M.Gr., Markatos, N.C., 2008. Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. *Energy and Buildings* 40, 1666–1681. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.022>
- Sun, X., Sun, Y., Zhou, Z., Alam, M.A., Bermel, P., 2017. Radiative sky cooling: fundamental physics, materials, structures, and applications. *Nanophotonics* 6, 997–1015. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0020>

- Swinbank, W.C., 1963. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 89, 339–348. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>
- Synnefa, A., Santamouris, M., Akbari, H., 2007. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings* 39, 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>
- Szokolay, S., 2014. *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*, 3rd ed. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315852409>
- Szokolay, S., 1986. Climate analysis based on the psychrometric chart. *International Journal of Ambient Energy* 7, 171–182. <https://doi.org/10.1080/01430750.1986.9675499>
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., van den Dobbelsteen, A., 2013. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.050>
- Tavakolinia, F., 2011. *Wind- Chimney (Integrating the Principles of a Wind-Catcher and a Solar-Chimney to Provide Natural Ventilation)*. Master's Theses and Project Reports. <https://doi.org/10.15368/theses.2011.232>
- Tittlein, P., 2008. *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation (phdthesis)*. Université de Savoie.
- Tiwari, G.N., Kumar, A., Sodha, M.S., 1982. A review—Cooling by water evaporation over roof. *Energy Conversion and Management* 22, 143–153. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(82\)90036-X](https://doi.org/10.1016/0196-8904(82)90036-X)
- Tsilingiris, P.T., 2006. The influence of heat capacity and its spatial distribution on the transient wall thermal behavior under the effect of harmonically time-varying driving forces. *Building and Environment* 41, 590–601. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.031>
- UN-Habitat, 2012a. *Sustainable Urbanization in Asia: A Sourcebook for Local Governments*.
- UN-Habitat, 2012b. *The State of Latin American and Caribbean Cities 2012: Towards a New Urban Transition*. United Nations Publications.
- UN-Habitat, 2010. *The State of African Cities 2010: Governance, Inequality and Urban Land Markets*. UN-HABITAT.
- Vijaykumar, K.C.K., Srinivasan, P.S.S., Dhandapani, S., 2007. A performance of hollow clay tile (HCT) laid reinforced cement concrete (RCC) roof for tropical summer climates. *Energy and Buildings* 39, 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.009>
- Voss, K., Herkel, S., Pfafferott, J., Löhnert, G., Wagner, A., 2007. Energy efficient office buildings with passive cooling – Results and experiences from a research and demonstration programme. *Solar Energy* 81, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.04.008>
- Xu, T., Sathaye, J., Akbari, H., Garg, V., Tetali, S., 2012. Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. *Building and Environment* 48, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.011>

- Yaghoubi, M.A., Sabzevari, A., Golneshan, A.A., 1991. Wind towers: Measurement and performance. *Solar Energy* 47, 97–106. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90040-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90040-4)
- Yang, L., Li, Y., 2008. Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation. *Energy and Buildings* 40, 2052–2058. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.014>
- Yannas, S., Erell, E., Molina, J.L., 2019. Roof cooling techniques: a design handbook.
- Yazdanian, M., Klems, J.H., 1993. Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings (No. LBL-34717; CONF-940104-10). Lawrence Berkeley Lab., CA (United States).
- Yu, C., Hien, W.N., 2006. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings* 38, 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.04.003>
- Yusta Garcia, F., 2018. La méthode des saisons climatiques : stratégie passive de conception architecturale de bâtiments basse consommation énergétique en climat très chaud (thesis). Bordeaux.
- Zhai, X.Q., Song, Z.P., Wang, R.Z., 2011. A review for the applications of solar chimneys in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 3757–3767. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.013>
- Zhai, Z. (John), Previtali, J.M., 2010. Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation. *Energy and Buildings* 42, 357–365. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.002>
- Zhang, K., Zhao, D., Yin, X., Yang, R., Tan, G., 2018. Energy saving and economic analysis of a new hybrid radiative cooling system for single-family houses in the USA. *Applied Energy* 224, 371–381. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.115>
- Zhu, L., Hurt, R., Correia, D., Boehm, R., 2009. Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house. *Energy and Buildings* 41, 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.003>
- Zhu, L., Raman, A., Fan, S., 2013. Color-preserving daytime radiative cooling. *Appl. Phys. Lett.* 103, 223902. <https://doi.org/10.1063/1.4835995>

## FOLIO ADMINISTRATIF

### THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON 1

NOM : <b>IDRIS OMAR</b> DATE de SOUTENANCE : <b>16/10/2020</b> Prénoms : <b>Abdou</b>
TITRE : <b>Études de l'amélioration de la performance énergétique et de stratégies de conception architecturale bioclimatique en climat chaud et humide.</b>
NATURE : <b>Doctorat</b> Numéro d'ordre : 2020LYSE1172 Ecole doctorale : <b>MEGA</b> Spécialité : <b>Génie Civil</b>
RESUME : Pour réduire la consommation d'énergie des bâtiments, une solution connue depuis des décennies, consiste à concevoir son enveloppe afin d'exploiter les ressources énergétiques existant dans l'environnement. C'est le principe même de l'architecture dite bioclimatique. Cela est d'autant plus vrai pour les climats chauds et humides. Mais jusqu'à présent, l'absence de critères permettant d'identifier les ressources énergétiques disponibles dans l'environnement et le niveau de performance de la solution technique a représenté un obstacle majeur. Pour résoudre ce problème, ce projet de thèse a une double ambition. D'une part, nous élaborons des nouveaux critères d'analyse qui permette de quantifier les potentiels énergétiques d'un site et les performances bioclimatiques de solutions constructives au regard de ces potentiels. Cette nouvelle approche adaptée au bâtiment entièrement climatisé dans un climat chaud et humide donne une vue d'ensemble des ressources environnementales exploitables et de la capacité du bâtiment à exploiter ces ressources. Un cas d'étude sous le climat de Djibouti est alors choisi pour mettre en œuvre l'ensemble des indicateurs bioclimatiques et les résultats sont analysés sur toute l'année, mais aussi de manière dynamique. Ce travail de thèse montre non seulement la capacité des indicateurs à refléter les performances bioclimatiques des bâtiments, mais aussi leur capacité à donner une vue d'ensemble des échanges thermiques du bâtiment. Ces indicateurs permettent donc de fixer dès les premières étapes de la conception, des points de repère sur l'état des ressources et surtout l'exploitation qui en est faite par les solutions techniques les plus adaptées au climat local. Finalement, les nouveaux critères d'analyse sont utilisés dans une approche de conception des bâtiments, pour évaluer la performance bioclimatique de différentes solutions constructives. Notre contribution permet à terme de servir de socle aux futures réglementations thermiques des bâtiments dans les pays à climat chaud et humide, en général, et à Djibouti, en particulier.
MOTS CLES : Ressources environnementales, Indicateurs bioclimatiques, Indicateurs de performance, Conception bioclimatique, Enveloppe du bâtiment, Climat chaud et humide.
Laboratoire de recherches : <b>CETHIL</b>
Directeur de thèse : <b>Joseph VIRGONE</b>
Président du jury : Composition du jury F. Gille, Professeur (LOCIE – Université Savoie Mont Blanc), Rapporteur M. Marjorie, Directrice de Recherche (CEREMA), Rapporteur C. Laurence, Professeur (LMC <sup>2</sup> – Université Lyon 1), Examinatrice W. Monica, Professeur (LOCIE – Université Savoie Mont Blanc), Examinatrice V. Joseph, Professeur (CETHIL – Université Lyon 1), Directeur de thèse A.I. Idriss Maître de Conférences (Université de Djibouti), Co-directeur de thèse V. Etienne, Maître de Conférences (CETHIL – Université Lyon 1), Invité D. Damien, Maître de Conférences (CETHIL – Université Lyon 1), Invité